

Marcelo Ferreira

*Problemas de Programação de Produção em
Indústrias de Embalagens de Papelão Ondulado*

Tese de Doutorado

Marcelo Ferreira

*Problemas de Programação de Produção em
Indústrias de Embalagens de Papelão Ondulado*

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Matemática, junto ao Programa de Pós-Graduação em Matemática, do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de São José do Rio Preto.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Alexandre de Araujo

São José do Rio Preto

2018

Ferreira, Marcelo.

Problemas de programação de produção em indústrias de embalagens de papelão ondulado /Marcelo Ferreira. -- São José do Rio Preto, 2018

108 f. : il., tabs.

Orientador: Silvio Alexandre de Araujo

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas

1. Matemática. 2. Pesquisa operacional. 3. Planejamento da produção - Modelos matemáticos. I. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas. II. Título.

CDU – 510.67

Marcelo Ferreira

*Problemas de Programação de Produção em Indústrias de Embalagens de
Papelão Ondulado*

Tese apresentada como parte dos requisitos para
obtenção do título de Doutor em Matemática,
junto ao Programa de Pós-Graduação em
Matemática, do Instituto de Biociências, Letras
e Ciências Exatas da Universidade Estadual
Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de
São José do Rio Preto.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Silvio Alexandre de Araujo

UNESP - São José do Rio Preto

Orientador

Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro

UNESP - Ilha Solteira

Prof. Dr. Fernando Luiz Pio dos Santos

UNESP - Botucatu

Profa. Dra. Sonia Cristina Poltroniere Silva

UNESP - Bauru

Prof. Dr. Flavio Molina da Silva

UFTM - Uberaba

São José do Rio Preto,

31 de Julho de 2018.

Aos meus amados familiares,
e aos irmãos na fé.
Dedico.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por ter cumprido a sua promessa em minha vida. Agradeço a minha família que me apoio em tudo e sempre acreditou que esse sonho era possível. Agradeço a minha amada esposa Taciana e meu querido filho Vitor, que me acompanharam de perto com palavras de apoio, sorrisos e com suas orações. Agradeço ao meu orientador que foi essencial para a realização desse trabalho. Agradeço a todos os amigos do IBILCE que me ajudaram de várias formas. Agradeço a todos os funcionários do IBILCE, do laboratório de informática, secretarias e coordenações. Agradeço também a UFTM que me ofereceu condições de me dedicar integralmente ao doutorado, o que foi fundamental.

"As coisas que o olho não viu, e o ouvido não ouviu,
e não subiram ao coração do homem,
são as que Deus prepara para aqueles que ele ama."

1 Coríntios 2:9

Resumo

Nessa tese abordamos dois problemas reais identificados no processo produtivo de indústrias de embalagens de papelão ondulado, que denotaremos por Problema de Minimização de Trocas de Gramaturas e Rolos Corrugadores (PMTGRC) e Problema da Alocação de Bobinas no Corrugador (PABC). Ambos os problemas ocorrem no corrugador, máquina multiestágio que produz as chapas de papelão ondulado. O PMTGRC surge da necessidade de minimizar trocas de gramaturas e rolos corrugadores durante o processo de produção dos boletins, uma vez que cada boletim traz as gramaturas específicas das camadas da chapa, além do tipo de onda empregada no(s) miolo(s). O sequenciamento dos boletins impacta na quantidade de mudanças de gramaturas nos porta-bobinas e se haverá troca de rolos corrugadores para dois boletins subsequentes. As trocas de gramaturas impactam em custos de transporte de bobinas e as trocas de rolos corrugadores impactam em perda de produtividade. Para o PMTGRC propomos quatro modelos inéditos de programação inteira capazes de integrar essas duas considerações. O PABC integra várias considerações relacionadas à alocação das bobinas no corrugador, como por exemplo, a minimização das sobras não aproveitáveis e das quantidades de consumos parciais, fatores que influenciam diretamente nos custos de produção. Um modelo linear inteiro misto inédito é proposto, determinando quais bobinas serão utilizadas em cada porta-bobina. Além disso, propomos uma estratégia de sequenciamento das bobinas em cada porta-bobina, evitando paragens no corrugador. Uma série de testes computacionais utilizando instâncias geradas com base em dados reais foram realizados. Os resultados indicam que os modelos foram eficientes em tratar os problemas propostos.

Palavras Chave: Programação inteira mista. Modelagem matemática. Indústria de embalagens de papelão. Corrugador.

Abstract

In this thesis we approached two real problems identified over the productive process of corrugated cardboard industries, which we will denote as the Minimization of Converting Weights and Corrugators Problem (MCWCP) and the Corrugators Coil Allocation Problem (CCAP). Both of these problems happen in the corrugators, a multistage machine which produces corrugated cardboard. The MCWCP appears from the necessity to minimize changes of weight and corrugator rolls during the production process of the bulletins, since each one brings the specific layers's weight of the sheets, besides the kind of wave put in the middle. The sequence of bulletins impact in the number of weight changes in the coil holders and if there will be corrugating rollers's exchange for two following bulletins. The gramature's exchanges impact in the costs of transportation and the corrugating rollers exchange causes lost in the productivity. We propose four whole programming models capable of integrating both considerations. The CCAP integrates many considerations related to the coils's allocation on the corrugators, for example, the minimization of the non-usable leftovers and the amount of partial consumption, factors which influence directly on the production's costs. A whole new mist linear model is proposed, determined which coil on the corrugators are going to be used in each coil holder. Besides this, we propose a sequel strategy for the coils in each coil holder, avoiding stops on the corrugators. A series of computation tests using instances created based on real data were made. The results indicate that the models were efficient in solving the problems.

Keywords: Mixed integer programming. Mathematical modeling. Corrugated cardboard industries. Corrugator.

Lista de Figuras

1	Tipos de Papelão	p. 22
2	<i>Blanks</i> com vincos e <i>blanks</i> com recorte e impressão	p. 23
3	Fluxograma simplificado da primeira etapa do processo produtivo	p. 24
4	Corrugador	p. 25
5	Fluxograma simplificado dos processos no corrugador	p. 26
6	Corrugador - parte 1	p. 26
7	Rolos corrugadores	p. 27
8	Corrugador - parte 2	p. 27
9	Corrugador - parte 3	p. 28
10	Fluxograma simplificado dos processos na impressora flexográfica	p. 28
11	Impressora flexográfica	p. 29
12	Detalhe da seção de corte	p. 31
13	Padrões de corte para dois tipos de ordens	p. 32
14	Porta-bobinas	p. 42
15	Tela do gerador de instâncias	p. 85

Lista de Tabelas

1	Tipos de ondas	p. 22
2	Exemplos de três boletins de clientes	p. 37
3	Estoque fictício	p. 40
4	Revisão Bibliográfica	p. 44
5	Exemplos de boletins com suas principais informações	p. 45
6	Características das instâncias do PMTGRC	p. 61
7	Resultados dos modelos para o PMTGRC	p. 62
8	Valores das relaxações lineares dos modelos propostos	p. 65
9	Comparando soluções da prática com as do modelo matemático	p. 66
10	Sequenciamento dos boletins do conjunto 16 realizado na prática	p. 67
11	Sequenciamento dos boletins do conjunto 16 utilizando o Modelo 1	p. 67
12	Resumo do comportamento das variáveis binárias	p. 79
13	Testes com restrições válidas	p. 82
14	Exemplo de sequenciamento para um conjunto de bobinas	p. 84
15	Perfis das bobinas	p. 86
16	Tipos de boletins	p. 86
17	Parâmetros das classes	p. 86
18	Análise geral das 540 instâncias	p. 89
19	Resumo das médias dos resultados das 10 instâncias de cada classe	p. 90
20	Comparativo entre tipos de papelão	p. 91
21	Médias dos resultados da Tabela 18 - Comparativo entre tipos de papelão	p. 92
22	Comparativo entre tipos de estoque	p. 94

LISTA DE TABELAS

23	Médias dos resultados da Tabela 18 - Comparativo entre tipos de estoque	p. 94
24	Comparando perfis de bobinas	p. 95
25	Médias dos resultados da Tabela 18 - Comparativo entre perfis de bobinas	p. 95
26	Comparando entre tipo de boletins	p. 97
27	Médias dos resultados da Tabela 18 - Comparativo entre tipos de boletins	p. 97

Sumário

1	Introdução	p. 13
2	As Indústrias de Embalagens de Papelão Ondulado	p. 18
2.1	Principais fatos históricos relacionados ao papelão ondulado	p. 18
2.2	Principais conceitos associados ao papelão ondulado	p. 20
2.3	Processo produtivo de fabricação das embalagens de papelão ondulado	p. 23
2.3.1	1ª Etapa - Produção das bobinas de papel	p. 23
2.3.2	2ª Etapa - Produção dos <i>blanks</i>	p. 25
2.3.3	3ª Etapa - Recorte e impressão	p. 28
3	Descrição dos Problemas e Revisão Bibliográfica	p. 30
3.1	Descrição dos problemas abordados	p. 30
3.1.1	Problema da formação dos boletins - Categoria i	p. 31
3.1.2	Trabalhos com ênfase no problema da formação dos boletins.	p. 32
3.1.3	Problema do sequenciamento dos boletins - Categoria ii	p. 36
3.1.4	Trabalhos com ênfase no problema do sequenciamento dos boletins.	p. 38
3.1.5	Problema da produção dos boletins - Categoria iii	p. 39
3.1.6	Trabalhos com ênfase no problema da produção dos boletins.	p. 42
3.1.7	Trabalhos que integram dois tipos de problemas.	p. 43
4	O Problema de Minimização de Trocas de Gramaturas e Rolos Cor-	
	rugadores	p. 45
4.1	Descrição do problema	p. 45

4.2	O problema de minimização de trocas de ferramentas - PMTF	p. 47
4.3	Modelos para o PMTGRC	p. 51
4.3.1	Modelo 1	p. 52
4.3.2	Modelo 2	p. 54
4.3.3	Modelo 3	p. 57
4.3.4	Modelo 4	p. 58
4.4	Resultados computacionais	p. 60
4.4.1	Geração e caracterização dos dados	p. 60
4.4.2	Comparando os modelos com dados gerados aleatoriamente	p. 61
4.4.3	Comparando soluções da prática com as do modelo matemático	p. 66
5	O Problema de Alocação de Bobinas no Corrugador	p. 69
5.1	Descrição do problema	p. 69
5.2	Modelo matemático para o PABC	p. 73
5.2.1	Inequações válidas	p. 79
5.3	Estratégia de sequenciamento das bobinas nos pinos	p. 82
5.4	Resultados computacionais	p. 84
5.4.1	Geração e caracterização dos dados	p. 84
5.4.2	Análise geral dos resultados	p. 89
5.4.3	Análise da influência de cada parâmetro nos itens analisados	p. 91
6	Conclusões e Perspectivas Futuras	p. 99
6.1	Propostas futuras	p. 101
	REFERÊNCIAS	p. 104

Capítulo 1

Introdução

As embalagens de papelão ondulado são as mais utilizadas no mundo, por apresentarem baixo custo, serem recicláveis e otimizarem o uso do espaço. Além disso, segundo a Associação Brasileira de Papelão Ondulado (ABPO), são consideradas um termômetro da economia, uma vez que o aumento de sua produção indica um aquecimento nas vendas do varejo.

No Brasil, segundo dados do IBGE para o ano de 2014, as indústrias de embalagens movimentaram R\$ 55,1 bilhões, um aumento de aproximadamente 6,17% em relação ao ano anterior. Deste montante, R\$ 10,2 bilhões são referentes a indústria de embalagens de papelão ondulado, o que mostra a força deste setor na economia. Como consequência, as Indústrias de Embalagens de Papelão Ondulado (IEPO) estão imersas em um ambiente moderno altamente competitivo e globalizado e necessitam cada vez mais de habilidades de organização e estratégia para atingirem o sucesso.

Segundo [Darley, Sanders e Tessin \(2004\)](#), este sucesso só pode ser atingido com uma grande flexibilidade necessária para lidar com a demanda sempre crescente, a grande variedade dos pedidos e o processo produtivo composto por vários estágios, para o qual é essencial uma programação da produção eficiente, que de acordo com [Herrmann \(2004\)](#) e [Rodammer e White-Jr \(1988\)](#), é toda manipulação inteligente de informações que leve a uma tomada de decisão acertada em relação a atribuição eficiente de tarefas, satisfazendo as restrições e minimizando os custos.

Esta eficiência no setor produtivo das IEPO vem sendo perseguida desde a década de 60, quando surgiram os primeiros trabalhos voltados para processos específicos deste segmento, segundo [Pegels \(1967\)](#). Desde então, uma série de trabalhos foram publicados, com foco em diferentes problemas.

Os trabalhos da área de pesquisa operacional relacionados ao processo produtivo em uma IEPO podem ser divididos basicamente em três tipos, os relacionados a formação, ao sequenciamento e a produção dos boletins. A maioria dos trabalhos analisados abordou o problema da formação dos boletins, que consiste na programação de corte no corrugador (principal máquina do setor produtivo das IEPO que produz chapas de papelão ondulado a partir de bobinas de papel) com o objetivo de minimizar a perda lateral (*Trim Loss*), que surge da diferença entre a largura da placa e os padrões de corte escolhidos, tema abordado em [Hinxman \(1980\)](#), [Haessler e Talbot \(1983\)](#), [Lins \(1988\)](#), [Morábito \(1994\)](#), [Lizarazo et al. \(2003\)](#) e [Rodríguez \(2009\)](#), dentre outros.

