

Alocação Ótima de Bobinas no Corrugador - Um Problema das Indústrias de Embalagens de Papelão

Marcelo Ferreira, Victor Claudio Bento Camargo

Universidade Federal do Triângulo Mineiro
Av. Dr. Randolpho Borges Júnior, 1400, Univerdecidade, Uberaba, MG
marcelo.ferreira@matematica.uftm.edu.br,
victor.camargo@producao.uftm.edu.br

Silvio Alexandre de Araujo

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Rua Cristóvão Colombo, 2265, Jardim Nazareth, São José do Rio Preto, SP
saraujo@ibilce.unesp.br

RESUMO

Entre os vários tipos de embalagens utilizadas no mercado, as mais comuns são as de papelão ondulado, por serem baratas e recicláveis. Estas embalagens são produzidas a partir de chapas, fabricadas por uma máquina chamada corrugador. Nesta máquina, bobinas de papel são fixadas aos pares, em estruturas denominadas porta-bobinas, sendo que cada camada da chapa é alimentada por um destes conjuntos. Quando é necessária a fabricação de uma chapa com gramatura diferente, algo frequente no processo produtivo, as sobras em cada porta-bobina podem ser aproveitáveis ou não. Minimizar a quantidade de sobras não aproveitáveis é algo desejável, pois implica em redução de custos, porém, outros objetivos como minimizar os consumos parciais são relevantes, pois implica em ganho de produtividade. Além disso, várias restrições devem ser consideradas, como por exemplo, a não interrupção do funcionamento do corrugador. Neste trabalho, mostraremos um modelo matemático para este problema e alguns resultados computacionais.

PALAVRAS CHAVE. corrugador, sobras não aproveitáveis, programação inteira mista

Tópico: Otimização Combinatória

ABSTRACT

Among the various types of packaging used in the market, the most common are corrugated boxes, being cheap and recyclable. These packages are produced from sheet manufactured by a so-called corrugator machine. In this machine, paper reels are fixed in pairs on mill roll stand, each layer of the sheet is fed by one of these sets. When manufacturing a sheet with different weight is needed, something frequently in the production process, the leftovers on each mill roll stand may be usable or not. Minimize the amount of not usable leftovers is desirable, because it implies lower costs, but other goals, such as minimizing the partial consumptions are relevant, as it implies productivity gains. Additionally, several constraints must be considered, such as not to interrupt the operation of the corrugator. In this work, we show a model for this problem and some computational results.

KEYWORDS. corrugator, not usable leftovers, mixed integer programming

Topic: Combinatorial Optimization

1. Introdução

De acordo com [Herrmann, 2004] e [Rodammer e White Jr, 1988], a programação da produção é toda manipulação inteligente de informações que leve a uma tomada de decisão acertada, em relação a atribuição eficiente de tarefas, de acordo com os recursos disponíveis ao longo do tempo de produção, satisfazendo as restrições e minimizando os custos. Desde a década de 60, inúmeros trabalhos, como por exemplo [Kantorovich, 1960], [Melnyk et al., 1986], [Cloud, 2000] e [Crawford e Wiers, 2001] têm abordado o tema, porém, são mais escassos aqueles que investigam aspectos mais específicos dos processos produtivos das indústrias de embalagens de papelão.

Ao investigar este tipo de indústria, percebemos que a maioria dos trabalhos publicados tratam de problemas de corte e de sequenciamento, mais especificamente, da geração de um sequenciamento eficiente de padrões de corte para serem utilizados no corrugador, com o intuito por exemplo, de minimizar a perda lateral (o *trim loss problem*), que surge da diferença entre os padrões de corte e a largura das bobinas utilizadas. Esse problema tem grande relevância quando se quer minimizar perdas no processo produtivo, mas outros fatores também são importantes, como por exemplo: datas de entrega, utilização da largura do corrugador (que influencia diretamente sua produtividade), a divisão das ordens e as trocas na largura da bobinas.

As três primeiras heurísticas de programação do corrugador, visando redução de perdas laterais podem ser obtidas em [Pegels, 1967]. Em [Haessler e Talbot, 1983], um método para resolver o problema da perda lateral é apresentado e em [Haessler, 1985] encontra-se uma classificação com as principais áreas de decisão identificadas nos processos de planejamento da produção em indústrias de embalagens de papelão, bem como as principais interações entre elas.

A descrição de um sistema que visa gerar planos de corte com perda mínima pode ser obtida em [Lins, 1988], e em [Lins, 1989], pressupõe-se resolvido o problema de corte e é abordado o problema do sequenciamento das tarefas, de modo a minimizar as ordens iniciadas e não terminadas. Esse aspecto é importante, pois se negligenciado, pode não haver espaço físico disponível para manter as ordens produzidas parcialmente. A heurística de sequenciamento apresentada se mostrou altamente eficiente, uma vez que em 92% dos casos testados, obteve-se no máximo duas tarefas pendentes. Uma generalização desse trabalho pode se encontrada em [Becceneri et al., 2004].

