

OTIMIZAÇÃO DO PROBLEMA DE CORTE UNIDIMENSIONAL: UM ESTUDO DE CASO NA INDÚSTRIA PAPELEIRA

Bruno Oliveira¹ (UTFPR) – brunoengenharia@outlook.com

Rodrigo Salvador² (UTFPR) – salvador.rodrigors@gmail.com

Vanina M. Durski Silva³ (DAENP-UTFPR) – vaninasilva@utfpr.edu.br

Resumo: Com o acirramento da competitividade e a intensa e constante mudança tecnológica que o mercado vem sofrendo, a utilização de métodos que busquem otimizar a produção, quer seja no aspecto econômico, ambiental ou outro, se apresenta mais do que apenas um fator diferencial de competitividade. Nesta ótica o uso de ferramentas de pesquisa operacional na solução de problemas e otimização de processos é de extrema importância. Assim, este trabalho, um estudo de caso na indústria papeleira, objetiva minimizar a quantidade de resíduos gerada nas atividades de corte do processo de produção de bobinas de papel cartão de uma matriz (bobina) jumbo, em um mês de operação em uma unidade de uma companhia do ramo papeleiro da região dos Campos gerais, por meio do uso de métodos de programação linear. Foi utilizada para solução do problema de corte unidimensional, inicialmente a modelagem matemática, optando-se pelo uso da ferramenta Solver para a resolução do mesmo. Feito isso, encontrou-se uma solução ótima para o problema, de modo a atender todas as restrições impostas pelo modelo.

Palavras-chave: Otimização; Problema de Corte; Resíduos; Indústria Papeleira.

1. Introdução

Com o desenvolvimento tecnológico, a globalização e a cada vez mais acirrada competitividade, além do aumento da preocupação com um desenvolvimento sustentável, o desenvolvimento e aperfeiçoamento de novos métodos em busca da melhoria de processos se torna fator diferencial dentro da estratégia de planejamento e ação de uma empresa.

A busca pelo aumento da eficiência de cada parcela do processo produtivo é inerente à sede de evolução de toda a cadeia de produção. Num aspecto geral, cada avanço contribui para uma progressão rumo a um aperfeiçoamento global (KAMIMURA, PAES e OLIVEIRA, 2012; LUZ *et al.*, 2012).

¹ Acadêmico do curso de Engenharia de Produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

² Acadêmico do curso de Engenharia de Produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Bolsista de Iniciação Científica em Gestão da Sustentabilidade em Sistemas Produtivos, com foco em Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

³ Doutora em Eng. de Produção na área de Logística e Transporte pela Universidade Federal de Santa Catarina. Pós-Doutorado pelo Programa Nacional de Pós Doutorado (PNPD-CAPES) no Depto. de Eng. de Produção da UFSC. Professora Adjunto I do Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Dentro deste contexto, pode-se destacar como ferramenta auxiliadora a pesquisa operacional, que consiste em uma abordagem científica com a finalidade de prever e comparar estratégias e decisões alternativas, de modo a alcançar o aperfeiçoamento da produção, proporcionando a otimização do processo envolvido por meio de uma simplificação do problema real a partir de um modelo que o represente (POLDI e ARENALES, 2006).

Em face ao exposto o objetivo deste trabalho é encontrar o plano de produção que minimize a quantidade de resíduos gerada nas atividades de corte do processo de produção de bobinas de papel cartão, em um mês de operação de uma unidade de uma empresa do ramo papelero, utilizando programação linear (PL).

Este estudo justifica-se pela necessidade do cuidado com o meio, bem como com os aspectos econômicos da produção, que levam à discussão de melhores maneiras de praticá-la, de modo que a empresa possa desfrutar de uma prática sustentável, reduzindo os impactos inerentes à atividade desenvolvida e podendo, ao mesmo tempo, obter ganhos econômicos e de *marketing*.

Assim, evidencia-se a necessidade de planejar a produção visando adaptar o material primário às demandas dos clientes. As sobras das atividades de corte, não sofrem simples descarte. Devido às suas características são incorporadas, em um novo ciclo da produção, à camada intermediária de um novo lote de papel cartão.

Neste sentido, na ótica de Cherry, Além Junior e Silva (2010), o aproveitamento das sobras é prática real em muitas organizações, principalmente quando a matéria-prima se mostra como uma parcela significativa do custo total produto final. Observa-se, ainda, grande importância da característica sustentável desta prática, tendo influência nos âmbitos econômico, além de social e ambiental.