Outros trabalhos, como [Lins \(1989\)](#) e [Matsumoto, Miwa e Ibaraki \(2009\)](#), abordaram o problema do sequenciamento dos boletins no corrugador, com os objetivos de minimização de pilhas em aberto e minimização do número de paragens do corrugador, respectivamente. Porém, somente em [Chantrapornchai e Sathapanawat \(2010\)](#) e em [Chantrapornchai e Sathapanawat \(2011\)](#) abordou-se algum aspecto relacionado a produção dos boletins.

A revisão bibliográfica realizada evidenciou que dois problemas relevantes do processo produtivo das IEPO ainda não foram explorados adequadamente. O primeiro problema que denotaremos por: **Problema de Minimização de Trocas de Gramaturas e Rolos Corrugadores - PMTGRC**, esta relacionado ao sequenciamento dos boletins, visando a minimização do número de trocas de gramaturas e rolos corrugadores, que impactam nos custos de produção e na produtividade. Segundo nosso levantamento, até o momento, nenhum trabalho abordou este problema.

Como citado anteriormente, cada boletim tem gramaturas específicas para cada uma das camadas, devendo-se considerar ainda, o tipo de onda que será utilizada no miolo da chapa, sendo que cada tipo de onda é produzida por um rolo corrugador específico.

Quando dois boletins são produzidos sucessivamente e as gramaturas são diferentes para alguma de suas camadas, a sobra de bobina do primeiro deverá ser retirada e transportada até o estoque, o que acarreta custos de transporte; porém, quando a gramatura é a mesma, pode-se enxergar os dois boletins como um só o que facilita a programação do uso das bobinas e reduz os custos de transporte. Da mesma forma, se para dois boletins sucessivos os rolos corrugadores forem diferentes, deverá ser feita a reposição do rolo, que demanda tempo e implica em perda de produtividade.

Obter a melhor sequência para os boletins de forma que sejam minimizadas as trocas de gramatura e rolos corrugadores é um problema relevante no processo produtivo das IEPO. Não encontramos nenhum artigo na literatura que trate do problema de minimi-

zação de gramaturas e rolos corrugadores.

O segundo problema, que denotaremos por: **Problema de Alocação de Bobinas no Corrugador - PABC**, está relacionado a produção dos boletins, visando a minimização dos custos de produção associados à alocação das bobinas.

Os operadores do corrugador utilizam as informações dos boletins que são enviadas pelo PCP (Planejamento e Controle da Produção), onde buscam-se as melhores combinações das ordens (pedidos) dos clientes. O boletim traz informações sobre a quantidade de camadas da chapa, o comprimento que será produzido, as dimensões e quantidades de *blanks* (retângulos que darão origem as caixas) que deverão ser cortados, as gramaturas de cada uma das camadas e o tipo de onda do miolo da chapa, que é determinada pelo rolo corrugador utilizado.

Com estas informações, cada bobina de papel que será utilizada no corrugador deve ser escolhida, transportada e finalmente alocada em estruturas denominadas porta-bobinas, nas quais as bobinas são fixadas aos pares e cujo papel é convertido em uma das camadas da chapa, que geralmente tem três ou cinco camadas, compreendendo uma camada plana e outra ondulada intercaladas.

Do processo de escolha e alocação das bobinas surgem várias considerações que compõem o PABC, sendo que, nesta tese, pela primeira vez, essas considerações foram integradas em um único modelo inteiro misto.

A primeira consideração é diz respeito à minimização das sobras não aproveitáveis, que podem surgir quando dois boletins produzidos de forma sucessiva têm gramaturas diferentes para uma de suas camadas e esta sobra que deve ser retirada, pode ser aproveitável ou não, e se não for, a mesma deve ser reciclada, o que impacta em custos de reciclagem.

A segunda consideração diz respeito à minimização dos consumos parciais, pois esse tipo de consumo obriga a devolução da sobra da bobina ao estoque, o que o torna mais caro que os consumos integrais. Esta consideração do processo produtivo ainda não tinha sido abordada em nenhum outro trabalho.

A terceira consideração diz respeito à minimização do número de paragens do corrugador, que depende de quais bobinas são selecionadas para cada porta-bobinas e de qual será a sequência de alocação.

A quarta consideração diz respeito à minimização do número total de bobinas por boletim, que impacta diretamente nos custos de produção, associados a transporte e

alocação das mesmas.

Apenas três trabalhos abordaram alguma destas considerações, porém não de forma integrada. Em [Chantrapornchai e Sathapanawat \(2010\)](#) e [Chantrapornchai e Sathapanawat \(2011\)](#), os objetivos principais foram a minimização do número de sobras não aproveitáveis e a minimização dos tocos (sobras de bobinas que foram consumidas parcialmente). Destacamos que ao se priorizar os consumos dos tocos, pode-se aumentar consideravelmente o número de bobinas alocadas em um determinado boletim, o que é conflitante com a quarta consideração acima, e por isso, não inserimos esta consideração em nossa análise. Em [Matsumoto, Miwa e Ibaraki \(2009\)](#), os objetivos principais foram a minimização das perdas laterais, a minimização do comprimento dos rolos de papel utilizados e a minimização do número de paragens no corrugador, sendo que esse foi o primeiro e único trabalho a considerar o problema da minimização das paragens.

O tratamento adequado do PABC e do PMTGRC tem impactos significativos na produção das caixas de papelão, viabilizando uma melhor gestão do estoque, minimizando danos ambientais, uma vez que menos material será reciclado e reduzindo custos globais de produção, o que justifica o interesse pelo tema.

Modelar estes dois problemas e realizar testes computacionais com instâncias baseadas em dados reais é o principal objetivo dessa tese.

Dentro desse contexto, a pesquisa dessa tese pode ser classificada, em relação a natureza, como pesquisa aplicada, uma vez que os resultados podem ser utilizados na solução de problemas reais e, segundo [Appolinário \(2006\)](#), suscita objetivos comerciais através do desenvolvimento de novos processos ou produtos orientados para as necessidades do mercado.

Em relação aos objetivos, pode ser classificada como pesquisa exploratória e normativa. Exploratória pois utiliza levantamento bibliográfico e entrevistas com pessoas que tiveram experiências práticas com o problema pesquisado e normativa que, segundo [Bertrand e Fransoo \(2002\)](#), está interessada no desenvolvimento de políticas, estratégias e ações para aperfeiçoar os resultados disponíveis na literatura existente e comparar várias estratégias relativas a um problema específico. Em relação a abordagem, pode ser classificada como pesquisa quantitativa, que segundo [Richardson \(1989\)](#), é uma abordagem objetiva, onde tudo pode ser quantificável, ou seja, as opiniões e informações podem ser convertidas em números, permitindo uma melhor classificação e análise e permitindo que os resultados sejam generalizáveis.

Em relação aos métodos, pode ser classificada como modelagem e simulação, pois

um dos objetivos centrais dessa tese é experimentar, através de modelos, sistemas reais, determinando-se como estes sistemas responderão às modificações que lhe são propostas.

Essa tese esta organizada da seguinte forma: No Capítulo 2 apresentamos os principais conceitos e fatos históricos relacionados ao papelão ondulado, bem como uma descrição detalhada do processo produtivo em uma IEPO. No Capítulo 3 apresentamos uma revisão bibliográfica voltada para os trabalhos com ênfase no processo produtivo das IEPO. No Capítulo 4 apresentamos uma descrição detalhada do PMTGRC, bem como quatro modelos inteiros para o mesmo. Além disso, apresentamos uma comparação das soluções obtidas via modelo com as soluções utilizadas na prática e também os resultados para um outro conjunto mais geral de instâncias geradas com base em dados reais. No Capítulo 5 apresentamos uma descrição detalhada do PABC, um modelo linear inteiro misto que integra as principais considerações do problema e também um conjunto de restrições válidas capazes de gerar relaxações lineares mais fortes. Além disso, apresentamos uma série de testes computacionais com instâncias geradas com base em dados reais e analisamos as influências dos principais parâmetros das instâncias nas soluções. No Capítulo 6 apresentamos as conclusões e perspectivas futuras.

Capítulo 2

As Indústrias de Embalagens de Papelão Ondulado

Neste capítulo apresentaremos inicialmente um levantamento com os principais fatos históricos relacionados ao papelão ondulado. Na sequência, destacaremos os principais conceitos associados ao papelão, tais como funções, origem e constituição básica. Apresentaremos também o conceito de embalagem, as classificações dos principais tipos de papéis utilizados na produção do papel ondulado e dos principais tipos de papelão ondulado. Finalizaremos com uma descrição detalhada do processo produtivo em uma IEPO.

2.1 Principais fatos históricos relacionados ao papelão ondulado

O primeiro material corrugado conhecido foi patenteado pelos ingleses Edward Charles Healey e Edward Ellis Allen em 1856. Sua concepção foi baseada em laços ondulados usados em colares de tecido da edumentária feminina da época e a primeira utilização deu-se na parte interna dos chapéus da Victorian Englishmen. (PRESSANTO, 2004).

Em dezembro de 1871, o americano Albert L. Jones consegue a patente para as primeiras embalagens usando papel ondulado. Durante o mesmo ano, Henry Norris adquiriu a patente de Jones e começa a fabricar material ondulado para embalar garrafas de vidro. Enquanto isso outro fabricante, Robert H. Thompson surge com um produto similar confeccionado a partir da cortiça e com a mesma finalidade de embalar garrafas de cerveja, copos e outros. (MALTENFORT, 1990).

Em 1874, Oliver Long, baseado no conhecimento e na patente de Jones, incrementa o produto colocando mais uma folha lisa colada à superfície ondulada com o objetivo

de fortalecê-la. Entendendo que o produto poderia ser comercializado em grande escala, Thompson e Noris se unem e desenvolvem o primeiro maquinário para a produção de uma superfície ondulada colada a uma superfície plana (atualmente definida como papelão de parede simples). (MALTENFORT, 1990).

Em 1879, o químico alemão Carl F. Dahl cria o processo de sulfato ou processo Kraft, que converte madeira em polpa de madeira que é praticamente celulose pura. Tal processo permitiu aos E.U.A tornarem-se os maiores produtores de produtos de papel do mundo.

Em 1890, Robert Thompson aprimorou o processo de ondulação e patenteou o método de ondulação e aplicação de adesivo no topo da onda numa mesma sequência de operação. As primeiras caixas de papelão são produzidas em 1894 e um ano depois a Wells Fargo começa a utilizar caixas de papelão para pequenas remessas de mercadorias.

O marco das mudanças ocorre em 1895 quando a Sefton Manufacturing Company desenvolve o primeiro equipamento capaz de produzir uma chapa de papelão ondulado em onda simples e em onda dupla numa mesma operação e de forma contínua. Esta máquina foi desenvolvida e patenteada por Jefferson T. Ferres que acompanhou pessoalmente a construção da máquina nas instalações da Sefton. (MALTENFORT, 1990).

Em 1902 as caixas de fibras sólidas são desenvolvidas e já em 1903, as caixas de papelão ondulado começam a ser usadas em trens, no transporte de cereais porém, uma penalidade de 10% é imposta aos produtos que utilizam este tipo de caixa, ao invés da caixa de madeira.

Aproveitando a patente de Ferres, Samuel M. Langston, em 1908, desenvolveu um ondulador que utiliza os princípios operacionais atuais. Em 1914, as taxas adicionais pelo uso das caixas de papelão são finalmente abolidas, o que provocou uma forte expansão das indústrias de papelão ondulado, sendo que na década de 1920, as caixas de papelão ondulado começam a ser mais utilizadas do que as caixas de fibra de madeira. (MALTENFORT, 1990)

Em 1935 deu-se início a produção do papelão ondulado no Brasil, sendo a primeira fábrica constituída por João Costa e Ribeiro, segundo Peres (2002). Antes desta data o papelão utilizado era importado da Alemanha.

Em 1935 o grupo Stein Hall cria um novo sistema de preparação da cola utilizada na fabricação do papelão, utilizando amido, ao invés das fórmulas baseadas em silicato de sódio. O sistema oferece simplicidade e baixo custo.

Em 1940 foi inventada a primeira máquina de corte e vinco automática. Em 1952, foi

constituída a *European Federation of Corrugated Board Manufacturers*, para representar os interesses da indústria de papel corrugado em toda a Europa, abordando temas técnicos e questões econômicas.

Em 1957, introduz-se a impressão flexográfica, que substitui rapidamente a tipografia a base de tinta óleo e em 1963 as equações para calcular a resistência da caixa são publicadas por McKee, Gander e Wachuta (1963).

Em 1968 são estabelecidas nos EUA, via Artigo 222, as regras para os transportes de caixas em caminhões. No início de 1980, inovações foram feitas no projeto dos corrugadores, aumentando a produtividade e reduzindo o desperdício. Em 1974 foi fundada a Associação Brasileira do Papelão Ondulado (ABPO).