Um modelo que integra o problema da perda lateral, o problema da capacidade de armazenamento em estágios intermediários e o problema da maximização da utilização das máquinas de conversão é apresentado em [Savsar e Cogun, 1994], sendo o primeiro a fazer tal integração. O trabalho foi estendido em [Bolat, 2000], onde algumas simplificações foram removidas, obtendo-se um modelo mais realista. O problema da perda lateral é revisitado em [Rodríguez e Vecchietti, 2007], [Velasquez et al., 2007] e [Rodríguez, 2009]. Este último, traz uma combinação de um algoritmo guloso com um algoritmo genético, técnica usada também em [Jaramillo et al., 2009].

O primeiro trabalho a citar o problema da minimização do número de paradas do corrugador é devido a [Matsumoto et al., 2009]. Deseja-se alcançar também outros objetivos como a minimização do comprimento total de rolos de papel utilizados e a minimização da perda lateral. A abordagem é feita em duas fases: Na primeira, cada ordem é designada para uma determinada largura padrão, e na segunda, faz-se o sequenciamento destas ordens para cada largura padrão, de forma que elas sejam continuamente produzidas no corrugador.

Os três artigos de Chantrapornchai e Sathapanawat citados a seguir, são os únicos, segundo nosso levantamento, que abordaram o mesmo problema investigado neste trabalho, porém com muitas simplificações. Em [Chantrapornchai e Sathapanawat, 2010], é apresentada uma heurística de sequenciamento das bobinas que alimentam o corrugador, visando minimizar a obtenção de sobras não aproveitáveis (considerados perdas), balancear o número de rolos utilizados em cada porta-bobinas e minimizar o número de tocos (bobina utilizada parcialmente). Em [Chantrapornchai e Sathapanawat, 2011], a heurística apresentada no trabalho anterior é aperfeiçoada e utilizada no desenvolvimento de um software. Em [Chantrapornchai e Sathapanawat, 2012], é apresentado

um estudo de caso, onde o software é implantado e testado com exemplos reais. Nenhum modelo foi apresentado nestes trabalhos.

Este artigo está organizado da seguinte forma: na Seção 2 é feita a descrição do processo produtivo em uma indústria de embalagens de papelão e a descrição do problema a ser investigado, na Seção 3 é apresentado um modelo matemático e uma heurística de sequenciamento das bobinas, na Seção 4 alguns resultados computacionais iniciais são apresentados e na Seção 5 são incluídas as conclusões e trabalhos futuros.

2. Processo Produtivo

O processo produtivo de fabricação das embalagens de papelão ondulado pode ser dividido em duas etapas: 1ª etapa - Produção das bobinas de papel, utilizadas na fabricação das chapas de papelão e 2ª etapa - Produção das embalagens de papelão ondulado. Sem perda de generalidade, vamos considerar que serão produzidas chapas de papelão de parede simples, que é formado por três elementos: a capa exterior, o miolo e a capa interior. Conforme Figura 1 abaixo:



Fonte: <http://www.abre.org.br>

Detalhamos apenas a 2ª etapa, que engloba o problema a ser investigado.

O papelão ondulado é uma estrutura formada por um ou mais elementos ondulados (miolo), fixados a um ou mais elementos planos (capas), por meio de adesivo aplicado no topo das ondas. As chapas de papelão são fabricadas no equipamento denominado corrugador (Figura 2), máquina composta de vários estágios. O processo inicia com a colocação das bobinas de papel no corrugador. Neste equipamento, também é utilizado vapor e cola.

Figura 2: Corrugador



Fonte: <http://www.czbljx.com/products/101.html>

- **Emissão do boletim pelo PCP:** O processo de fabricação de uma caixa de papelão começa com a elaboração do boletim pelo PCP (Planejamento e Controle de Produção). No processo, buscam-se as melhores combinações dos pedidos, levando em conta, por exemplo, a minimização das perdas laterais.

- **Preparação do corrugador:** Em seguida, o boletim é enviado para o corrugador, onde a equipe de produção deverá abastecê-lo, de acordo com o tipo de chapa que será produzida. Para

cada um dos elementos do papelão, as bobinas são instaladas nos portas-bobinas sempre aos pares, em pinos paralelos, mantendo uma em estado de espera no corrugador.

- **Papel miolo e capa interna:** Na primeira etapa da onduladeira o papel passa nos cilindros corrugadores, formando o papel ondulado (papel miolo), no qual a capa interna é colada. A capa e o miolo são pressionados entre os rolos para completar a colagem, obtendo-se o papelão ondulado de face simples.