Como afirmam Silveira Júnior, Pinheiro e Thomaz (2004), as proporções alcançadas por tais perdas, as sobras das operações de corte, podem ser gigantescas, *a priori* em detrimento do atendimento da demanda, sendo importantes fatores na geração do custo final dos produtos e mesmo das operações de produção. Além do exposto, a preocupação com os parâmetros gerais da produção englobam não somente aspectos econômicos, mas também evidenciam preocupação com a geração de resíduos e conseqüente desperdício de matérias-primas como energia e outros, que são responsáveis, muitas vezes, pela depreciação de fontes renováveis e não renováveis.

Frente a este contexto, o objetivo deste trabalho é encontrar o plano de produção que minimize a quantidade de resíduos gerada nas atividades de corte, da produção de bobinas de papel cartão, em um mês de operação da unidade Monte Alegre das indústrias Klabin, utilizando programação linear (PL).

Acordando com esta perspectiva, este artigo está organizado da seguinte maneira: a metodologia empregada para a realização do mesmo é apresentada na sequência, seguida de outras cinco seções. Na seção 2 é apresentado um breve contexto a respeito das características de produção na unidade física utilizada para a realização deste estudo. A seção 3 apresenta o conceito de Pesquisa Operacional, mais especificamente a definição do problema de corte unidimensional, conceito este que será empregado na modelagem do problema de estudo. Tal problema é apresentado e contextualizado na seção 4. Dando continuidade, a seção 5 apresenta a modelagem matemática proposta para o problema em estudo, as análises e resultados obtidos, seguida da última seção, referente às das considerações finais, e então as referências bibliográficas.

1.1. Metodologia

A abordagem metodológica utilizada para a realização deste trabalho constitui-se de um estudo de caso, tendo como foco a unidade fabril de Monte Alegre das Indústrias Klabin. Em visita à unidade, com o acompanhamento de um responsável técnico pela área, tendo o conhecimento de todo o funcionamento das instalações, identificou-se um ponto potencial de melhoria na etapa de corte de bobinas jumbo e, levando em conta os aspectos econômicos, pelo atendimento da demanda e estoque, e de sustentabilidade, pela minimização dos resíduos, formulou-se um modelo de programação linear, cujo qual foi resolvido com o auxílio da ferramenta Solver, disponível para uso na planilha Excel do pacote Office (*Microsoft Corporation* ®) para a solução do problema e descoberta da solução ótima.

Além disto, foi realizada uma pesquisa bibliográfica, documental, qualitativa, em bases de dados e anais de eventos, ambos nacionais e internacionais, abordando o conceito referente a “Problema de Corte Unidimensional” que forneceu o referencial e serviu de apoio à obtenção dos resultados encontrados, em uma abordagem exploratória e qualitativa.

2. Contexto organizacional

2.1. Processo de fabricação do papel

O processo de fabricação de papel é constituído de uma cadeia de processos interligados, em algumas etapas quimicamente complexas, porém que visam, em suma, a separação de fibras e o tratamento das mesmas para que adquiram propriedades adequadas ao devido fim. Expondo, de modo simplificado, o processo executado pela Klabin, pode-se visualizar através do fluxograma na Figura 1, e logo em seguida será feita uma breve explicação a respeito das etapas de maior relevância do processo.

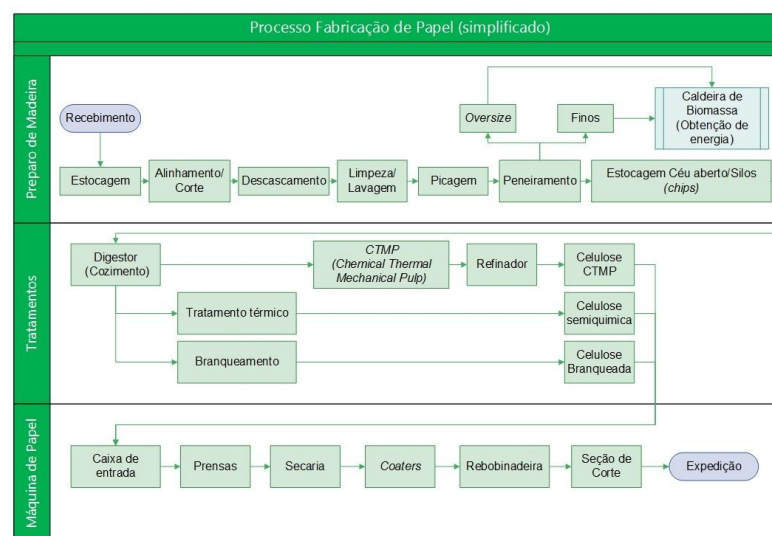


Figura 1 – Processo de produção do papel cartão

Fonte: Klabin (2013)

2.1.1. Preparo de madeira

Após a obtenção da madeira na área florestal, sendo elas provenientes de Pinus (*hardwood* – fibra longa) e Eucalipto (*softwood* – fibra curta), devido a necessidade de um *mix* de ambas para a obtenção das características desejadas ao produto final, são encaminhadas para a indústria, onde são estocadas a céu aberto, aguardando até o momento de entrar no processo, obedecendo o sistema FIFO (*First In, First Out*).