No início de 1990 os corrugadores 1000 fpm (*feet per minute*) são desenvolvidos. Em 1999, foi desenvolvido por um grupo da FBA (*Fibre Box Association*), um design padronizado para recipientes de papelão ondulado que eliminou o problema de cargas mistas instáveis, que poderiam cair durante o transporte e ajudou a aumentar o volume do produto que pode ser transportado sobre os paletes a partir de um centro de distribuição.

Em 2000, a *The Corrugated Common Footprint Standard* (CCF) estabelece dimensões para recipientes de papelão ondulado para facilitar o carregamento eficiente, manuseamento e armazenagem. A expedição dos produtos (frutas e vegetais frescos) sobre paletes é oficialmente adotada pela América do Norte e indústrias europeias.

Em 2005 as Publicações da *FBA recyclability standard* e da *Voluntary Standard for Repulping and Recycling Corrugated Fiberboard Treated* apresentam marcos de melhorias no desempenho da utilização da água nos processos de produção do papelão corrugado.

Em 2010 a *The Corrugated Packaging Alliance* (CPA) realiza o primeiro *Life Cycle Assessment*(FCA) que mede e documenta os impactos ambientais causados pela produção do papel corrugado. Foi feita uma atualização nestes relatórios em 2014 e em 2017. (ASSOCIATION et al., 1999).

2.2 Principais conceitos associados ao papelão ondulado

Atualmente, o papelão ondulado é a principal matéria prima utilizada na produção de embalagens e apresenta várias funções relacionadas a proteção, estocagem e identificação visual, e por ser capaz de atender a todos estes requisitos é considerado uma estrutura

complexa, apesar de sua aparência simples. (MALTENFORT, 1990).

Quanto a origem, é classificado como um produto de base florestal, produzido com pastas celulósicas de fibras longas, oriundas principalmente da madeira de *Pinus*, segundo Vidal (2012).

Sua constituição básica dá-se pela união de um ou mais elementos ondulados (miolo) colados, através de um adesivo, a um ou mais elementos planos (capa). O miolo ondulado é feito através de um processo de ondulação por cilindros a altas temperaturas, como se fosse prensado, geralmente de papel *Kraft* reciclado. A capa é feita de papel plano, constituído por *Kraft* (termo alemão que significa forte) virgem ou reciclado, dependendo de sua aplicação. (TEIXEIRA, 1999).

Os principais papéis desta categoria empregados nas capas das chapas são o *Kraft Liner*, que é fabricado com grande participação de fibras virgens, permitindo a adição de 10 a 20% de matéria-prima reciclada de boa qualidade e o *Test Liner*, com propriedades mecânicas inferiores e onde é permitida a utilização de matérias-primas recicladas em alta proporção.

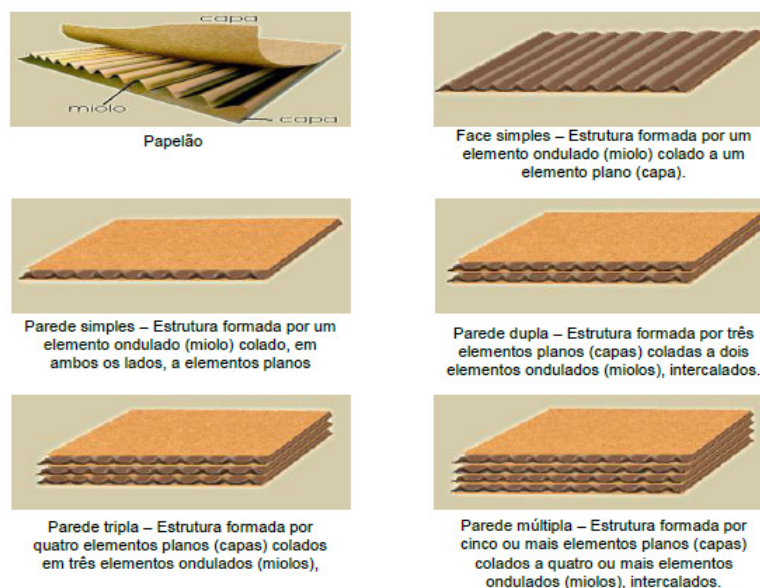
Já em relação ao miolo das chapas, utiliza-se o papel *Miolo Standard*, que é obtido a partir da matéria-prima reciclada com adição de produtos (ex.: amido) para aumentar sua resistência. O papel miolo confere ao papelão ondulado diferentes características contra choques, compressão e esmagamento, dependendo do tipo de ondulação empregada.

Existem vários tipos de papéis ondulados, com características específicas para cada produto. De acordo com a terminologia da NBR 5985 utilizada pela Associação Brasileira de Papelão Ondulado (ABPO), os papéis ondulados são classificados como (ver Figura 1):

- Face simples: estrutura formada por um elemento ondulado (miolo) colado a um elemento plano (capa).
- Parede simples: estrutura formada por um elemento ondulado (miolo) colado, em ambos os lados, a elementos planos (capas).
- Parede dupla: estrutura formada por três elementos planos (capas) colados a dois elementos ondulados (miolos) intercaladamente.
- Parede tripla: estrutura formada por quatro elementos planos (capas) colados em três elementos ondulados (miolos) intercaladamente.
- Parede múltipla: estrutura formada por cinco ou mais elementos planos (capas)

colados a quatro ou mais elementos ondulados (miolos) intercaladamente.

Figura 1: Tipos de Papelão



Fonte: www.abpo.org.br. Acesso em dez. 2016.

O tipo de ondulação a ser empregada no miolo é caracterizada pela altura das ondas e pelo número de ondas em um certo comprimento, conforme Tabela 1:

Tabela 1: Tipos de ondas

Perfil de onda	Espessura(mm)	Número de ondas (m)
A	5	110 a 116
B	3	152 a 159
C	4	123 a 137
E	1,5	294 a 313

Fonte: www.abpo.org.br. Acesso em dez. 2016.

A onda A é a que confere ao papelão ondulado melhor capacidade de absorção ao choque e maior resistência à compressão na direção topo-base. A onda B, devido ao maior número de ondas por unidade de comprimento, é mais utilizada quando se precisa de maior resistência ao esmagamento. A onda C tem propriedades intermediárias àsquelas das ondas A e B e a onda E, pelo seu elevado número de ondas por unidade de comprimento, proporciona boa superfície de impressão.

Outro conceito importante é a gramatura do papel utilizado na fabricação das chapas, parâmetro que fornece a massa de papel em gramas por metro quadrado (g/m^2). Na

maioria das IEPO as principais gramaturas utilizadas são: 100, 120, 140, 160, 180 e 200 g/m^2 , sendo as gramaturas 120 g/m^2 e 140 g/m^2 as mais utilizadas.

2.3 Processo produtivo de fabricação das embalagens de papelão ondulado

De forma simplificada, o processo produtivo pode ser dividido em três etapas:

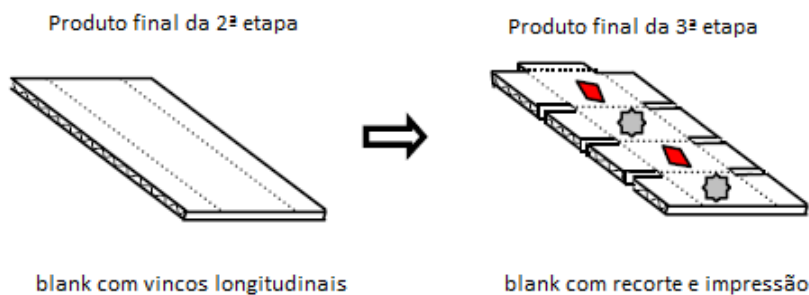
1ª Etapa - Produção das bobinas de papel. Etapa que ocorre na planta de papel.

2ª Etapa - Produção dos *blanks*. Etapa que ocorre no corrugador. Daremos ênfase a esta etapa, pois nela foram identificados os problemas abordados nesta tese.

3ª Etapa - Recorte e impressão dos *blanks*. Etapa que ocorre na impressora flexográfica.

Os *blanks* são os retângulos menores cortados das chapas de papelão ondulado e que constituem a base para a produção de uma caixa de papelão. Os *blanks* já possuem os vincos, onde a caixa é dobrada no momento de sua montagem final, mais ainda não receberam os recortes e a impressão, que ocorrem na terceira etapa, conforme Figura 2.

Figura 2: *Blanks* com vincos e *blanks* com recorte e impressão



Fonte: Autoria própria

A seguir descreveremos as etapas com mais detalhes.

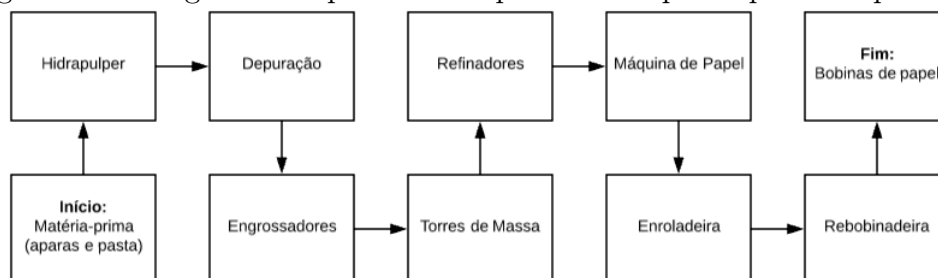
2.3.1 1ª Etapa - Produção das bobinas de papel

Esta etapa, que ocorre na planta de papel, é considerada parte do processo produtivo das embalagens de papelão ondulado pois, nela são produzidas as bobinas, consideradas matéria prima para a segunda etapa, que ocorre no corrugador.

De acordo com Robert (2007), a produção das bobinas de papel, tem como matéria-prima as aparas (todos os tipos de papéis usados) e a pasta químio-mecânica (pasta de materiais ligno-celulósicos prévia e levemente tratados com reagentes químicos, obtida por desfibramento a pressão atmosférica).

O fluxograma da Figura 3 traz um resumo dos processos desta 1ª etapa.

Figura 3: Fluxograma simplificado da primeira etapa do processo produtivo



Fonte: Autoria Própria

Inicialmente a matéria-prima é recebida na forma de fardos de aparas e pasta químio-mecânica. A matéria-prima é então colocada em uma esteira e transportada até o equipamento denominado Hidrapulper. Neste equipamento é acrescida a água, efetuando-se a desagregação, isto é, a matéria-prima é transformada em pequenos pedaços de papel, formando uma suspensão fibrosa chamada de massa.

No Hidrapulper a matéria-prima sofre também um processo de pré-depuração com a finalidade de remover impurezas como grampos, cliques, pedras, arames, plásticos, metais e tecidos. Após a desagregação a massa é bombeada para o tanque de descarga e em seguida para o processo de depuração. Este processo consiste na remoção de impurezas menores da massa tais como: areia, plástico, palitos e isopor.

Após a depuração a massa segue para os engrossadores, onde é extraída a água, conferindo à suspensão fibrosa maior consistência, sendo posteriormente, estocada nas torres de massa. Quando a massa é extraída das torres, esta sofre a adição de água para baixar a consistência, seguindo daí para os tanques e equipamentos de refinação.

Nos refinadores a massa passa pelos discos rotativos onde são hidratadas. Após a refinação, segue para os tanques de estocagem da máquina de papel. Esta máquina é composta de várias partes. Na caixa de entrada, a massa proveniente dos tanques de estocagem é distribuída uniformemente sobre a mesa plana, equipamento composto de uma tela e caixas de vácuo que têm a finalidade de formar a folha de papel e remover parte da água utilizada na diluição da massa. Após formada, a folha de papel passa para

a prensagem.

Nas prensas, a folha de papel passa sob pressão entre rolos, onde ocorre compactação e remoção de parte da água. Na sequência, segue para os secadores, que é um conjunto de rolos aquecidos com a injeção de vapor, sobre os quais passa a folha de papel, removendo a quantidade de água ainda presente e deixando-a nas especificações de umidade.

Após a secagem, a folha de papel segue para a enroladeira, equipamento composto de braços pneumáticos, aos quais é preso um rolo de diâmetro pequeno chamado estanga. A folha que está sendo produzida é enrolada e o papel está pronto, porém ainda necessita ser cortado na largura especificada

Esta última etapa é feita na rebobinadeira, equipamento composto de rolos e facas e que têm a finalidade de receber o rolo de papel bruto e cortá-lo na largura especificada, sendo cortada uma tira de papel de cada lado do rolo bruto, chamada refile, dando o acabamento final no produto. Após rebobinado, o papel é pesado, identificado e enviado para a expedição.

2.3.2 2ª Etapa - Produção dos *blanks*

Esta etapa ocorre no corrugador (também chamado de onduladeira), máquina multi-estágio que mede 150 m de comprimento e pesa 500 toneladas e tem como produto final os *blanks*. Consideramos que a matéria prima utilizada são as bobinas de papel provenientes da 1ª etapa e podem ser de três tipos: papel *Kraft Liner*, papel *Test Liner* e o papel *Miolo Standard*.