- **Capa externa:** Após a fabricação do papelão ondulado de face simples, este é levado ao outro estágio do corrugador, onde através de calor, pressão e cola, a capa externa irá aderir ao topo das ondas do papelão de face simples, formando então o papelão de parede simples.

- **Secagem:** A chapa de parede simples passa então por uma mesa de resfriamento, onde a adesão ideal das capas com o miolo é atingida.

- **Corte:** Após a secagem, as chapas passam pelos equipamentos denominados vincadeiras, recebendo os vincos de dobra longitudinais. Na sequência, são feitos os cortes transversais, pelas guilhotinas ou facões, obtendo retângulos com as especificações de cada cliente.

- **Impressão e recorte:** Após o processo de corte, as chapas são colocadas em paletes e distribuídas para as máquinas flexográficas, onde são realizadas as operações de impressão e recorte.

- **Formação dos fardos:** Após a impressão e corte, as embalagens produzidas são amarradas em fardos e seguem para a expedição.

- **Expedição:** Na expedição, o material é conferido e enviado para os clientes.

2.1. Descrição do Problema de Alocação de Bobinas

O problema foi identificado em uma visita técnica realizada em uma indústria de embalagens de papelão. As definições estão de acordo com dados colhidos em entrevistas com operadores do corrugador, encarregados de produção e encarregados de estoque.

O processo começa com o PCP enviando o boletim para o corrugador, onde a equipe de produção irá abastecê-lo com as bobinas de papel, de acordo com o tipo de chapa que será produzida. As bobinas são instaladas nos portas-bobinas sempre aos pares, mantendo uma em estado de espera para ser utilizada quando sua bobina pareada (que esta no mesmo porta-bobina) for totalmente consumida ou precisar ser substituída devido uma estratégia de produção. O papel proveniente das bobinas instaladas em cada conjunto de porta-bobinas alimentam uma das camadas da chapa de papelão, sendo necessário três conjuntos de porta-bobinas para a fabricação de uma chapa de papelão de parede simples e cinco conjuntos no caso do papelão de parede dupla.

A reposição de bobinas é bastante frequente, motivada por um dos seguintes fatores: as bobinas instaladas inicialmente não são suficientes para atender ao boletim; uma bobina é danificada durante o processo produtivo, ou ainda, porque o boletim subsequente é de gramatura diferente. Neste último caso, ocorre geralmente a sobra de uma bobina, em cada conjunto de porta-bobinas e tal sobra pode ser aproveitável ou não. Caso seja aproveitável, esta volta ao estoque e é utilizada em um novo boletim, de mesma gramatura, caso não seja aproveitável, é enviada para a reciclagem. Uma sobra não aproveitável, por definição, é toda bobina com comprimento menor que 100 m. A geração de bobinas não aproveitáveis durante o processo produtivo é um problema relevante, pois pode implicar na reciclagem de até 50 toneladas de papel por mês, segundo dados colhidos na empresa visitada. Portanto, minimizar a quantidade de sobras não aproveitáveis geradas é altamente desejável.

As bobinas podem ser consumidas parcialmente ou integralmente, mas como os consumos parciais são difíceis de administrar na prática, devem ser evitados ao máximo. O ideal é ter-se no máximo um consumo parcial em cada porta-bobina, ou seja, três consumos parciais para o papelão de parede simples e cinco para o de parede dupla. Além disso, quando uma bobina for consumida parcialmente, deve existir um consumo parcial mínimo, que justifique a troca desta bobina. Estabeleceremos que se formos realizar um consumo parcial, este será maior ou igual 450 m.

Espera-se também que o funcionamento do corrugador não seja interrompido, uma vez que isso representa perda na produtividade. Essa restrição leva a uma análise não trivial de quais bobinas serão utilizadas, pois para que uma bobina seja substituída, sua bobina pareada deve ter, por definição, pelo menos 500 m de comprimento. Dentro desta restrição, ou seja, para que haja tempo hábil para a substituição de uma bobina, surge também um problema de sequenciamento, em que devemos decidir a ordem em que as bobinas deverão ser alocadas em cada pino.

Finalmente, deseja-se que o boletim seja atendido com a menor quantidade de bobinas possível, desde que todas as restrições e objetivos anteriores sejam atendidos. Atualmente, a escolha das bobinas é feita baseada apenas na experiência e no bom senso do operador da empilhadeira e do encarregado da produção. As soluções implementadas, geram sobras não aproveitáveis, muitas reposições e muitos consumos parciais.

3. Modelagem Matemática e Heurística de Sequenciamento

Nesta seção mostraremos um modelo para o problema, tendo os seguintes objetivos: a minimização da quantidade total de bobinas utilizadas, a minimização da quantidade de consumos parciais e a minimização da quantidade de sobras não aproveitáveis geradas durante o processo produtivo.