Em seguida a madeira passa por um descascador, o qual tem formato de um tambor, onde por atrito tanto contra as paredes como com outras toras, as cascas são retiradas. Estes resíduos de cascas são encaminhados por meio de esteiras para realizar a queima na caldeira de força, com o intuito de obtenção de energia para o processo.

Como etapa seguinte as toras de eucalipto e pinus, agora descascadas, são levadas para o picador onde será obtido o cavaco, mais comumente conhecido na indústria como *chip*. Após esta etapa os *chips* passam por uma etapa de peneiramento, onde somente aqueles com tamanho adequado vão para a linha de produção e os rejeitos da peneira, conhecidos com finos (menores) ou *oversizes* (maiores), são direcionados por uma linha para reaproveitamento juntamente com as cascas, para geração de energia. Finalizando esta etapa, os *chips* que foram aprovados na etapa anterior vão para estocagem a céu aberto, também, onde se formam pilhas de cavaco.

2.1.2. Tratamento térmico químico/mecânico ou CTMP (*chemical thermal mechanical pulp*) termoquimiomecânico

Nesta etapa, o cavaco, de forma simplificada, é levado ao cozimento e dependendo do tipo de tratamento que o mesmo é submetido, seu rendimento pode ser maior ou menor. Os cavacos são levados a um digestor, que possui agentes químicos como hidróxido de sódio e sulfeto de sódio, à elevada temperatura, a fim de que ocorra a separação das fibras.

Como para a fabricação de papéis para embalagens é necessário que haja impressão, o papel é composto por mais de uma camada e nesse momento o processo se divide em duas linhas. De uma delas se obtém a polpa celulósica natural e da outra a polpa celulósica branqueada, que passa pelo processo químico de branqueamento.

Por fim antes de entrar na máquina de papel, as fibras recebem um tratamento de refinação, onde passando pelo refinador, as mesmas ficam com aparência “arrepiciada”, característica que facilita o encaixe das mesmas e também atua proporcionando uma maior resistência ao produto final.

2.1.3. Máquina de papel

A máquina de papel é composta por três seções importantes, das quais a caixa de entrada, onde a polpa é misturada às cargas minerais e a mistura apresenta cerca de 99,5% de água e somente 0,05% é polpa; as prensas, onde a mistura apresenta cerca de 80% de água e 20% polpa; e a secaria, onde a mistura apresenta cerca de 50% de água e 50% de polpa, chegando após a passagem completa pela etapa de secagem com aproximadamente 7% de umidade, característica esperada ao fim do processo. Em suma, a máquina de papel é encarregada, basicamente, de retirar a água presente na mistura.

Esta máquina possui uma mesa tripla, o que possibilita a junção das três camadas necessárias, como mostra a Figura 2, para a fabricação do produto. O “carro chefe” da unidade em estudo, da indústria Klabin é o LPB (*Liquid Packaging Board*), papel para embalagem de alimentos que é utilizado no Brasil e no mundo.

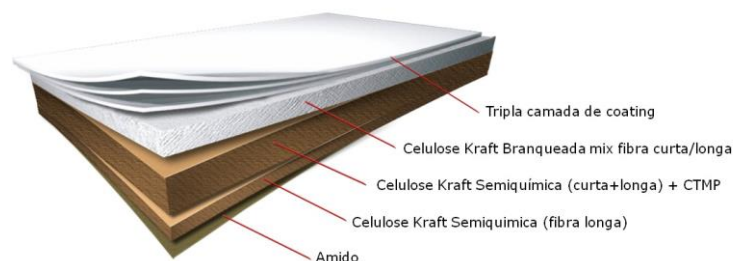


Figura 2 – Estrutura do papel cartão em camadas
Fonte: Klabin (2013)

Como fim de todo este processo, toda máquina de papel possui ao seu final uma seção de corte como pode ser visto na Figura 3, que serve para que as bobinas sejam finalizadas com padrões de largura e comprimento pré-estabelecidos pelo cliente, visto que as bobinas jumbo ao sair da seção de secaria, possuem 6 metros de largura e 10.000 metros de comprimento.



Figura 3 – Seção de corte
Fonte: Klabin (2013)

3. Uso de Pesquisa operacional

Muitos modelos de negócios se baseiam em ferramentas matemáticas para praticar a gestão e definir seu planejamento, bem como realizar o controle das operações e, a pesquisa operacional tem se apresentado como uma ferramenta de grande auxílio na tomada de decisão neste aspecto (CHENG e PRABHU, 2012).