Muitas IEPO utilizam corrugadores semelhantes ao da Figura 4. Neste equipamento, também é utilizado vapor e cola, sendo que a estação de produção da cola é anexa ao corrugador.

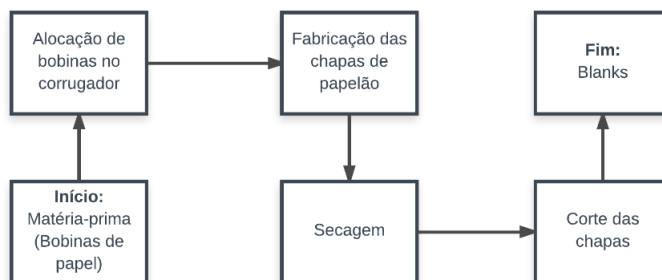
Figura 4: Corrugador



Fonte: www.bhs-world.com/de/maschinen/komplettanlagen. Acesso em dez. 2016.

O fluxograma da Figura 5 traz um resumo dos processos no corrugador.

Figura 5: Fluxograma simplificado dos processos no corrugador



Fonte: Autoria Própria

Uma decisão importante para a segunda etapa consiste na elaboração dos boletins pelo PCP (Planejamento e Controle de Produção). No boletim, busca-se as melhores combinações das ordens (pedidos dos clientes), levando em conta: a minimização de perdas de refil e a minimização do comprimento de chapa.

O boletim traz informações acerca da quantidade de camadas, largura e gramatura da chapa que será produzida, e além disso, traz a descrição dos tipos de *blanks* que serão produzidos e a quantidade de cada um destes tipos.

Após o recebimento das informações enviadas pelo PCP, com as características de cada boletim, a equipe de produção responsável pelo corrugador deverá abastecê-lo com as primeiras bobinas de papel, de acordo com o tipo de chapa que será produzida. No corrugador, as bobinas são instaladas nos portas-bobinas sempre aos pares, mantendo uma em estado de espera, conforme Figura 6

Figura 6: Corrugador - parte 1



Fonte: www.bhs-world.com/de/maschinen/komplettanlagen. Acesso em dez. 2016.

Na primeira etapa do corrugador, o papel passa nos cilindros corrugadores, conforme Figura 7 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.

Figura 7: Rolos corrugadores



Fonte: www.boxmakingmachine.co.in. Acesso em dez. 2016

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. Os corrugadores podem fabricar outros tipos de papelão, como o de parede dupla, ou duplex, que possui dois miolos e três capas.

A chapa de parede simples passa então por uma mesa de resfriamento, para secagem, conforme Figura 8 onde a adesão ideal das capas com o miolo é atingida.

Figura 8: Corrugador - parte 2



Fonte: www.bhs-world.com/de/maschinen/komplettanlagen. Acesso em dez. 2016.

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 os *blanks* com as especificações de cada cliente. Conforme Figura 9.

A maioria dos corrugadores produz no máximo dois tipos de *blanks* por boletim, existindo também uma limitação em relação a quantidade de itens que são produzidos para cada tipo de *blank*. Após o processo de corte, os *blanks* de mesma dimensão são reunidos em fardos, que são colocados em paletes e armazenados.

Figura 9: Corrugador - parte 3

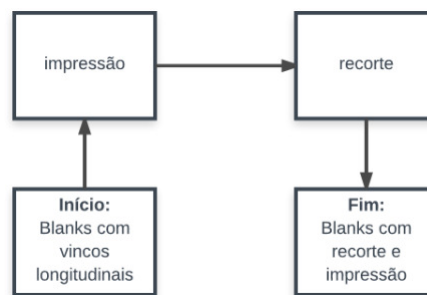


Fonte: www.bhs-world.com/de/maschinen/komplettanlagen. Acesso em dez. 2016.

2.3.3 3ª Etapa - Recorte e impressão

O fluxograma da Figura 10 traz um resumo dos processos na impressora flexográfica.

Figura 10: Fluxograma simplificado dos processos na impressora flexográfica



Fonte: Autoria Própria

Nesta etapa dá-se o processo de acabamento nas caixas de papelão, que consiste basicamente nas operações de impressão e recorte. Estas operações são realizadas nas máquinas flexográficas, semelhantes a Figura 11. A impressão é efetuada com a chapa passando entre rolos que contém clichês com o desenho de impressão especificado e os recortes são feitos quando a caixa passa por rolos com o gabarito do desenho da caixa.

Alguns tipos de caixas devido a sua especificação, podem passar por outras etapas, como é o caso de caixas grampeadas ou com colagem especial, etapas estas realizadas nas máquinas grampeadeiras e coladeiras.

Após a impressão e corte, as embalagens produzidas são amarradas em fardos e seguem para a expedição, onde o material é conferido e enviado para os clientes.

Figura 11: Impressora flexográfica



Fonte: <http://www.printics.eu> (2017)

Nesse capítulo apresentamos uma caracterização completa do processo produtivo em uma IEPO e introduzimos os principais conceitos associados ao papelão ondulado com o intuito de facilitar o entendimento dos problemas que serão abordados nessa tese.

Capítulo 3

Descrição dos Problemas e Revisão Bibliográfica

Neste capítulo apresentaremos uma revisão bibliográfica voltada a trabalhos de otimização com ênfase no processo produtivo das IEPO. Esta revisão tem caráter amplo e não se restringe unicamente aos trabalhos que abordaram os problemas tratados nessa tese.

Proporemos uma maneira de classificar os problemas identificados de forma a facilitar a organização da revisão. O objetivo é dar um panorama com os principais temas já abordados para este tipo específico de indústria.

3.1 Descrição dos problemas abordados

Os primeiros trabalhos de otimização associados a problemas das indústrias de embalagens de papelão começaram a ser publicados na década de 60. Nossa revisão começou por este período e se estendeu até a atualidade, gerando um recorte temporal de 58 anos.

Primeiramente, buscamos a melhor maneira de organizar estes trabalhos e dentre as várias possibilidades, optamos por adaptar uma classificação proposta em [Haessler \(1985\)](#), em que são apresentadas várias áreas de decisão identificadas nos processos de planejamento da produção das IEPO. Propomos três categorias de problemas que são capazes de abrigar todos os documentos revisados. As categorias são as seguintes:

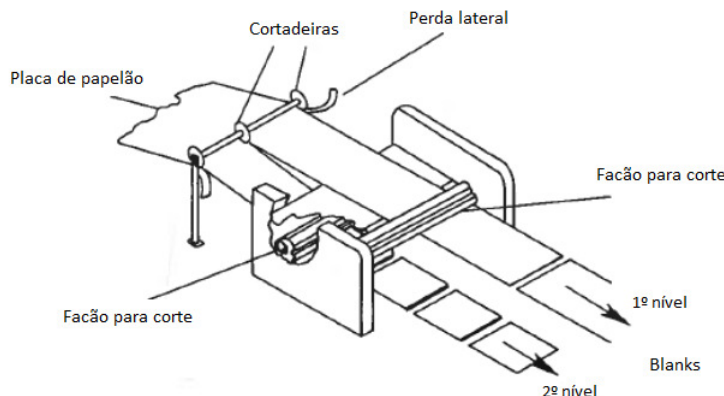
3.1.1 Problema da formação dos boletins - Categoria i

As chapas de papelão produzidas pelo corrugador devem ser cortadas em *blanks* (produto final da 2ª etapa do processo produtivo). Esta programação do corte, classificado como corte bidimensional e guilhotinado, é feita no PCP, onde são formados os boletins.

Na formação dos boletins, que combinam as ordens (pedidos) dos clientes, busca-se atender inicialmente as restrições técnicas do corrugador, tais como, número máximo de tipos de ordens que podem ser combinadas e número máximo de itens que podem ser cortados na largura da chapa.

Os corrugadores mais utilizados pelas IEPO suportam no máximo dois tipos de ordem que são processadas em dois níveis, conforme Figura 12, e no máximo oito itens na largura da chapa.

Figura 12: Detalhe da seção de corte



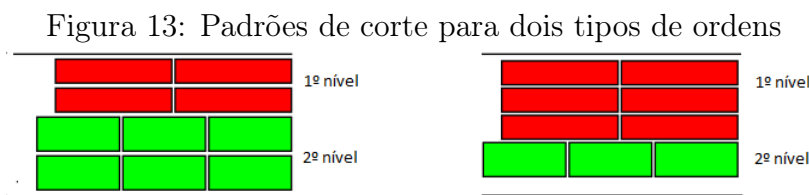
Fonte: Autoria própria

Além das restrições técnicas, esta programação tem dois objetivos principais: minimizar a perda lateral, que é calculada pela diferença entre a largura da placa produzida e os padrões de corte escolhidos, e minimizar o comprimento total de rolos de papel utilizados, o que depende diretamente da forma que os *blanks* são organizados e cortados sobre a placa.

Os padrões de corte trazem as combinações das ordens dos clientes, especificando os tipos e as quantidades de itens de cada ordem que serão produzidas. Cada boletim utiliza um único padrão de corte, que ao ser definido, determina o comprimento da chapa que será produzida.

Na Figura 13 temos dois padrões de corte que combinam duas ordens e quatro itens.

A escolha do padrão implica diretamente no valor da perda lateral e no comprimento da chapa que deve ser produzida para se atender a demanda.



Fonte: Autoria própria

Nesta tese não abordaremos o problema da formação dos boletins uma vez que este já foi amplamente explorado em vários trabalhos, como ficará claro na seção seguinte.

3.1.2 Trabalhos com ênfase no problema da formação dos boletins.

A maioria dos trabalhos analisados abordou o problema da formação dos boletins, que, como definido anteriormente, consiste em um problema de programação de corte, de acordo com as restrições técnicas no corrugador e com o objetivo de minimização do *trim loss* (perda lateral).

Em Pegels (1967), é feita uma comparação entre as três primeiras heurísticas (conjunto de regras e métodos que conduzem à solução de um problema, sem garantias de otimalidade) publicadas para programação do corte no contexto das indústrias de embalagens de papelão.

A primeira heurística foi publicada por Duyne (1965). Este procedimento começa com a seleção de uma ordem chave, com base na largura ou na quantidade dos *blanks*. Esta ordem é então programada de forma independente e as ordens restantes são combinadas entre si. O modelo executa vários testes com os padrões obtidos, incluindo o teste do padrão com comprimento mínimo e o teste de compatibilidade para ver se duas ordens que formam um padrão podem ser sequenciadas sem deixar itens restantes, considerando as tolerâncias permitidas. Os padrões que sobrevivem aos testes são então selecionados, priorizando-se os mais largos, desde que esteja disponível um rolo de matéria prima que satisfaça a perda lateral máxima.

A segunda heurística foi publicada por Wormer (1963). Sua abordagem consiste em taxar cada padrão de corte com um custo decorrente da utilização daquele padrão. Um

padrão curto, por exemplo, é taxado pelo tempo de *setup*, um padrão que usa somente uma parte da largura do corrugador é taxado pela perda na produtividade e um padrão que utiliza várias larguras de materiais é taxado pelo custo de troca de material. Um padrão é considerado aceitável se o custo associado a ele é menor que um valor pré-estabelecido. Além disso, deve-se considerar o critério da perda lateral, que também deve ser satisfeito.

A terceira heurística foi publicada por Wade (1964) e utiliza uma variação do método de programação dinâmica de Gilmore e Gomory que pode ser obtida em Gilmore e Gomory (1961) e Gilmore e Gomory (1963).

As comparações para as três abordagens foram feitas para uma instância com 8 ordens. Ao tomar como base o custo computacional, o modelo de Van Duijne se mostrou o melhor. Se olharmos para a perda lateral, os resultados de Wormer e Wade são melhores, mas requerem tempo computacional maior. Ao se exigir produção exata da demanda, os resultados de Wade foram os melhores, seguidos por Van Duijne.

A principal deficiência das heurísticas propostas é a incapacidade de realizar o *partialing*, que é geração de padrões de corte que permitam que uma ordem grande seja executada em sua totalidade, enquanto várias ordens menores são combinadas paralelamente a ela.

Em Hinxman (1980), encontra-se uma revisão sobre perda lateral e *assortment problems*. O trabalho se divide em duas partes, na primeira é apresentada uma categorização dos problemas de acordo com sua dimensão, destacando-se os 1-dimensional, 1.5-dimensional e 2-dimensional. Na segunda é apresentada uma classificação dos métodos utilizados em cada uma destas categorias, sendo que os principais são a programação linear, programação dinâmica e *branch-and-bound*.

Em Haessler e Talbot (1983) é apresentado um método para resolver o problema da perda lateral. Na formulação do modelo, em vez de utilizar variáveis em termos dos padrões de corte, focou-se nos elementos de solução, definidos como uma especificação da forma em que uma ou mais ordens podem ser produzidas completamente a partir de apenas uma largura de placa. É apresentado um modelo binário que utiliza quatro tipos de elementos de solução.