Parâmetros:

- w_i : Comprimento da bobina i , com $i = 1 \dots m$.
- c_j : Comprimento da camada j , com $j = 1 \dots n$.
- p : Comprimento mínimo para que uma bobina suporte a troca de sua bobina pareada.
- s : Comprimento mínimo para que uma bobina seja considerada aproveitável.
- v : Comprimento mínimo que deve ser consumido de uma bobina, em caso de consumo parcial.
- α, β, γ : Penalizações relacionadas ao número total de bobinas, ao número total de consumos parciais e ao número de total de sobras não aproveitáveis, respectivamente.
- M : Neste caso vale 11000 m (Comprimento máximo das bobinas utilizadas).

Variáveis:

- y_{ij} : Variável binária. Vale 1 se a bobina i é alocada na camada j e vale 0 caso contrário.
- x_{ij} : Variável real tal que $0 \leq x_{ij} \leq w_i$. Quantidade da bobina i consumida na camada j .
- z_{ij} : Variável inteira tal que $z_{ij} \geq 0$. Calcula o número de reposições suportadas pela bobina i usada na camada j .
- t_{ij} : Variável binária. Define o tipo de consumo, se $t_{ij} = 0$, teremos consumo integral e se $t_{ij} = 1$, teremos consumo parcial.
- l_{ij} : Variável real tal que $l_{ij} \geq 0$. Define o quanto da bobina i utilizada na camada j foi consumido abaixo do limite s .
- g_{ij} : Variável real tal que $g_{ij} \geq 0$. Define o quanto da bobina i utilizada na camada j foi consumido abaixo do limite s em caso de consumo parcial. Surge da linearização de uma das restrições do modelo.

Função Objetivo:

$$\min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\alpha \cdot y_{ij} + \beta \cdot t_{ij} + \gamma \cdot g_{ij}) \quad (1)$$

Restrições:

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = c_j ; j = 1, \dots, n. \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n y_{ij} \leq 1 ; i = 1, \dots, m. \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^m (y_{ij} - z_{ij}) \leq 2 ; j = 1, \dots, n. \quad (4)$$

$$z_{ij} \cdot p - x_{ij} \leq 0 ; i = 1 \dots m, j = 1 \dots n. \quad (5)$$

$$(z_{ij} + 1) \cdot p - (x_{ij} + 1) \geq 0 ; i = 1 \dots m, j = 1 \dots n. \quad (6)$$

$$w_i \cdot y_{ij} - x_{ij} \geq s \cdot t_{ij} - g_{ij} ; i = 1 \dots m, j = 1 \dots n. \quad (7)$$

$$g_{ij} \leq M \cdot t_{ij} ; i = 1 \dots m, j = 1 \dots n. \quad (8)$$

$$g_{ij} \leq l_{ij} ; i = 1 \dots m, j = 1 \dots n. \quad (9)$$

$$g_{ij} \geq l_{ij} - M \cdot (1 - t_{ij}) ; i = 1 \dots m, j = 1 \dots n. \quad (10)$$

$$w_i \cdot y_{ij} - x_{ij} \leq M \cdot t_{ij} ; i = 1 \dots m, j = 1 \dots n. \quad (11)$$

$$x_{ij} \geq v \cdot t_{ij}, i = 1 \dots m, j = 1 \dots n. \quad (12)$$

$$x_{ij} \geq s \cdot y_{ij}, i = 1 \dots m, j = 1 \dots n. \quad (13)$$

$$x_{ij} \leq w_i \cdot y_{ij} ; i = 1 \dots m, j = 1 \dots n. \quad (14)$$

$$y_{ij}, t_{ij} \in \{0, 1\}, z_{ij} \in \mathbb{Z}, x_{ij}, l_{ij}, g_{ij} \in \mathbb{R}$$

A função objetivo (1) tenta minimizar a quantidade total de bobinas utilizadas, minimizar a quantidade de consumo parciais e minimizar a quantidade de sobras não aproveitáveis geradas durante o processo produtivo. A restrição (2) garante que o boletim será atendido com exatidão. A restrição (3) garante que cada bobina é usada no máximo uma vez. A restrição (4) garante que o funcionamento da onduladeira não será interrompido, uma vez que a diferença entre o número total de bobinas e o número de substituições suportadas pela solução é no máximo 2, sendo que este 2 indica as duas primeiras bobinas utilizadas em cada porta-bobinas. As restrições (5) e (6) representam uma linearização de $\lfloor x_{ij}/p \rfloor$, que fornece o número de reposições suportadas por cada