Para o uso da pesquisa operacional na solução de problemas, considera-se a simplificação do problema real a fim da representação do mesmo para que se encontre uma solução ótima, contudo, mesmo trabalhando com tal simplificação, a formulação do problema deve levar em conta as incertezas do sistema (CONGEDO, WITTEVEEN e IACCARINO, 2013).

3.1. Problema de corte unidimensional

Os primeiros registros de estudos relacionados ao problema de corte datam da década de 1960, onde identifica-se os pioneiros P. C. Gilmore e R. E. Gomory, tratando do problema de corte de estoques, os quais o definem como “atender um pedido a um custo mínimo para uma dimensão específica do material a ser cortado a partir de determinada dimensão de estoque a determinado custo” (GILMORE e GOMORY, 1961, p. 849).

Para Poldi e Arenales (2006, p. 473) o problema de corte unidimensional consiste em buscar “cortar objetos disponíveis para a produção de itens de modo a atender uma demanda especificada, em que apenas uma dimensão é relevante para o corte (barras, bobinas, etc.)”.

O processo consiste em obter produtos menores a partir do corte de uma matriz com dimensões superiores, seguindo determinados padrões de corte que consistem, estes, nas variáveis de decisão (YANASSE e LAMOSA, 2007; POLDI e ARENALES, 2006). Estes problemas de corte podem ser divididos em duas categorias, de acordo com Silveira Júnior, Pinheiro e Thomaz (2004), sendo elas heurísticas e de programação linear. E assim, o uso de estratégias adequadas para os processos de corte podem guiar uma redução dos custos associados a estas atividades, bem como ao alcance de melhorias neste processo (CHERRY, ALEM JUNIOR e SILVA, 2010).

Observa-se uma grande abordagem deste problema na literatura, por Yanasse e

Lamosa (2007), Poldi e Arenales (2006), Silveira Junior, Pinheiro e Thomaz (2004), Bruglieri, Maffioli e Ehr Gott (2003), Cherry, Alem Junior e Silva (2010) e Suliman (2005), onde são realizadas abordagens do problema de corte unidimensional, bidimensional e integrado a estoque.

Contudo, observa-se que o problema de corte aliado a uma política de aproveitamento das sobras resultantes dessa atividade (problema de corte de estoque com sobras aproveitáveis (PCESA)) tem sido pouco estudado (CHERRY, ALEM JUNIOR e SILVA, 2010).

No presente estudo de caso, a unidade industrial em estudo realiza o aproveitamento das sobras oriundas das atividades de corte, contudo este panorama não é aqui discutido por não apresentar-se pertinente ao escopo do estudo.

4. Cenário geral do problema

Nesta seção é apresentado o problema estudado, dado o sistema considerado, as variáveis, as restrições, bem como o contexto geral que envolve toda a atividade em voga. A princípio são expostas as considerações iniciais levadas em conta para que seja possível entendimento adequado do foco e localização do problema dentro do sistema produtivo.

4.1. Considerações iniciais

Tendo como contexto global a produção de papel cartão, considera-se como limitação deste artigo, o ambiente industrial de produção (*on-site*) e adota-se especificamente a etapa de corte de bobinas jumbo (material primário resultante do processo de produção do papel cartão, que sofrerá beneficiamento a partir do corte e adequação de dimensões visando atender às demandas dos clientes) para a definição do problema a ser estudado.

4.2. Definição do problema

Para a definição do problema e possibilidade da descoberta de uma solução factível simplifica-se, aqui, as dimensões e os diferentes tipos de bobinas comercializadas como produto final pela indústria Klabin, restringindo a quantidade de bobinas estudadas para o corte a três.

A empresa comercializa, em primeira 3 tipos de bobinas de papel cartão (aqui definidas como sendo B_1 , B_2 e B_3). Estas bobinas são resultantes do corte de bobinas jumbo (produto primário do processo de produção do papel) com dimensões de 6m de largura por 10.000m de comprimento. Sabe-se também que os diferentes clientes desta unidade necessitam de diferentes tipos de bobinas e em diferentes quantidades. Observa-se, ainda, que é possível realizar diferentes cortes a partir de uma mesma matriz. Assim percebe-se, também, que ao final do corte de uma bobina jumbo pode restar uma porção que apresenta dimensões não aproveitáveis por qualquer dos clientes. Deste modo esta porção é armazenada e incorporada ao processo de produção do papel novamente fazendo parte da camada intermediária, onde não afeta a qualidade do produto. Mesmo que esta parcela de produto final não seja totalmente perdida, retornando à produção, todas as entradas (energia, mão-de-obra, tempo de operação dos equipamentos, etc.) da produção inicial do mesmo não podem ser recuperadas e apresentam-se como custo adicional.