O procedimento de solução do modelo binário é uma adaptação do método de enumeração implícita introduzido por Garfinkel e Nemhauser (1969). Como o método de *backtracking* fornece boas soluções factíveis mais rapidamente, estas podem ser utilizadas como soluções iniciais em procedimentos heurísticos, quando o tempo de obtenção de solução for muito grande. Em Haessler e Talbot (1983) foi apresentado exemplo com

15 ordens, para o qual o modelo forneceu 62 elementos de solução e solução ótima em 0.696 segundos, utilizando-se um computador AMDAHL V/7 e um compilador padrão FORTRAN G.

Em [Lins \(1988\)](#) é descrito o desenvolvimento e alguns aspectos operacionais de um *software* que visa gerar planos de corte com perda lateral mínima. O nome genérico desse sistema é CONJUG, sendo que foram desenvolvidas três versões com especializações de acordo com a área de atuação.

A primeira versão foi o CONJUG-b, usado para fazer programações de cortes de bobinas em indústrias de papel, alumínio e aço em rolos.

A segunda versão foi o CONJUG-o, utilizado na programação do corrugador duplex (que fabrica papelão de parede simples) na indústria de embalagens de papelão ondulado. Esta versão do CONJUG pode ser enxergada como uma especialização do CONJUG-b, aplicado na programação das máquinas corrugadoras duplex.

O objetivo principal do CONJUG-o é a minimização da perdas laterais, mas além disso, auxilia na tomada de decisões como por exemplo: fazer um pedido em um papelão superior ao encomendado ou liberar a produção da chapa para aproveitamento posterior. Tais decisões são tomadas sem prejudicar o andamento do processo produtivo, uma vez que as respostas, para as conjugações e re-conjugações são muito rápidas.

Para criá-lo, utilizou-se o método simplex revisado aliado a técnica de geração de colunas. Na parte de manipulação das conjugações e minimização de pedidos parcialmente fabricados, utilizou-se teoria de hipergrafos que pode ser obtida em [Berge e Minieka \(1973\)](#).

A terceira versão foi o CONJUG-c, especializado em programar cortes de chapas retangulares de tamanho padrão em *blanks* de quaisquer dimensões, como por exemplo, chapas de vidro, compensado e aço.

Em [Morábito \(1994\)](#), são apresentados alguns modelos de otimização para o problema de corte de estoque e reporta-se uma experiência real de aplicação destes modelos em uma indústria de embalagens de papel e papelão (problema unidimensional) e numa indústria de móveis (problema bidimensional). A abordagem utiliza os modelos de Gilmore, Gomory publicados em [Gilmore e Gomory \(1961\)](#), [Gilmore e Gomory \(1963\)](#), [Gilmore e Gomory \(1965\)](#) e [Gilmore e Gomory \(1966\)](#) que são eficientes para representar estas duas situações reais.

Algumas modificações nestes modelos foram implementadas em [Morábito \(1994\)](#), com o intuito de incorporar restrições práticas dos processos de corte, tais como: restrições

nos padrões de corte, unidades em estoque com tamanhos e custos unitários diferentes, disponibilidade das unidades de estoque e balanceamento de máquinas e tolerância na demanda dos clientes.

Em [Lizarazo et al. \(2003\)](#), é apresentado uma estratégia global que envolve todas as máquinas que intervêm no processo produtivo em uma indústria de embalagens de papelão. A abordagem é feita utilizando dois estágios fundamentais, o processo de corrugação e o processo de acabamento.

Para programar os pedidos e maximizar a utilização do corrugador, deve-se selecionar rolos mais largos, que proporcionam maior produtividade, sempre minimizando a perda lateral. Outros fatores tem influência direta ou indireta na utilização do corrugador, como por exemplo: a quantidade de pedidos disponíveis para serem processados, as dimensões da placa retangular para cada pedido e as datas de entrega.

O modelo matemático proposto é semelhante ao proposto em [Haessler e Talbot \(1983\)](#), sendo que foram utilizados quatro elementos de solução. A formulação toma cada elemento de solução definido para produzir pedidos completos e existe uma variável de designação que seleciona a melhor solução para completar o pedido, e com este aumento de soluções o modelo se torna mais completo.

Terminado o processo de corrugação, deve-se programar a máquina de acabamento, o que foi feito através de uma heurística. Com a implementação da heurística na indústria, durante um período de operação, foi possível reduzir os tempos de entrega de várias ordens de máquinas usadas. Outro trabalho que utiliza uma abordagem semelhante deve-se a [Bookbinder e Higginson \(1986\)](#).

Em [Savsar e Cogun \(1994\)](#) é apresentado um modelo que utiliza programação linear, com objetivo de minimizar a perda lateral, porém, são consideradas restrições de capacidade de armazenamento em estágios intermediários de conversão dentro da fábrica e de maximização do uso das máquinas de conversão ou acabamento. Este trabalho é o primeiro a trazer estas três considerações simultaneamente. Em [Bolot \(2000\)](#) encontra-se uma extensão do trabalho apresentado por [Savsar e Cogun \(1994\)](#), onde foram retiradas algumas simplificações do modelo, passando-se a considerar por exemplo, o *trade-off* (situação em que existe um conflito de escolhas, no qual a resolução de um problema acarreta outro) entre o perda lateral total e os *setups* dentro de um turno.

Em [Rodríguez e Vecchietti \(2007\)](#) é apresentado um modelo linear para o problema de corte de estoque em uma indústria de embalagens de papelão. O problema é resolvido por uma estratégia de duas fases. Na primeira fase, um modelo gera os padrões de corte,

que serão utilizados na segunda fase, onde um modelo de programação linear inteira mista otimiza o processo de corte, minimizando as perdas laterais. Este trabalho traz um estudo com problemas reais. Para um exemplo contendo 25 ordens houve redução de 30% nos custos com as perdas laterais. O tempo de processamento gasto para encontrar a solução é pequeno e o planejador pode avaliar vários cenários através da manipulação dos valores dos parâmetros em poucos minutos.

Em [Velasquez et al. \(2007\)](#) é proposta uma abordagem para o problema de programação do corrugador utilizando um algoritmo evolutivo multi-objetivo para otimizar o objetivo *WPL* (*weighted planning level*) e os custos. No *WPL*, índices referem-se ao desempenho em relação a data de entrega, gestão de filas nas linhas de acabamento e desempenho relacionado com o cliente. Estes fatores são usados como variáveis de entrada do sistema de inferência fuzzy que calculará o fator de importância para a programação final, de acordo com [Klir e Yuan \(1995\)](#), sendo o fator de importância usado para calcular o índice *WPL* geral. Os custos se referem ao custos de execução, trocas de rolos, trocas de padrões, custo de perda lateral e custos de atualização.

Em [Rodríguez \(2009\)](#) é proposta uma combinação de um algoritmo guloso com um algoritmo genético para lidar com o problema de minimização das perdas laterais. Esta ideia já estava presente em um trabalho semelhante, devido a [Jaramillo, Correa e Jaramillo \(2009\)](#), que aponta que métodos baseados em algoritmos genéticos obtêm resultados melhores que aqueles baseados em programação linear. A abordagem apresentada por [Jaramillo, Correa e Jaramillo \(2009\)](#) utiliza um único cromossoma (os comprimentos), para representar o problema, sendo que esta estratégia foi a utilizada em [Rodríguez \(2009\)](#). Outras propostas, utilizando algoritmos genéticos para problemas de corte nas IEPO podem ser obtidas em [Velasquez et al. \(2007\)](#) e [Hamadeh e Hellström \(2008\)](#).

3.1.3 Problema do sequenciamento dos boletins - Categoria ii

Após a formação dos boletins no PCP, estes ainda devem ser sequenciados. Dependendo do sequenciamento realizado, diferentes aspectos podem ser analisados. Por exemplo, alguns dos boletins contemplam apenas produção parcial de determinados pedidos dos clientes, e neste caso, é necessário manter estas pilhas de produção parcial em uma área de armazenamento intermediária próxima ao corrugador, até que a produção esteja completa. Quando a área de armazenamento intermediária é limitada, minimizar a quantidade destas pilhas torna-se um problema relevante, conhecido como o problema da minimização das pilhas em aberto.

Além deste aspecto, quando se considera as gramaturas das camadas e o tipo de onda do miolo da chapa a ser produzida (determinado pelo tipo de rolo corrugador utilizado), este sequenciamento tem outro impacto importante, em relação ao problema da minimização de trocas de gramaturas e rolos corrugadores. Para tornar mais clara a importância deste sequenciamento, observe a Tabela 2, onde temos a descrição de três boletins, com o comprimento, gramaturas de cada camada e rolo corrugador utilizado.

Tabela 2: Exemplos de três boletins de clientes

	Boletim 1	Boletim 2	Boletim 3
Comprimento(m)	600	500	300
Gramatura da capa superior (g/m^2)	140	120	140
Gramatura do miolo (g/m^2)	120	120	120
Gramatura da capa inferior (g/m^2)	140	120	140
Tipo de onda	A	B	A

Fonte: Autoria Própria

Suponha que a sequência de processamento fosse: boletim 1, boletim 2 e boletim 3. Ao finalizarmos o boletim 1, se houver sobras de bobinas nos porta-bobinas que alimentam a capa superior e a capa inferior, essas bobinas deverão ser devolvidas ao estoque, pois as gramaturas para estas capas são diferentes para o boletim 2, e da mesma forma, se houver sobras nos porta-bobinas que alimentam as capas no fim do processamento do boletim 2, as mesmas deverão ser devolvidas ao estoque, pois as gramaturas das capas do boletim 3 são diferentes do boletim 2, ou seja, teremos que transportar sobras de bobinas (se houver) no final de cada boletim processado. Além disso, haverá troca de rolo corrugador no fim do processamento do boletim 1 e no fim no processamento do boletim 2, e para esta troca ser realizada o corrugador é desligado, o que implica em perda de produtividade.

Por outro lado, suponha que a sequência de processamento fosse: boletim 1, boletim 3 e boletim 2. Nesse caso, teríamos que transportar sobras de bobinas (se houver) apenas após o processamento do boletim 3, pois o boletim 1 e o boletim 3 podem ser unificados, o que gera economia no transporte de bobinas e além disso, facilita a programação. Para essa sequência haverá troca de rolo corrugador apenas no fim do processamento do boletim 3, o que implica em uma perda de produtividade menor.

Além disso, sequências que permitem essa unificação podem reduzir o número de bobinas alocadas, pois geramos boletins maiores para os quais podemos utilizar bobinas maiores, que naturalmente, reduzem o número de alocações. Destaca-se que, caso dois boletins processados sucessivamente não tenham todas as gramaturas iguais, aquelas que forem iguais podem ser agrupadas, minimizando custos de transporte e facilitando a

programação, e isso pode ser feito pois a programação de cada um dos porta-bobinas é feita de forma independente.

O problema de obter a sequência de processamento dos boletins que minimiza as trocas de gramaturas e rolos corrugadores é relevante no processo produtivo da IEPO e será tratado de forma detalhada no Capítulo 4.

3.1.4 Trabalhos com ênfase no problema do sequenciamento dos boletins.

Em [Lins \(1989\)](#) é abordado o problema de sequenciamento de boletins no corrugador com o objetivo de minimizar as pilhas em aberto, este problema é conhecido como o Problema de Minimização das Pilhas em Aberto (PMPA). As pilhas em aberto são aquelas relacionadas as ordens cuja demanda ainda não está completa, e após serem processadas pelo corrugador ainda permanecem em torno dele, aguardando sua finalização. O objetivo do problema é sequenciar os boletins no corrugador de modo que o número máximo de pilhas em aberto seja minimizado, esta minimização é importante uma vez que as áreas de armazenamento das ordens processadas parcialmente é limitado.

Como existem no máximo duas ordens de clientes por operação, [Lins \(1989\)](#) representa como estas ordens são sequenciadas usando um grafo G , onde os vértices são as ordens e as arestas (que conectam as ordens) indicam como os ordens se combinam nos boletins. O autor apresenta uma heurística para se percorrer o grafo G cuja estrutura é relativamente simples. Ao aplicá-la a um conjunto de dados reais, obteve-se em todos os casos testados, um limite superior de tarefas pendentes (ou pilhas), igual a 3. Em 92% dos casos, os valores obtidos foram 1 ou 2, e nestes casos se deduz claramente que estes valores são ótimos. Este é o único trabalho, segundo nosso levantamento, que aborda o PMPA para o caso específico do processo produtivo das IEPO.

Uma generalização das ideias presentes em [Lins \(1989\)](#) pode ser obtida no trabalho de [Becceneri, Yanasse e Soma \(2004\)](#), onde é apresentada uma nova heurística para calcular um limite superior das pilhas em aberto e um método exato, que melhora um método semelhante proposto em [Yanasse \(1997\)](#) e que utiliza a técnica do *branch-and-bound*.

Em [Yuen \(1991\)](#) são apresentadas duas heurísticas para o PMPA no contexto das indústrias de vidro na Austrália. Em [Yuen \(1995\)](#) são apresentadas quatro novas heurísticas, sendo que a terceira, conhecida como *Yuen3* se mostrou a mais eficiente e fácil de implementar.

Um método de três fases para solução do PMPA é apresentado em [Faggioli e Bentivoglio \(1998\)](#). Na primeira, um algoritmo guloso produz uma boa solução inicial, melhorada na segunda fase por meio de uma busca tabu, enquanto que, na última fase, o problema é resolvido utilizando um procedimento de enumeração implícita.