bobina em z_{ij} . As restrições (7), (8), (9), (10) e (11) vem da linearização da seguinte restrição: $w_i \cdot y_{ij} - x_{ij} \geq (s - l_{ij}) \cdot t_{ij}$, que controla a geração de sobras não aproveitáveis e consumos parciais ou integrais. Nessa restrição, quando há consumo integral da bobina ($t_{ij} = 0$), proibimos a sobra pois $w_i \cdot y_{ij} \geq x_{ij}$ e em (11), $w_i \cdot y_{ij} \leq x_{ij}$. Se $t_{ij} = 1$, teremos $w_i \cdot y_{ij} - x_{ij} \geq s - l_{ij}$, ou seja, temos um consumo parcial e as sobras são $\geq s - l_{ij}$. Como queremos reduzir sobras não aproveitáveis, buscamos minimizar l_{ij} , que indica a quantidade consumida abaixo do limite s . A variável $g_{ij} = l_{ij} \cdot t_{ij}$ vem do processo de linearização. A restrição (12) garante que um consumo parcial não será inferior a v . A restrição (13) garante que sobras não aproveitáveis não são utilizadas. A restrição (14) garante que o consumo máximo de uma bobina é limitado pelo seu comprimento.

3.1. Heurística de Sequenciamento

A resolução do modelo fornece o quanto será consumido de cada bobina e em quais porta-bobinas serão alocadas, mas não temos a definição da sequencia de alocação. Para obtê-la utilizaremos a seguinte heurística de sequenciamento nos pinos, na qual consumos parciais ou integrais serão tratados da mesma forma.

Cada conjunto de porta-bobinas possui dois pinos que aqui denotaremos por pino 1 e pino 2. O pino onde a bobina estiver sendo consumida será denotado por pino ativo e o outro onde a bobina estiver em espera, inativo.

Se para um determinado conjunto de porta-bobinas tivermos que alocar apenas duas bobinas, basta colocá-las nos pinos 1 e 2 e o problema estará resolvido.

Quando a quantidade de bobinas selecionadas para um determinado porta-bobinas for maior que 3, utilize o procedimento abaixo:

1. Ordene as n bobinas selecionadas para um conjunto de porta-bobinas em ordem decrescente de comprimento, obtendo o conjunto: $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$
2. Calcule o número de reposições suportadas pela bobina a_1 , basta fazer $\lfloor x_{a_1}/p \rfloor$, denote este valor por k_1 .
3. No pino 1 deste conjunto de porta-bobinas será alocada a bobina a_1 e no pino 2 as bobinas de posições: $n, n - 1, \dots, n - (k_1 - 1)$, nesta ordem. O pino 2 será o primeiro pino ativo, sendo que a bobina de posição n é consumida. Em seguida, o pino 1 se torna ativo, enquanto a bobina de posição $n - 1$ é instalada no pino 2. Então, o pino 1 torna-se inativo, o pino 2 torna-se ativo e a bobina de posição $n - 1$ é consumida. Deve-se repetir este procedimento até que a bobina de posição $n - (k_1 - 1)$ seja consumida. Então deve-se consumir o restante de papel da bobina a_1 . Se $n - (k_1 - 1) = 2$, pare. Todas as bobinas foram consumidas. Caso contrário, vá para a 4ª etapa.
4. Repita a 2ª e 3ª etapa para a bobina a_2 . Se as bobinas se esgotarem, pare. Caso contrário, repita a 2ª e 3ª etapa para a bobina a_3 e assim por diante.

Obs.: O número $\lfloor x_{a_1}/p \rfloor$ indica o maior inteiro menor que x_{a_1}/p .

4. Resultados Computacionais Iniciais

Para os testes utilizamos o AMPL como linguagem de modelagem e o solver CPLEX versão 12.1.0. O computador utilizado possui processador Intel Core i5-2410M, CPU de 2.3 GHz e memória de 4 GB. O limite de tempo de processamento foi estabelecido em 60 segundos. Assumimos que todas as camadas do papelão utilizam papel de mesma gramatura.

Foram utilizados para os testes três níveis de estoques de bobinas: um pequeno com 50 bobinas denotado por Q_1 , um médio com 100 bobinas denotado por Q_2 e um grande com 150 bobinas denotado por Q_3 .

Os boletins são identificados pela letra B , e seus comprimentos são os seguintes: $B1 = 9311$ m, $B2 = 19977$ m, $B3 = 48124$ m, $B4 = 6678$ m, $B5 = 12879$ e $B6 = 28217$ m, ou seja, temos dois boletins pequenos, dois médios e dois grandes. Para cada estoque, testes foram realizados com um boletim de parede simples e um de parede dupla, sendo que os boletins de parede simples são $B1$, $B2$ e $B3$ e os de parede dupla são $B4$, $B5$ e $B6$ e além disso, os boletins $B1$ e $B4$ utilizam o estoque Q_1 , os boletins $B2$ e $B5$ utilizam o estoque Q_2 e os boletins $B3$ e $B6$ utilizam o estoque Q_3 .