Se houver produção maior do que a demanda os produtos podem ser armazenados em estoque. Contudo esta operação deve obedecer à quantidade máxima permitida, observando que a empresa não trabalha com uma produção e venda baseada em estoques.

Além do mais considera-se, aqui, a existência de um cliente fictício (tratado aqui como Cliente C) cuja demanda é de 150.000 unidades para cada tipo de bobina (B_1 , B_2 e B_3), para que se possa observar o comportamento do modelo e a geração de resíduos frente a diferentes

cenários. Esta característica é apenas fictícia, como colocado, não expondo uma atividade que realmente ocorre dentro da unidade, servindo apenas para trabalhar com diferentes características dentro do modelo proposto e avaliar as características da geração de sobras.

Os tipos de bobinas, suas dimensões, as demandas e as quantidades máximas de produção, levando em conta com o estoque máximo permitido na unidade industrial em estudo são apresentados na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Demanda mensal e estoque máximo dos tipos de bobinas produzidas na unidade fabril (em unidades de bobinas)

Tipo de bobina	B ₁	B ₂	B ₃
Demanda	1.500.000	750.000	850.000
Estoque máximo	100.000	250.000	250.000
Demanda + Estoque máximo	1.600.000	1.000.000	1.000.000

Deste modo pode-se observar que a política de estoque restringe de certa forma a produção das bobinas, uma vez que deve ser respeitado o espaço disponível para o armazenamento de excedentes.

Outra informação indispensável é a quantidade e proporção do pedido do cliente C, apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Pedido do Cliente C (em unidades de bobinas)

Tipo de bobina	B ₁	B ₂	B ₃
Pedido do Cliente C	150.000	150.000	150.000

É necessário observar que estas quantidades já estão incluídas na demanda global mensal; a Tabela 2 apenas especifica as quantidades que são demandadas pelo Cliente C. Supõe-se que este pedido ocorre sempre na mesma quantidade e na mesma proporção (para cada B₁ são necessárias 1 B₂ e 1 B₃). Além do mais, esta proporção define exatamente as proporções utilizadas no padrão de corte X₃, que será apresentado na seção seguinte, tornando imperativo que a produção deste padrão de corte siga na produção em paralelo com a demanda do referido cliente em detrimento do pedido necessitar ser atendido de forma rápida.

4.2.1. Padrões de cortes

Para a realização dos cortes é necessário levar em consideração as dimensões da bobina jumbo. As Bobinas B₁, B₂ e B₃ possuem diferentes dimensões quanto à largura, como mostrado na Tabela 3. Contudo, não diferem no comprimento, tendo todas o mesmo comprimento da bobina jumbo (10.000m), fazendo, então, com que no problema tenha de ser considerada apenas uma dimensão para os cortes, utilizando um panorama unidimensional.

Tabela 3 – Dimensões dos tipos de bobinas

		Largura (m)	Comprimento (m)
Tipo de bobina	B ₁	2,4	10.000
	B ₂	1,8	10.000
	B ₃	1,4	10.000

Assim, considerando que os cortes realizados não podem exceder as dimensões da bobina jumbo, observa-se que são possíveis algumas combinações de corte que atendem a esta restrição. Deste modo são apresentados na Tabela 4 os padrões de corte praticáveis e ao final, os respectivos resíduos gerados (largura(m)) por cada combinação.

Tabela 4 – Padrões de corte, de acordo com combinações de bobinas, e seus resíduos

Padrão de corte	Combinação dos tipos de bobinas resultantes	Resíduo gerado (largura(m))
X_1	B_1+B_1	1,2
X_2	$B_1+B_2+B_2$	0
X_3	$B_1+B_2+B_3$	0,4
X_4	$B_1+B_3+B_3$	0,8
X_5	$B_2+B_2+B_2$	0,6
X_6	$B_2+B_2+B_3$	1
X_7	$B_2+B_3+B_3$	1,2
X_8	$B_3+B_3+B_3+B_3$	0,4

De acordo com estas informações, evidencia-se que seria preferível utilizar apenas os padrões X_2 , X_3 e X_8 , uma vez que estes, juntos, abrangem todos tipos de bobinas ofertados e são os padrões que geram as menores quantidades de resíduos. Contudo, é necessário que sejam atendidas todas as restrições do sistema em relação à demanda e estoque máximo.

Na sub-seção seguinte são traçadas algumas considerações à respeito da aplicação do modelo no alcance de uma solução factível para o problema de estudo.