Em 2005, o PMPA foi tema do primeiro Desafio de Modelagem por Restrições conforme [Smith e Gent \(2005\)](#), em que os participantes deveriam modelar o PMPA como um problema de restrições. O modelo vencedor foi proposto por [Banda e Stuckey \(2007\)](#), o qual utiliza pré-processamento de dados e o algoritmo denotado por A^* , para o qual foram propostas 11 heurísticas para obtenção de um limitante superior e uma versão modificada da heurística de contração de arcos apresentada em [Becceneri, Yanasse e Soma \(2004\)](#).

Apesar de estar intimamente ligado ao sequenciamento dos boletins, segundo nosso levantamento, nenhum trabalho abordou o problema de troca de gramaturas e rolos corrugadores.

3.1.5 Problema da produção dos boletins - Categoria iii

Com os boletins formados e sequenciados pelo PCP, eles devem agora serem produzidos e, para tanto, o corrugador deverá então ser alimentado com as bobinas de papel para se iniciar a produção da chapa. Esse processo exige uma programação, feita pelos operadores do corrugador e que compreende a escolha, o transporte e a instalação das bobinas no corrugador. Como cada porta-bobina tem dois pinos, surge neste processo de instalação, um problema de sequenciamento das bobinas nos pinos, evitando por exemplo, que o corrugador pare.

A programação feita pelos operadores do corrugador é realizada na prática sem o apoio de ferramentas de decisão, e busca-se atingir vários objetivos principais, tais como: a minimização das sobras não aproveitáveis, a minimização de paragens do corrugador e a minimização dos consumos parciais (que são mais caros que os consumos integrais, pois exigem a transporte da sobra da bobina até o estoque). O atingimento desses objetivos depende diretamente de quais bobinas são escolhidas e de como elas são alocadas no corrugador.

Todos estes objetivos tem impacto sobre o custo de produção associado à alocação das bobinas no corrugador e a minimização deste custo é o objetivo principal a ser atingido.

Para exemplificar, considere um estoque como o da Tabela [3](#) e suponha que tenhamos um boletim cuja chapa a ser produzida é de papelão de parede simples, de acordo com

a Figura 1, com miolo com tipo de onda B, de acordo com a Tabela 1 e medindo 3000 m. Embora o papelão tenha três camadas, para simplificar, vamos simular a alocação de bobinas para a capa superior apenas.

Tabela 3: Estoque fictício

Código da bobina	Comprimento (m)
B_1	800
B_2	1300
B_3	600
B_4	2200
B_5	550
B_6	420
B_7	730
B_8	1450
B_9	380
B_{10}	850

Fonte: Autoria Própria

Estabeleceremos que sobras menores que 300 m são consideradas não aproveitáveis, de acordo com Chantapornchai e Sathapanawat (2010), que o consumo parcial mínimo em uma bobina deve ser maior ou igual a 450 m e que o valor consumido de uma bobina (integralmente ou parcialmente) para que a troca de sua bobina pareada seja possível sem que o corrugador pare, deve ser no mínimo 750 m.

Nesse caso, poderíamos utilizar as seguintes programações:

Programação 1 - Fazer consumos parciais de 1000 m nas bobinas B_2 , B_4 e B_8 .

Nesse caso, não teríamos sobras não aproveitáveis, não teríamos paragens e teríamos três consumos parciais. O sequenciamento das bobinas nos pinos de cada porta-bobinas (Figura 14) é indiferente, pois a quantidade consumida em cada bobina é maior que 750 m.

Programação 2 - Consumir integralmente as bobinas B_4 e B_{10} .

Nesse caso, teríamos uma sobra não aproveitável, de 50 m, não teríamos paragens e não teríamos consumos parciais. O sequenciamento das bobinas nos pinos de cada porta-bobinas é indiferente, pois a quantidade consumida em cada bobina é maior que 750 m.

Programação 3 - Consumir integralmente as bobinas B_1 e B_4 .

Nesse caso, não teríamos sobra não aproveitável, não teríamos paragens e não teríamos consumos parciais. O sequenciamento das bobinas nos pinos de cada porta-bobinas é

indiferente, pois a quantidade consumida em cada bobina é maior que 750 m.

Programação 4 - Consumir integralmente as bobinas B_4 , B_6 e B_9 .

Nesse caso, não teríamos sobra não aproveitável e não teríamos consumos parciais, porém, em relação ao número de paragens é necessária uma análise mais atenta, pois o sequenciamento das bobinas nos pinos é relevante, como mostraremos a seguir.

Se colocarmos a bobina B_6 no pino 1 e a bobina B_9 no pino 2 e optarmos por iniciar consumindo a bobina B_9 , por exemplo, quando essa for consumida e formos substituí-la pela bobina B_4 , acionaremos a bobina B_6 , mas como essa bobina não suporta a troca da bobina pareada, pois tem comprimento menor que 750 m, teremos uma paragem.

Por outro lado, se colocarmos a bobina B_4 no pino 1 e a bobina B_9 no pino 2, e optarmos por iniciar consumindo a bobina B_9 , por exemplo, quando essa for consumida e formos substituí-la pela bobina B_6 , acionaremos a bobina B_4 , que suporta até quatro substituições de bobinas pareadas, e neste caso, a bobina B_6 é substituída sem que haja paragem no corrugador.

A programação 4 evidenciou que o sequenciamento das bobinas nos pinos impacta diretamente no número de paragens no processamento de cada boletim. Note ainda que o número de paragens em cada boletim é igual a soma do número de paragens em cada porta-bobinas, uma vez que as três camadas no papelão são processadas de forma simultânea e a paragem em um dos porta-bobinas acarreta a paragem de todo o corrugador. Para o sequenciamento das bobinas nos pinos, desenvolvemos uma estratégia que se mostrou eficiente e será apresentada no Capítulo 5.

Uma análise simplificada mostra que das quatro programações, a programação 3 é a melhor, uma vez que nela não houve paragens, nem consumos parciais, nem sobras não aproveitáveis e além disso, apresenta o menor número de bobinas alocadas.

Outros trabalhos como [Abuabara e Morabito \(2008\)](#) e [Abuabara e Morabito \(2009\)](#) abordaram a questão das geração de sobras aproveitáveis na indústria aeronáutica. Outro ponto a se destacar é que ao gerar-se muitas sobras cria-se um problema de gestão de estoque, uma vez que o galpão para armazenamento das sobras é limitado.

Figura 14: Porta-bobinas



Fonte: <http://www.furnax.com.br/p/porta-bobinas>

3.1.6 Trabalhos com ênfase no problema da produção dos boletins.

Nesta tese, abordaremos o problema de programação do uso de bobinas no corrugador, com intuito de minimizar custos de produção. Destacamos que as primeiras e únicas abordagens desse mesmo problema encontram-se em [Chantrapornchai e Sathapanawat \(2010\)](#) e [Chantrapornchai e Sathapanawat \(2011\)](#).

Em [Chantrapornchai e Sathapanawat \(2010\)](#) é descrito pela primeira vez o problema da programação do uso de bobinas no corrugador. O principal interesse do trabalho foi o desenvolvimento de um *software* para o planejamento da produção do processo de corrugação, visando a minimização de sobras não aproveitáveis, o balanceamento do número de rolos utilizados em cada porta-bobinas e a minimização do número de tocos. Como objetivos secundários surgem a minimização do número de rolos em cada plano de execução e a utilização do papel na ordem de envelhecimento.

O esboço de uma heurística foi apresentado, com o objetivo de fornecer a sequência de utilização dos rolos para cada porta-bobinas, obedecendo as restrições e maximizando os objetivos de produção. Uma descrição mais detalhada dessa heurística de sequenciamento das bobinas nos porta-bobinas é apresentada em [Chantrapornchai e Sathapanawat \(2011\)](#).

Paralelamente a esses dois trabalhos foi desenvolvido um *software* que utiliza a heurística para programar o uso das bobinas no corrugador, e além disso, inclui o gerenciamento do estoque e a simulação de um plano para verificar o sequenciamento.

Em [Chantrapornchai e Sathapanawat \(2012\)](#), é apresentado um estudo de caso, onde o *software* que começou a ser desenvolvido com os trabalhos de 2010 e 2011 é implantado e testado com exemplos reais. No ano de 2010, a perda era de 7,27 kg/rolo e em 2011, quando iniciou-se a utilização do *software*, a perda caiu para 5,38 kg/rolo, uma redução de

aproximadamente 26%. Apesar disso, nas operações reais, o sequenciamento muitas vezes não é aplicado devido a razões de estocagem e manipulação. Com intuito de resolver este problema, são apresentadas algumas sugestões, como treinamentos de como armazenar, como manipular e como empilhar os rolos, facilitando a localização e o transporte dos rolos selecionados pelo *software*.

3.1.7 Trabalhos que integram dois tipos de problemas.

Segundo nossa revisão, o único artigo que integrou dois, dos três problemas identificados, deve-se a [Matsumoto, Miwa e Ibaraki \(2009\)](#). Em relação ao problema da formação dos boletins, os objetivos foram a minimização das perdas laterais e a minimização do comprimento dos rolos de papel utilizados, e em relação ao problema do sequenciamento dos boletins no corrugador, o objetivo foi a minimização do número de paragens no corrugador.

Destacamos que [Matsumoto, Miwa e Ibaraki \(2009\)](#) é o primeiro trabalho que aborda a minimização do número de paragens do corrugador, porém, esta minimização é feita considerando as trocas de gramaturas das camadas entre dois boletins, enquanto a abordagem da minimização do número de paragens em [Chantrapornchai e Sathapanawat \(2010\)](#) e [Chantrapornchai e Sathapanawat \(2011\)](#) utiliza essencialmente o comprimento das bobinas e seu sequenciamento nos pinos para cada boletim.

A abordagem em [Matsumoto, Miwa e Ibaraki \(2009\)](#) 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. Na primeira fase busca-se a minimização do comprimento dos rolos de papel utilizados e a minimização das perdas laterais. Na segunda fase, busca-se a minimização do número de paragens do corrugador.

Nos experimentos computacionais, usou-se o CPLEX para resolver o problema de programação inteira, enquanto que o algoritmo de sequenciamento da segunda fase foi escrito na linguagem C, ambos executados em um pentium 4, 2.60 GHz e 780 MB de memória.

Quando priorizou-se a minimização do comprimento total dos rolos de papel em relação a minimização da perda lateral, a solução ótima foi obtida em poucos segundos, mostrando que o comprimento foi minimizado em cerca de 2000 m, enquanto a perda lateral teve um acréscimo de 0.75%.

Quando priorizou-se a minimização da perda lateral em relação a minimização do comprimento total dos rolos, houve também redução na perda lateral às custas de um aumento no comprimento total, mas os resultados neste caso, foram bem mais modestos.

Em relação ao número de paragens no corrugador, os resultados são extremamente pequenos, se comparados aos números obtidos pelos especialistas.

Apresentamos na Tabela 4 um resumo dos artigos analisados e os problemas abordados em cada um deles, de acordo com a classificação proposta nas seções 3.1.1 (categoria i), 3.1.3 (categoria ii) e 3.1.5 (categoria iii). Nessa tese, abordamos dois problemas referentes às categorias (ii) e (iii), que são as mais escassas em relação a contribuições, sendo que um desses problemas ainda não havia sido tratado em nenhum outro trabalho.

Tabela 4: Revisão Bibliográfica

Referência(Ano)	Categoria i		Categoria ii			Categoria iii	
	MPL	MCC	MPA	MP	MTGRC	MSNA	MCP
Pegels (1967)	x						
Hinxman (1980)	x						
Haessler e Talbot (1983)	x						
Bookbinder e Higginson (1986)	x						
Lins (1988)	x						
Lins (1989)			x				
Yuen (1991)			x				
Morábito (1994)	x						
Savsar e Cogun (1994)	x						
Yuen (1995)			x				
Yanasse (1997)			x				
Faggioli e Bentivoglio (1998)			x				
Bolat (2000)	x						
Lizarazo et al. (2003)	x						
Becceneri, Yanasse e Soma (2004)			x				
Banda e Stuckey (2007)			x				
Rodríguez e Vecchietti (2007)	x						
Velasquez et al. (2007)	x						
Hamadeh e Hellström (2008)	x						
Jaramillo, Correa e Jaramillo (2009)	x						
Rodríguez (2009)	x						
Matsumoto, Miwa e Ibaraki (2009)	x	x		x			
Chantrapornchai e Sathapanawat (2010)				x		x	
Chantrapornchai e Sathapanawat (2011)				x		x	
Chantrapornchai e Sathapanawat (2012)				x		x	

Legenda: MPL: Minização da perda lateral, MCC: Minimização do comprimento da chapa, MPA: Minização de pilhas em aberto, MP: Minimização das paragens, MTGRC: Minimização das trocas de gramaturas e rolos corrugadores, MSNA: Minimização das sobras não aproveitáveis, MCP: Minimização dos consumos parciais.