Na Tabela 1 abaixo, cada boletim utilizou os seguintes parâmetros: $\alpha = 1$ e $\beta = \gamma = 0$, denotado por T_1 depois $\beta = 1$ e $\alpha = \gamma = 0$ (T_2) e finalmente $\gamma = 1$ e $\alpha = \beta = 0$ (T_3). Na Tabela 2, utilizamos um segundo conjunto de parâmetros: $\alpha = 0.99$ e $\beta = \gamma = 0.005$ (T_4), depois $\beta = 0.99$ e $\alpha = \gamma = 0.005$ (T_5) e finalmente $\gamma = 0.99$ e $\alpha = \beta = 0.005$ (T_6), sendo que em ambos $\alpha + \beta + \gamma = 1$. No segundo conjunto de parâmetros introduzimos uma perturbação mínima em cada parâmetro.

Tabela 1: Testes Para o Primeiro Conjunto de Parâmetros

Boletins	Parâmetros	Total Bobinas	Total de Cons. Parciais	Total Sobras Não Aprov.	Tempo	GAP
$B1$	T_1	22	3	3	0.230	0.000%
	T_2	31	0	0	9.860	0.000%
	T_3	41	7	0	0.020	0.000%
$B2$	T_1	61	6	6	0.060	0.000%
	T_2	73	0	0	0.670	0.000%
	T_3	85	8	0	0.080	0.000%
$B3$	T_1	131	4	4	0.720	0.000%
	T_2	134	1	1	29.31	0.000%
	T_3	143	12	0	0.200	0.000%
$B4$	T_1	33	7	7	0.560	0.000%
	T_2	38	0	0	37.61	0.000%
	T_3	47	10	0	0.110	0.000%
$B5$	T_1	76	4	4	60.00	1.370%
	T_2	84	0	0	42.26	0.000%
	T_3	89	12	0	0.230	0.000%
$B6$	T_1	128	30	30	1.400	0.000%
	T_2	139	3	3	60.00	66.67%
	T_3	143	18	0	0.910	0.000%

Tabela 2: Testes Para o Segundo Conjunto de Parâmetros

Boletins	Parâmetros	Total Bobinas	Total Cons. Parciais	Total Sobras Não Aprov.	Tempo	GAP
$B1$	T_4	22	1	1	60.00	1.770%
	T_5	23	0	0	60.00	4.520%
	T_6	23	0	0	60.00	4.570%
$B2$	T_4	61	0	1	60.00	0.400%
	T_5	63	0	0	60.00	3.170%
	T_6	61	0	0	29.27	0.000%
$B3$	T_4	131	1	0	21.92	0.000%
	T_5	131	1	0	13.32	0.000%
	T_6	131	1	0	24.40	0.000%
$B4$	T_4	33	3	3	60.00	2.440%
	T_5	36	1	0	60.00	85.90%
	T_6	35	3	0	60.00	13.16%
$B5$	T_4	76	2	1	60.00	1.380%
	T_5	77	0	0	60.00	2.600%
	T_6	77	2	0	60.00	5.110%
$B6$	T_4	129	3	0	60.00	1.080%
	T_5	130	3	0	60.00	55.03%
	T_6	129	2	0	60.00	1.820%

A partir da Tabela 1 podemos estabelecer valores ótimos para cada um dos elementos da função objetivo, obtendo a Tabela 3 abaixo.

Tabela 3: Melhores Soluções Possíveis - Primeiro Conjunto de Parâmetros

Boletim	Total Bobinas	Total de Consumos Parciais	Total de Sobras Não Aproveitáveis
<i>B1</i>	22	0	0
<i>B2</i>	61	0	0
<i>B3</i>	131	1	0
<i>B4</i>	33	0	0
<i>B5</i>	76	0	0
<i>B6</i>	128	1	0
Total	451	2	0

Destacamos o boletim *B5* e o *B6* com dois valores para o GAP diferentes de zero. Como estamos interessados em obter um ótimo, foi feito um processamento em separado de 3600 s para *B5*, utilizando os parâmetros $\alpha = 1$ e $\beta = \gamma = 0$ e em relação ao número total de bobinas a solução manteve-se em 76, por isso foi usada acima como boa aproximação. Para *B6*, utilizando os parâmetros $\beta = 1$ e $\alpha = \gamma = 0$ também foi feito um processamento a parte, sendo que o ótimo foi atingido com 75 s de processamento e vale 1, em relação ao número total de consumos parciais.

Para determinarmos a melhor escolha para o segundo conjunto de parâmetros, calcularemos os totais para cada elemento da função objetivo, a partir da Tabela 2. Os resultados estão na Tabela 4.