4.3. Considerações a respeito do estabelecimento do problema

Como descrito na seção 1, objetiva-se formular um modelo de programação linear de modo a buscar a redução da porção de papel a descartar, em um mês de operação de uma unidade industrial da empresa Klabin, atendendo às restrições de produção impostas.

De qualquer modo deve-se salientar que as características aqui expostas representam uma simplificação das características reais do processo em questão uma vez que os volumes considerados de demanda, estoques, resíduos, tempo de operação da máquina (mesmo que aqui não contabilizados, mas que influenciam no resultado final da produção), fluxo de produtos, etc, podem não ser fidedignas aos dados reais para um período específico.

As possíveis discrepâncias podem ocorrer devido às características peculiares de mercado e situação das instalações. Principalmente o volume de estoques, uma vez que, como já exposto, a unidade não trabalha com produção e venda baseadas em estoques, em prima devido ao enorme fluxo de entrada e saída de matéria-prima e produto acabado.

5. Exposição do modelo matemático proposto e solução do problema

A seguir é apresentada a solução ótima encontrada para o problema considerado, utilizando a ferramenta Solver, disponível para uso na planilha Excel do pacote Office do sistema operacional Windows (*Microsoft Corporation*®).

São estudados três cenários em busca da solução do problema:

- Cenário 1: Modelo com as restrições de demanda, estoque máximo e Cliente C;
- Cenário 2: Modelo com as restrições de demanda e estoque máximo;
- Cenário 3: Modelo com as restrições de demanda.

5.1. Estabelecimento do modelo de programação linear (PL)

Dadas as características do problema, com auxílio da planilha Excel, definiu-se as inequações necessárias à solução do problema, apresentando os padrões de corte de acordo com as combinações viáveis que não excedessem as dimensões da matriz (jumbo), as equações de demanda e de estoque máximo particulares de cada tipo de bobina obtida como produto final, bem como foi obtida a equação que definia o objetivo do estudo (função objetivo), buscando a minimização dos resíduos gerados pelas atividades de corte, como mostra o Quadro 1.

Quadro 1 - Modelo proposto para a solução do problema de minimização dos resíduos da atividade de corte

		X ₁ (un)	X ₂ (un)	X ₃ (un)	X ₄ (un)	X ₅ (un)	X ₆ (un)	X ₇ (un)	X ₈ (un)	Função Objetivo		
Padrão de corte a praticar (un)		-	-	-	-	-	-	-	-	Minimizar Resíduos (m)		
Resíduos (m)		1,2	0	0,4	0,8	0,6	1,00	1,2	0,4	-		
SUJEITO A										Utilizado (un)	Necessário/ Disponível (un)	
DEMANDA	B ₁ (un)	2	1	1	1	0	0	0	0	-	>=	1.500.000
	B ₂ (un)	0	2	1	0	2	0	1	0	-	>=	750.000
	B ₃ (un)	0	0	1	2	0	1	2	4	-	>=	850.000
ESTOQUE MÁXIMO	B ₁ (un)	2	1	1	1	0	0	0	0	-	<=	1.600.000
	B ₂ (un)	0	2	1	0	2	0	1	0	-	<=	1.000.000
	B ₃ (un)	0	0	1	2	0	1	2	4	-	<=	1.000.000
	MÍN. CLIENTE C (un)	0	0	1	0	0	0	0	0	-	>=	150.000

A região abaixo de “SUJEITO A” apresenta as restrições do modelo. As três primeiras restrições são referentes à produção mínima de cada tipo de bobina (B₁, B₂ e B₃) devido à demanda. As três seguintes (4^a, 5^a e 6^a) representam a produção máxima de cada tipo, levando em conta a produção mínima acrescida do estoque máximo praticável.

A última restrição se dá em função da necessidade do atendimento rápido e pronto do Cliente C, obrigando a unidade a produzir a quantidade de produto demandada pelo referido cliente utilizando o padrão de corte X₃, que apresenta a mesma proporção do pedido.

5.1.1. Cenário 1

Seguindo o modelo de programação apresentado, por meio da ferramenta Solver disponível para uso no Excel obteve-se a solução ótima do problema, exposta na Tabela 5.

Tabela 5 – Quantidade a ser produzida de cada tipo de bobina aplicando-se a solução ótima

		X₁ (un)	X₂ (un)	X₃ (un)	Total (un)
Quantidade do padrão de corte		287.500	75.000	850.000	
	B ₁	575.000	75.000	850.000	1.500.000
Quantidade de bobinas por tipo	B ₂	-	150.000	850.000	1.000.000
	B ₃	-	-	850.000	850.000

Observa-se que dadas as restrições de estoque máximo, demanda e, com atenção especial, a restrição do uso do padrão X₃ para atender o Cliente C, a solução ótima prevê o uso de apenas 3 dos padrões de corte, sendo eles X₁, X₂ e X₃.