Fonte: Autoria Própria

Nesse capítulo propomos uma classificação dos diversos problemas de P.O presentes no processo produtivo das IEPO em três categorias: problemas de formação, problemas de sequenciamento e problemas de produção dos boletins. Apresentamos também uma revisão bibliográfica voltada para as IEPO a qual evidenciou que os problemas que serão estudados nessa tese ainda não haviam sido tratados adequadamente, o que será feito nos capítulos 4 e 5.

Capítulo 4

O Problema de Minimização de Trocas de Gramaturas e Rolos Corrugadores

Neste capítulo definiremos detalhadamente o Problema de Troca de Gramaturas e Rolos Corrugadores (PMTGRC) e apresentaremos quatro modelos de programação inteira capazes de representá-lo. Descreveremos também o processo de geração de dados para os testes computacionais, que foi baseado em dados reais do processo produtivo das IEPO. Finalizaremos apresentando resultados computacionais que avaliam a eficiência dos modelos propostos, incluindo uma comparação com resultados obtidos na prática.

4.1 Descrição do problema

Os boletins determinados pelo PCP trazem uma série de informações, tais como: tipo de papelão (Figura 1), o comprimento da chapa a ser produzida, a gramatura das camadas e o tipo de onda utilizada no miolo (Tabela 1).

Para maior clareza, sintetizamos na Tabela 5 abaixo alguns exemplos.

Tabela 5: Exemplos de boletins com suas principais informações

Boletim	Tipo de papelão	Comprimento	Gramatura de cada camada	Tipo de onda do(s) miolo(s)
1	Parede simples	14500 m	(120,100,120)	(B)
2	Parede dupla	21220 m	(120,100,120,100,120)	(A,B)
3	Parede dupla	17907 m	(160,120,160,120,160)	(B,A)
4	Parede simples	12389 m	(140,120,140)	(A)
5	Parede dupla	9565 m	(140,100,140,100,140)	(B,B)

Fonte: Autoria Própria

Na Tabela 5, o conjunto (120,100,120) relativo ao boletim 1, indica a gramatura das

três camadas do papelão de parede simples, sendo 100 a gramatura do miolo e 120 as gramaturas das capas. Da mesma forma, o conjunto (160,120,160,120,160) relativo ao boletim 3 indica as gramaturas das cinco camadas do papelão de parede dupla, sendo 120 as gramaturas dos miolos e 160 as gramaturas das capas.

O conjunto (B), relativo ao boletim 1, indica o tipo de onda do miolo no caso de papelão de parede simples e o conjunto (B,A), relativo ao boletim 3, indica o tipo de onda de cada miolo do papelão de parede dupla. Para o miolo, teremos duas informações associadas, a gramatura e o tipo de onda. Para simplificarmos o problema, consideraremos dois porta-bobinas adicionais fictícios, associados ao tipo de onda dos miolos, em termos práticos, o boletim 2, por exemplo, seria denotado por (120,100,120,100,120,A,B). Estes conjuntos são ordenados, ou seja, as gramaturas e os tipos de ondas indicados devem ser utilizadas exatamente na ordem proposta.

A forma que esses boletins são sequenciados no momento de sua produção determinará o número de trocas de gramaturas e o número de trocas de rolos corrugadores. Se, quando finaliza-se um boletim em um determinado porta-bobinas, tem-se um toco cuja gramatura é diferente daquela que deverá ser utilizada no próximo boletim, este toco deve ser devolvido ao estoque, o que implica em custo de transporte. Da mesma forma, se dois boletins subsequentes tem tipos de ondas diferentes, o rolo corrugador (que imprime a onda no papel) deve ser substituído, e essa troca implica em perda de produtividade, pois o corrugador deve ser desligado durante a substituição.

Encontrar o melhor sequenciamento dos boletins de forma a minimizar as trocas de gramaturas e rolos corrugadores é um problema relevante no processo produtivo, pois tem impacto nos custos de produção e na produtividade e denominado O Problema de Minimização de Trocas de Gramaturas e Rolos Corrugadores (PMTGRC).

Por exemplo, na Tabela 5 considere a produção dos boletins 2, 3 e 5, nesta ordem, teremos então 10 trocas de gramaturas e 3 trocas de rolos corrugadores, já para a sequência 2, 5 e 3, teremos 8 trocas de gramaturas e 2 trocas de rolo corrugador.

Nessa tese interpretamos o PMTGRC como uma adaptação de um problema clássico da literatura, que é o Problema de Minimização de Troca de Ferramentas, para o qual apresentamos na próxima seção uma pequena introdução, bem como, duas formulações propostas na literatura.

4.2 O problema de minimização de trocas de ferramentas - PMTF

O PMTF tem como objetivo o sequenciamento de um conjunto de tarefas $T = \{1, \dots, n\}$ em uma máquina flexível de manufatura, cujo *magazine* (compartimento de ferramentas) comporta no máximo C ferramentas. Para que uma tarefa j seja processada, as ferramentas pertencentes ao conjunto F_j (conjunto das ferramentas requeridas pela tarefa j) devem ser alocadas na máquina. Dessa forma, como o número l de ferramentas necessárias para a realização de todas as tarefas é geralmente maior que C , serão necessárias trocas durante o processo produtivo e $l - C$ é um limitante trivial do problema. Para $l \leq C$ não são necessárias trocas. Outras propostas de limitantes podem ser obtidas em Laporte, Salazar-Gonzalez e Semet (2004) e Yanasse (2007). Quanto a complexidade, para $C \geq 2$, o PMTF pertence à classe dos problemas NP-difíceis, segundo Tang e Denardo (1988).

Apresentaremos duas propostas de formulação para o PMTF. A primeira sugerida por Tang e Denardo (1988) (TD) está descrita a seguir, com a notação adaptada para o presente texto.

Considere os seguintes índices, parâmetros e variáveis:

Índices:

- $k = 1, \dots, n$, onde k indica a posição da tarefa no sequenciamento e n representa o número total de tarefas.

Parâmetros:

- T : Conjunto das tarefas.
- F : Conjunto de ferramentas
- T_t : Conjunto das tarefas que requerem a ferramenta t .

Variáveis:

- W_{jk} : Variável binária. Vale 1 se a tarefa j é processada na k -ésima posição do sequenciamento e vale 0 caso contrário.

- Y_{kt} : Variável binária. Vale 1 se a ferramenta t esta alocada na máquina durante o processamento da k -ésima tarefa e vale 0 caso contrário.
- Z_{kt} : Variável binária. Vale 1 se a ferramenta t participa do processamento da k -ésima tarefa, mas não no processamento da $(k - 1)$ -ésima tarefa e vale 0 caso contrário.

O modelo proposto é o seguinte:

Função Objetivo:

$$\min \sum_{k=2}^n \sum_{t \in F} Z_{kt} \quad (4.1)$$

Restrições:

$$\sum_{j \in T} W_{jk} = 1 \quad ; \quad k = 1, \dots, n. \quad (4.2)$$

$$\sum_{k=1}^n W_{jk} = 1 \quad ; \quad j \in T. \quad (4.3)$$

$$\sum_{j \in T_t} W_{jk} \leq Y_{kt} \quad ; \quad t \in F, k = 1, \dots, n. \quad (4.4)$$

$$\sum_{t \in F} Y_{kt} \leq C \quad ; \quad k = 1, \dots, n. \quad (4.5)$$

$$Y_{kt} - Y_{kt-1} \leq Z_{kt} \quad ; \quad t \in F, k = 2, \dots, n. \quad (4.6)$$

$$W_{jk}, Y_{kt}, Z_{kt} \in \{0, 1\}, \quad j \in T, \quad t \in F, \quad k = 1, \dots, n \quad (4.7)$$

A função objetivo (4.1) visa minimizar o número de trocas de ferramentas. As restrições (4.2) e (4.3) dizem respeito à designação das tarefas, impondo que todas as tarefas devem ser processadas, uma por vez. As restrições (4.4) garantem que todas as ferramentas requeridas por uma tarefa estejam na máquina no início do seu processamento. As restrições (4.5) impõem que a capacidade C do compartimento de ferramentas deve ser respeitada. As restrições (4.6) computam as trocas de ferramentas entre tarefas consecutivas.

tivas. Em (4.7) temos os domínios das variáveis.

Para um exemplo relativamente pequeno ($n = 10, l = 9$ e $C = 4$), em Tang e Denardo (1988) foi avaliado o esforço computacional para a modelagem apresentada, os quais não apresentaram resultados satisfatórios utilizando um tempo médio de 12 minutos. Esse desempenho é justificado em Laporte, Salazar-Gonzalez e Semet (2004) como consequência da baixa qualidade da relaxação linear que resulta num limitante inferior igual a zero, conforme Proposição 5.2.1 retirada de Moreira [40].

Proposição 5.2.1. Se $W_{jk} = \frac{1}{n}$, $\forall j \in T$ e $k = 1, \dots, n$, então o modelo (TD) relaxado admite solução que não requer trocas de ferramentas.

Prova. Ao supormos que $W_{jk} = \frac{1}{n}$, $\forall j \in T$ e $k = 1, \dots, n$, satisfazemos as restrições (4.2) e (4.3) de designação, e a restrição (4.4) nos leva a

$$\sum_{j \in T_t} \frac{1}{n} \leq Y_{kt} \quad ; \quad \forall t \in F, k = 1, \dots, n \Rightarrow \frac{|T_t|}{n} \leq Y_{kt} \quad ; \quad \forall t \in F, k = 1, \dots, n.$$

Definamos então $Y_{kt} = \frac{|T_t|}{n}$, $\forall j \in T$ e $k = 1, \dots, n$. Isso é possível pois o restante das restrições são respeitadas. Quanto as restrições (4.5), basta observarmos que no máximo C ferramentas podem ser requeridas para todas as n tarefas, portanto $\sum_{t \in F} |T_t| \leq n \cdot C, \forall k = 1, \dots, n$. Sendo assim, a restrição (4.6) unida ao objetivo de minimização nos leva a $Z_{kt} = 0, \forall j \in T$ e $k = 1, \dots, n$. ■

Uma outra formulação, que utiliza a estrutura do problema do caixeiro viajante, foi proposta por Laporte, Salazar-Gonzalez e Semet (2004). Nessa abordagem, após inserir uma tarefa fictícia $\{0\}$, que represente o começo e o fim das operações, a sequência de processamento das tarefas representa um *tour*. A semântica de alguns parâmetros e variáveis nesta formulação é diferente do modelo proposto por Tang e Denardo (1988), pois tratam da consecutividade de pares de boletins e não mais da posição dos boletins na ordem de processamento. O modelo esta detalhado abaixo.

Considere os seguintes índices, parâmetros e variáveis:

Índices:

- $k = 1, \dots, n$, onde k indica a posição da tarefa no *tour* e n representa o número total de tarefas.

Parâmetros:

- T : Conjunto das tarefas.
- F : Conjunto de ferramentas.
- F_k : Conjunto de ferramentas requeridas pela tarefa k .

Variáveis:

- X_{kr} : Variável binária. Vale 1 se a tarefa k é seguida pela tarefa r .
- Y_{kt} : Variável binária. Vale 1 se a ferramenta t está alocada na máquina durante o processamento da tarefa k e vale 0 caso contrário.
- Z_{kt} : Variável binária. Vale 1 se a ferramenta t é inserida na máquina no momento do processamento da tarefa k e vale 0 caso contrário.

O modelo proposto é o seguinte:

Função Objetivo:

$$\min \sum_{k=1}^n \sum_{t \in F_k} Z_{kt} \quad (4.8)$$

Restrições:

$$\sum_{r=0, r \neq k}^n X_{kr} = 1 \quad ; \quad k = 0, \dots, n. \quad (4.9)$$

$$\sum_{k=0, k \neq r}^n X_{kr} = 1 \quad ; \quad r = 0, \dots, n. \quad (4.10)$$

$$Y_{kt} = 1 \quad ; \quad k = 1, \dots, n, t \in F_k. \quad (4.11)$$

$$\sum_{t \in F} Y_{kt} \leq C \quad ; \quad k = 1, \dots, n. \quad (4.12)$$

$$X_{kr} + Y_{rt} - Y_{kt} \leq Z_{rt} + 1 \quad ; \quad k = 0, \dots, n, r = 1, \dots, n, t \in F. \quad (4.13)$$

$$\sum_{k,r \in S} X_{kr} \leq |S| - 1 \quad ; \quad k, r \in S \subset \{0, 1, \dots, n\}. \quad (4.14)$$

$$Z_{kt} = 0 \quad ; \quad k = 1, \dots, n, t \in F \setminus F_k. \quad (4.15)$$

$$X_{kr}, Y_{kt}, Z_{kt} \in \{0, 1\}, \quad t \in F, \quad k = 0, \dots, n, \quad r = 0, \dots, n, \quad (4.16)$$

A função objetivo (4.8) visa minimizar o número de trocas de ferramentas. As restrições (4.9) e (4.10) dizem respeito à designação das tarefas, impondo que todas as tarefas devem ser processadas, uma por vez. As restrições (4.11) garantem a alocação de uma ferramenta sempre que esta for requerida por uma tarefa. As restrições (4.12) garantem que a capacidade do magazine é respeitada. As restrições (4.13) se referem a contagem das trocas de ferramentas, pois se uma determinada ferramenta t não está na máquina para o processamento da tarefa k , e nem foi inserida para o processamento da tarefa r , então esta não pode seguir aquela e requerer a ferramenta t ao mesmo tempo. As restrições (4.14) garantem que não há formação de subciclos. As restrições (4.15) tratam da eliminação de simetrias, proibindo que uma determinada ferramenta seja alocada sem ser necessária para a próxima tarefa. Em (4.16) temos o domínio das variáveis.