Tabela 4: Totais Para Cada Elemento da Função Objetivo - Segundo Conjunto de Parâmetros

Parâmetros	Total de Bobinas	Total de Consumos Parciais	Total de Sobras Não Aproveitáveis
T_4	452	10	6
T_5	460	5	0
T_6	456	8	0

Ao analisarmos essa tabela, concluímos que duas escolhas de parâmetros se mostraram eficientes. Utilizando o conjunto $\beta = 0.99$ e $\alpha = \gamma = 0.005$, utilizamos um total de 9 bobinas a mais que o valor ótimo, que vale 451 (Tabela 3), apenas 3 consumos parciais a mais que o valor ótimo, que vale 2 (Tabela 3) e não geramos nenhuma sobra não aproveitável. O conjunto $\gamma = 0.99$ e $\alpha = \beta = 0.005$ também apresenta bons resultados, uma vez que usaremos um total de 5 bobinas a mais que o valor ótimo, teremos 6 consumos parciais a mais que o valor ótimo e não geraremos nenhuma sobra não aproveitável.

Como os consumos parciais são mais difíceis de administrar, uma vez que o corrugador precisa ser reprogramado para este tipo de consumo e são também mais caros, uma vez que a bobina deve ser levada ao corrugador e devolvida ao estoque após o uso, o conjunto $\beta = 0.99$ e $\alpha = \gamma = 0.005$ é a melhor escolha em termos práticos.

Como exemplo da heurística de sequenciamento, implementada na linguagem C, utilizaremos o boletim *B1* com o conjunto de parâmetros T_3 e sequenciaremos as bobinas que serão utilizadas no miolo do papelão.

As bobinas selecionadas pertencem a Q_1 e temos os seguintes valores que foram consumidos em metros: 2051 (da bobina 38 que mede 2452) e 1499 (da bobina 91 que mede 2299) e os seguintes consumos integrais: 320, 341, 390, 897, 600, 830, 189, 213, 233, 285, 1700, 379 e 1107. O sequenciamento obtido é o seguinte:

Tabela 5: Exemplo de Sequenciamento de um Conjunto de Bobinas

Passo 1	Passo 2	Passo 3
Pino 1: Sem bobina Pino 2: Sem bobina	Pino 1: 2051 (Em espera) Pino 2: 189 (Sendo consumida)	Pino 1: 2051 (Sendo consumida) Pino 2: 0 (Será substituída).
Passo 4	Passo 5	Passo 6
Pino 1: 1551 (Em espera) Pino 2: 213 (Sendo consumida)	Pino 1: 1551 (Sendo consumida) Pino 2: 0 (Será substituída).	Pino 1: 1051 (Em espera) Pino 2: 233 (Sendo consumida)

Passo 7	Passo 8	Passo 9
Pino 1:1051 (Sendo consumida) Pino 2: 0 (Será substituída)	Pino 1: 551 (Em espera) Pino 2: 285 (Sendo consumida)	Pino 1:551 (Sendo consumida) Pino 2: 0 (Será substituída)
Passo 10	Passo 11	Passo 12
Pino 1: 0 (Será substituída) Pino 2: 1700 (Sendo consumida)	Pino 1: 320 (Sendo consumida) Pino 2: 1200 (Em espera)	Pino 1: 0 (Será substituída) Pino 2: 1200 (Sendo consumida)
Passo 13	Passo 14	Passo 15
Pino 1: 341 (Sendo consumida) Pino 2: 700 (Em espera)	Pino 1: 0 (Será substituída) Pino 2: 700 (Sendo consumida)	Pino 1: 1499 (Sendo consumida) Pino 2: 0 (Será substituída)
Passo 16	Passo 17	Passo 18
Pino 1: 999 (Em espera) Pino 2: 379 (Sendo consumida)	Pino 1: 999 (Sendo consumida) Pino 2: 0 (Será substituída)	Pino 1:0 (Será substituída) Pino 2: 1107 (Sendo consumida)
Passo 19	Passo 20	Passo 21
Pino 1: 390 (Sendo consumida) Pino 2: 607 (Em espera)	Pino 1: 0 (Será substituída) Pino 2: 607 (Sendo consumida)	Pino 1: 897 (Sendo consumida) Pino 2: 0 (Será substituída)
Passo 22	Passo 23	Passo 24
Pino 1: 0 (Será substituída) Pino 2: 400 (Sendo consumida)	Pino 1:600 (Sendo consumida) Pino 2: 0 (Será substituída)	Pino 1: 0 (Será substituída) Pino 2: 670 (Sendo consumida)
Passo 25	Passo 26	Passo 27
Pino 1: 830 (Sendo consumida) Pino 2: 0 (Bobina final)	Pino 1: 0 (Bobina final) Pino 2: Sem bobina	Pino 1: Sem bobina Pino 2: Sem bobina

5. Conclusões e Trabalhos Futuros

O modelo se mostrou eficiente em relação aos objetivos propostos. Em 100% dos boletins analisados existe um conjunto de parâmetros para o qual nenhuma sobra não aproveitável foi gerada, o que implica em redução de custos de reciclagem. Em relação aos consumos parciais, 50% não consomem bobinas parcialmente e para o restante temos no máximo dois consumos parciais. O total de bobinas utilizadas ficou apenas 2.0% acima do valor ótimo para o melhor conjunto de parâmetros. Para as instâncias analisadas, priorizar a minimização dos consumos parciais se mostrou a estratégia mais eficiente.