Foi obtido, portanto, que a produção de 1.500.000 de B₁, 1.000.000 de B₂ e 850.000 de B₃ é a proporção que minimiza a geração de resíduos, atendendo às restrições de demanda e estoque existentes, resultando em um resíduo total com dimensões de 685.000m de largura por 10.000m de comprimento.

5.1.2. Cenário 2

Pode-se considerar, também, um resultado que leve em conta a exclusão da restrição da necessidade de atendimento da demanda do cliente C com o uso exclusivo do padrão de corte X₃.

Assim tem-se que o modelo encontraria uma solução com uma geração de resíduos idêntica à do Cenário 1. Contudo os padrões de corte utilizados são diferentes. São utilizados, agora, os padrões X₁, X₂ e X₄. Realizando a proporção adequada, de cada padrão com os tipos de bobinas obtidas, tem-se os resultados mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Quantidade a ser produzida de cada tipo de bobina aplicando-se a solução ótima, vide Cenário 3

		X₁ (un)	X₂(un)	X₄(un)	Total (un)
Quantidade do padrão de corte		287.500	500.000	425.000	
	B ₁	575.000	500.000	425.000	1.500.000
Quantidade de bobinas por tipo	B ₂	-	1.000.000	-	1.000.000
	B ₃	-	-	850.000	850.000

A solução que otimiza, neste caso, a geração mínima de resíduos em detrimento das atividades de corte ordena a produção de 1.500.000 de bobinas do tipo B₁, 1.000.000 do tipo B₂ e 850.000 B₃ resultando em um total de resíduos de 685.000m de largura por 10.000m de comprimento.

Observa-se, desta forma que o Cenário 2 gera uma quantidade de resíduos igual à quantidade obtida pela solução ótima no Cenário 1, mostrando que mesmo com parâmetros diferentes que restringem a produção, não sendo imperativo neste caso que se utilize o padrão de corte X₃ para atender à demanda de um determinado cliente, o resultado obtido quanto à geração de resíduos é o mesmo, e mesmo as quantidades de acordo com os tipos de produto final (B₁, B₂ e B₃) não diferem.

5.1.3. Cenário 3

Em um panorama menos restritivo pode-se considerar, a partir do Cenário 2, a

exclusão da política de estoque máximo, onde a solução ótima, neste caso, prevê a utilização de apenas dois dos padrões de corte possíveis, sendo os que resultam em uma menor geração de resíduos e abrangem todos os tipos de bobinas que precisam ser produzidas. Contudo, desta maneira há uma produção excessiva de bobinas do tipo B₂, como evidenciado na solução e mostrado na Tabela 7.

Tabela 7 - Quantidade a ser produzida de cada tipo de bobina aplicando-se a solução ótima, exceto a restrição do cliente C e a política de estoque máximo

		X ₂ (un)	X ₈ (un)	Total (un)
Quantidade do padrão de corte		1.500.000	212.500	
	B ₁	1.500.000	-	1.500.000
Quantidade de bobinas por tipo	B ₂	3.000.000	-	3.000.000
	B ₃	-	850.000	850.000

Este modelo, pouco restrito, faz com que a produção de bobinas tipo B₂, atendendo apenas às restrições de demanda da unidade, gere uma enorme quantidade de estoque, o que pode acarretar em alto custo para permanência dos produtos nas instalações. Por outro lado, pode-se considerar uma produção menor, ou mesmo nula, deste tipo de produto em períodos próximos. Contudo esta operação se mostraria como uma nova restrição, merecendo um estudo mais específico de sua influência.

Em linhas gerais, apesar desta produção excessiva, o objetivo do modelo foi alcançado satisfatoriamente, obtendo um resíduo total com dimensões de 85.000m de largura por 10.000m de comprimento, considerando o comprimento da matriz utilizada para os cortes.

6. Considerações finais e sugestões para estudos futuros

O planejamento do modo de realizar a produção é fator diferencial no andamento de uma empresa, seja referente à política financeira, ambiental ou de qualquer âmbito.

O objetivo inicial, deste artigo, de minimizar os resíduos resultantes das atividades de corte visando a adequação de um produto primário aos padrões de comercialização foi alcançado com êxito. Conclui-se que uma sobra superficial final de dimensões 685.000m por 10.000m é a solução ótima do problema de corte unidimensional tratado neste estudo de caso, de forma a atender a todas as restrições inicialmente estabelecidas.

Considerando-se outros cenários de avaliação, menos restritivos, pode-se obter uma sobra superficial de 85.000m por 10.000m, contudo de forma a atender apenas a demanda de produtos acabados da unidade de forma mais flexível.

A política de ação da empresa em estudo impera que estas sobras sejam reaproveitadas, sendo armazenadas e voltando ao processo de produção para fazer parte da camada intermediária do papel. Todavia, não é discutida e devidamente exposta tal prática neste trabalho, uma vez que o objetivo do estudo possui outro foco.

Em estudo futuros sugere-se levar em consideração a integração da etapa de corte com todas as outras etapas do processo de produção, uma vez que da interação entre todas as etapas pode ser possível obter uma solução que melhor se adéque ao perfil da empresa e às características da produção de uma forma mais abrangente e que seja menos onerosa.

A expansão deste artigo em trabalhos próximos prevê a solução deste problema por meio da utilização de diferentes ferramentas tais quais os *softwares* GAMS e LINGO, utilizados para modelagem e solução de problemas de Pesquisa Operacional, de forma a

melhor explorar as características do problema e as possibilidades destas ferramentas.

Referências bibliográficas

BRUGLIERI, Maurizio; MAFFIOLI, Francesco; EHRGOTT, Matthias. Cardinality constrained cut problems: complexity and algorithms. *Discrete Applied Mathematics*, v. 137, p. 311-341. 2004.

CHENG, Chen-Yang; PRABHU, Vittal. Evaluation models for service oriented process in spare parts management. *Journal of Intelligent Manufacturing*, n. 23, p. 1403-1417. 2012.

CHERRY, Adriana Cristina; ALEM JUNIOR, Douglas Jose; SILVA, Ivan Nunes. Inferência *fuzzy* para o problema de corte de estoque com sobras aproveitáveis de material. *Pesquisa Operacional*, v. 31, n. 1, p. 173-194. 2011.

CONGEDO, Pietro Marco; WITTEVEEN, Jeroen; IACCARINO, Gianluca. A simplex-based numerical framework for simple and efficient robust design optimization. *Computational Optimization and Applications*, v. 56, p. 231-251. 2013.

FIGUEIRA, Gonçalo; SANTOS, Maristela Oliveira; ALMADA-LOBO, Bernardo. A hybrid VNS approach for the short-term productions planning and scheduling: A case study in the pulp and paper industry. *Computers and Operations Research*, v. 40, p. 1804-1818. 2013.

GILMORE, P.C.; GOMORY, R.E. A linear programming approach to the cutting stock problem. *Operations Research*, v. 9, n.6, p. 848-859. 1961.

GILMORE, P.C.; GOMORY, R.E. A linear programming approach to the cutting stock problem – Part II. *Operations Research*, v. 11, n.6, p. 863-888. 1963.

KLABIN, _____. **Formulário de Referência** – 2013 – Klabin S.A.. Acesso em 27/08/2013. Disponível em:
<http://klabin.foinvest.com.br/ptb/2057/1369425128_235494570_html/1369425128_235494570.html>.

KAMIMURA, Quésia Postigo. PAES, Evandro da Silva; OLIVEIRA, Edson Aparecida Araujo Querido. Inovação Tecnológica: início de novos negócios em TI – estudo de caso numa empresa de bens de capital do Vale do Paraíba. *Latin American Journal of Business Management*, v. 3, n. 2, p. 174-187, jul-dez/2012, Taubaté, SP, Brasil.

LUZ, João Augusto Ferreira; OLIVEIRA, Edson Aparecida de Araújo Querido; SANTOS, Vilma da Silva; QUINTAIROS, Paulo Cesar Ribeiro. Inovação Tecnológica de produtos e processos na indústria automobilística. *Latin American Journal of Business Management*, v. 3, n. 2, p. 210-225, jul/dez2012, Taubaté, SP, Brasil.

POLDI, Kelly Cristina; ARENALES, Marcos Nereu. Heurística para o problema de corte de estoque unidimensional inteiro. *Pesquisa Operacional*, v. 26, n. 3, p. 473, 492. 2006.

SILVERA JÚNIOR, José Aélío; PINHEIRO, Plácido Rogério; THOMAZ, Antonio Clécio Fontanelle. Otimização das perdas em cortes guilhotinados para bobinas de aço na indústria metalmeccânica. In: *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, 36., O impacto da Pesquisa Operacional nas novas tendências multidisciplinares. São João Del Rei, Brasil. Anais. Minas Gerais, Brasil. 2004.

SULIMAN, S. M. A. A sequential heuristic procedure for the two-dimensional cutting-stock problem. *International Journal of Production Economics*, v. 99, p. 177-185. 2006.

YANASSE, Horacio Hideki; LAMOSIA, Maria José Pinto. An integrated cutting stock and sequencing problem. *European Journal of Operational Research*, v. 183, p. 1353-1370. 2007.