Como trabalhos futuros, pretende-se investigar outros valores para os parâmetros que possam nos dar resultados ainda melhores. Outra direção interessante é a introdução de outras peculiaridades do processo produtivo ao modelo, como por exemplo, a estratégia FIFO (First-in, First-out) para o consumo das bobinas, o que evita o envelhecimento do estoque e a velocidade do corrugador, que aqui foi considerada constante. É também possível a integração com outros problemas, como a minimização dos deslocamentos da empilhadeira, que está diretamente ligado ao problema de alocação da bobinas. Além disso, pretende-se incorporar o sequenciamento dentro do modelo, tornando-o ainda mais robusto.

Referências

- Becceneri, J. C., Yanasse, H. H., e Soma, N. Y. (2004). A method for solving the minimization of the maximum number of open stacks problem within a cutting process. *Computers & Operations Research*, 31(14):2315–2332.
- Bolat, A. (2000). An extended scheduling model for producing corrugated boxes. *International Journal of Production Research*, 38(7):1579–1599.
- Chantrapornchai, C. e Sathapanawat, T. (2012). Corrugation software development and deployment: A case study. *International Journal of u-and e-Service, Science and Technology*, 5(1): 1–24.
- Chantrapornchai, C. e Sathapanawat, T. (2010). Scheduling and planning software for corrugation process. In *Signal Processing and Multimedia*, p. 260–266. Springer.
- Chantrapornchai, C. e Sathapanawat, T. (2011). Heuristic for paper roll selection for corrugation process simulation. In *U-and E-Service, Science and Technology*, p. 153–159. Springer.

- Cloud, F. H. (2000). *The art and science of corrugator scheduling by manual and computer methods*. Jelmar Publishing Company.
- Crawford, S. e Wiers, V. C. (2001). From anecdotes to theory: a review of existing knowledge on human factors of planning and scheduling. *Human performance in planning and scheduling*, p. 15–43.
- Haessler, R. W. (1985). Production planning and scheduling for an integrated container company. *Automatica*, 21(4):445–452.
- Haessler, R. W. e Talbot, F. B. (1983). A 0-1 model for solving the corrugator trim problem. *Management science*, 29(2):200–209.
- Herrmann, J. W. (2004). Information flow and decision-making in production scheduling. In *IIE Annual Conference. Proceedings*, p. 1. Institute of Industrial Engineers-Publisher.
- Jaramillo, J. D., Correa, F. J., e Jaramillo, R. (2009). Desarrollo de un método basado en algoritmos genéticos y programación lineal para la solución de un problema de corte unidimensional. *Enviado a revisión a la Revista de Ingeniería de la Universidad Eafit*.
- Kantorovich, L. V. (1960). Mathematical methods of organizing and planning production. *Management Science*, 6(4):366–422.
- Lins, S. (1988). Conjug: Um sistema para diminuir perdas no corte industrial de chapas, barras, bobinas. *The Proceedings of the XXI Congresso Nacional de Informatica*.
- Lins, S. (1989). Traversing trees and scheduling tasks for duplex corrugator machines. *Pesquisa Operacional*, 9(1):40–54.
- Matsumoto, K., Miwa, H., e Ibaraki, T. (2009). Scheduling of corrugated paper production. *European Journal of Operational Research*, 192(3):782–792.
- Melnyk, S. A., Vickery, S. K., e Carter, P. L. (1986). Scheduling, sequencing, and dispatching: Alternative perspectives. *Production and Inventory Management*, 27(2):58–68.
- Pegels, C. (1967). A comparison of scheduling models for corrugator production. *Journal of Industrial Engineering*, 18(8):466.
- Rodammer, F. A. e White Jr, K. P. (1988). A recent survey of production scheduling. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 18(6):841–851.
- Rodríguez, M. A. e Vecchietti, A. (2007). An efficient model implementation to solve a real-world cutting stock problem for a corrugated board boxes mill. *Computer Aided Chemical Engineering*, 24:601.
- Rodríguez, T. F. T. (2009). Una combinación de un algoritmo voraz con algoritmos genéticos para optimizar la producción de cartón ondulado. *Revista de métodos cuantitativos para la economía y la empresa*, (8):71–86.
- Savsar, M. e Cogun, C. (1994). Analysis and modelling of a production line in a corrugated box factory. *The International Journal of Production Research*, 32(7):1571–1589.
- Velasquez, A., Bellini, G., Paternina-Arboleda, C. D., et al. (2007). A multi-objective approach based on soft computing techniques for production scheduling in corrugator manufacturing plants. *Ingeniería y Desarrollo*, (21).