As restrições (4.14) propostas por Dantzig, Fulkerson e Johnson (1954) e denotadas por (DFJ) tratam da eliminação de subciclos, porém, existem outros conjuntos de restrições como o proposto por Miller, Tucker e Zemlin (1960) e que denotaremos por (MTZ).

Na próxima Seção apresentaremos as adaptações realizadas nesses modelos e que são capazes de representar o PMTGRC.

4.3 Modelos para o PMTGRC

Destacamos que há uma correspondência entre o PMTF e o PMTGRC, onde as tarefas serão representadas pelos boletins, as ferramentas serão representadas pelas gramaturas e rolos corrugadores e o *magazine* será representado pelos porta-bobinas. Destaca-se que as ferramentas podem ocupar qualquer lugar vago no *magazine*, porém, para o PMTGRC, as gramaturas e rolos corrugadores tem lugares fixos em determinados porta-bobinas, já pré-estabelecidos pelo PCP, o que torna a estrutura dos problemas diferente e obriga adaptações nos modelos já propostos para o PMTF.

Antes de apresentar os modelos considere as seguintes observações que serão importantes para a definição das funções objetivo dos modelos propostos. Supondo que uma troca de gramatura implique que a sobra da bobina seja devolvida ao estoque, o custo associado a essa troca equivale ao custo de um consumo parcial que vale R\$ 9,46 e para a troca de rolo corrugador, em que deve-se parar o corrugador o que consome em média 5 minutos, gera-se uma perda de produtividade de R\$ 2402,10. Baseado nesses valores estabelecemos a relação de pesos entre troca de gramaturas e trocas de rolos corrugadores, na razão de 1:250. Observa-se que os valores para tais custos são detalhados no Capítulo 5.

De acordo com o exposto na Tabela 5, as instâncias serão denotadas sempre por um conjunto de 7 valores, como por exemplo, (120,100,120,100,120, A, B) que indicará um papelão de parede dupla, no qual as duas últimas entradas estarão reservadas para os tipos de ondas dos miolos. No caso de um papelão de parede simples, indicaremos por (120, 100, 120, -, - , A, -), onde (-) indica que não há elemento para aquela entrada. Com isto, todas as trocas associadas aos três (no caso de papelão de parede simples) ou aos cinco (no caso de papelão de parede dupla) os primeiros elementos terão peso 1, pois indicarão trocas de gramaturas e todas as trocas associadas às duas últimas entradas, terão peso 250 pois indicarão trocas associadas aos rolos corrugadores. Observa-se que nos modelos propostos não considera-se a miatura de boletins com 3 e 5 camadas.

4.3.1 Modelo 1

O modelo de programação inteira proposto a seguir foi baseado no proposto por Tang e Denardo (1988).

Considere os seguintes índices, parâmetros e variáveis:

Índices:

- $k = 1, \dots, n$, onde k indica a posição do boletim no sequenciamento e n representa o número total de boletins.

Parâmetros:

- T : Conjunto dos boletins.
- F : Conjunto com tipos de gramaturas e tipos de rolos corrugadores.

- P : Conjunto dos porta-bobinas.
- T_{tp} : Conjunto de boletins que utilizam gramatura ou o rolo corrugador t no porta-bobinas p .

Variáveis:

- W_{jk} : Variável binária. Vale 1 se o boletim j é processado na k -ésima posição do sequenciamento e vale 0 caso contrário.
- Y_{pkt} : Variável binária. Vale 1 se a gramatura ou o rolo corrugador t está alocado no porta-bobina p durante o processamento do k -ésimo boletim e vale 0 caso contrário.
- Z_{pkt} : Variável binária. Vale 1 se a gramatura ou o rolo corrugador t está alocado no porta-bobina p durante o processamento do k -ésimo boletim, mas não no processamento do $(k - 1)$ -ésimo boletim e vale 0 caso contrário.

O modelo proposto é o seguinte (**Modelo 1**):

Função Objetivo:

$$\min \sum_{p=1}^5 \sum_{k=2}^n \sum_{t \in F} Z_{pkt} + \sum_{p=6}^7 \sum_{k=2}^n \sum_{t \in F} 250 \cdot Z_{pkt} \quad (4.17)$$

Restrições:

$$\sum_{j \in T} W_{jk} = 1 \quad ; \quad k = 1, \dots, n. \quad (4.18)$$

$$\sum_{k=1}^n W_{jk} = 1 \quad ; \quad j \in T. \quad (4.19)$$

$$\sum_{j \in T_{tp}} W_{jk} \leq Y_{pkt} \quad ; \quad t \in F, p \in P, k = 1, \dots, n. \quad (4.20)$$

$$\sum_{t \in F} Y_{pkt} = 1 \quad ; \quad p \in P, k = 1, \dots, n. \quad (4.21)$$

$$Y_{pkt} - Y_{pkt-1} \leq Z_{pkt} \quad ; \quad t \in F, p \in P, k = 2, \dots, n. \quad (4.22)$$

$$W_{jk}, Y_{pkt}, Z_{pkt} \in \{0, 1\}, \quad j \in T, \quad t \in F, p \in P, k = 1, \dots, n. \quad (4.23)$$

A função objetivo (4.17) visa minimizar o número de trocas de gramaturas (primeira parcela) e rolos corrugadores (segunda parcela). As restrições (4.18) e as restrições (4.19) dizem respeito à designação dos boletins, impondo que todos os boletins devem ser processados, um por vez. As restrições (4.20) garantem que as gramaturas ou rolos corrugadores de cada boletim estão nos devidos porta-bobinas antes do processamento do boletim. As restrições (4.21) garantem que para cada um dos porta-bobinas temos um único tipo de gramatura ou rolo corrugador. As restrições (4.22) computam as trocas de gramaturas e rolos corrugadores de dois boletins consecutivos. Em (4.23) temos os domínios das variáveis.

A proposição 5.2.1 pode ser estendida para o contexto do PMTGRC no **Modelo 1**, conforme detalhamos na proposição abaixo, onde utilizamos $C = 1$, pois no caso do PMTGRC em cada corrugador pode-se usar apenas um tipo de gramatura.

Proposição 5.3.1. Se $W_{jk} = \frac{1}{n}, \forall j \in T$ e $k = 1, \dots, n$, então o **Modelo 1** relaxado admite solução que não requer trocas de gramaturas ou rolos corrugadores.

Prova. Ao supormos que $W_{jk} = \frac{1}{n}, \forall j \in T$ e $k = 1, \dots, n$, satisfazemos as restrições (4.18) e (4.19) de designação, e a restrição (4.20) nos leva a

$$\sum_{j \in T_{tp}} \frac{1}{n} \leq Y_{pkt} ; \quad \forall t \in F, p \in P, k = 1, \dots, n \Rightarrow \frac{|T_{tp}|}{n} \leq Y_{pkt} ; \quad \forall t \in F, p \in P, k = 1, \dots, n.$$

Seja $Y_{pkt} = \frac{|T_{tp}|}{n}, \forall j \in T, p \in P, k = 1, \dots, n$. Isso é possível pois o restante das restrições são respeitadas. As restrições (4.21) são satisfeitas, pois $\sum_{t \in F} \frac{|T_{tp}|}{n} = \frac{|T_{1p}|}{n} + \frac{|T_{2p}|}{n} + \dots + \frac{|T_{np}|}{n} = \frac{n}{n} = 1, \forall p \in P$ e $\forall k = 1, \dots, n$. Sendo assim, a restrição (4.22) unida ao objetivo de minimização nos leva a $Z_{kt} = 0, \forall j \in T$ e $k = 1, \dots, n$. ■

4.3.2 Modelo 2

No intuito de obter resultados computacionais melhores, propomos um outro modelo, baseado em Laporte, Salazar-Gonzalez e Semet (2004) e que como o tal, utiliza a estrutura do problema do caixeiro viajante, na qual após inserir um boletim fictício $\{0\}$, que represente o começo e o fim das operações, a sequência de processamento dos boletins representa um *tour*. A semântica das variáveis nessa formulação trata da consecutividade

de pares de boletins. O modelo a seguir será denotado por **Modelo 2**.

Considere os seguintes índices, parâmetros e variáveis:

Índices:

- $k = 1, \dots, n$, onde k indica a posição do boletim no *tour* e n representa o número total de boletins.

Parâmetros:

- T : Conjunto dos boletins.
- F : Conjunto com tipos de gramaturas e tipos de rolos corrugadores.
- P : Conjunto dos porta-bobinas.
- F_{pk} : Gramatura ou rolo corrugador requerido pelo boletim k no porta-bobinas p .

Variáveis:

- X_{kr} : Variável binária. Vale 1 se o boletim k é seguido pelo boletim r .
- Y_{pkt} : Variável binária. Vale 1 se a gramatura ou o rolo corrugador t está alocado no porta-bobina p durante o processamento do k -ésimo boletim e vale 0 caso contrário.
- Z_{pkt} : Variável binária. Vale 1 se a gramatura ou o rolo corrugador t é inserido no porta-bobina p durante o processamento do k -ésimo boletim e vale 0 caso contrário.

O modelo proposto é o seguinte (**Modelo 2**):

Função Objetivo:

$$\min \sum_{p=1}^5 \sum_{k=2}^n \sum_{t \in F_{pk}} Z_{pkt} + \sum_{p=6}^7 \sum_{k=2}^n \sum_{t \in F_{pk}} 250 \cdot Z_{pkt} \quad (4.24)$$

Restrições:

$$\sum_{r=0, k \neq r}^n X_{kr} = 1 \quad ; \quad k = 0, \dots, n. \quad (4.25)$$

$$\sum_{k=0, k \neq r}^n X_{kr} = 1 \quad ; \quad r = 0, \dots, n. \quad (4.26)$$

$$Y_{pkt} = 1 \quad ; \quad p \in P, k = 1, \dots, n, t \in F_{pk}. \quad (4.27)$$

$$Y_{pkt} = 0 \quad ; \quad p \in P, k = 1, \dots, n, t \in F \setminus F_{pk}. \quad (4.28)$$

$$X_{kr} + Y_{prt} - Y_{pkt} \leq Z_{prt} + 1 \quad ; \quad p \in P, k = 0, \dots, n, r = 1, \dots, n, t \in F. \quad (4.29)$$

$$\sum_{k,r \in S} X_{kr} \leq |S| - 1 \quad ; \quad k, r \in S \subset \{0, 1, \dots, n\}. \quad (4.30)$$

$$\sum_{t \in F \setminus F_{pk}} Z_{pkt} = 0 \quad ; \quad p \in P, k = 1, \dots, n. \quad (4.31)$$

$$X_{kr}, Y_{pkt}, Z_{pkt} \in \{0, 1\}, \quad p \in P, \quad k = 1, \dots, n, \quad r = 1, \dots, n, \quad t \in F. \quad (4.32)$$

A função objetivo (4.24) visa minimizar o número de trocas de gramaturas (primeira parcela) e rolos corrugadores (segunda parcela). As restrições (4.25) e (4.26) dizem respeito à designação dos boletins, impondo que todos os boletins devem ser processados, um por vez. As restrições (4.27) garantem que toda gramatura requerida por um boletim em um determinado porta-bobinas será alocada. As restrições (4.28) garantem que nenhuma outra gramatura ou rolo corrugador diferente da estabelecida, pode ser alocada em um determinado porta-bobinas. As restrições (4.29) se referem a contagem das trocas de gramaturas ou rolos corrugadores, pois se uma determinada gramatura ou rolo corrugador t não está no porta-bobinas p para o processamento do boletim k , e nem foi inserida para o processamento do boletim r , então esta não pode seguir aquela e requerer a gramatura ou rolo corrugador t ao mesmo tempo. As restrições (4.30), DFJ, garantem que não há formação de subciclos. As restrições (4.31) tratam da eliminação de simetrias, proibindo que uma determinada gramatura ou rolo corrugador seja alocada sem ser necessária para o próximo boletim. Em (4.32) temos o domínio das variáveis.

4.3.3 Modelo 3

Se substituirmos as restrições (4.30) do Modelo 2, pelas restrições (4.39) e (4.40) de eliminação de sub-rotas propostas por Miller, Tucker e Zemlin (1960), adaptadas para o caso em que temos um vértice (boletim) fictício, obtemos o modelo seguinte, denotado por (Modelo 3):

Variáveis Adicionais:

- U_k : Variável inteira ≥ 1 e $\leq n + 1$. Variável auxiliar utilizada na eliminação de sub-rotas.

Função Objetivo:

$$\min \sum_{p=1}^5 \sum_{k=2}^n \sum_{t \in F_{pk}} Z_{pkt} + \sum_{p=6}^7 \sum_{k=2}^n \sum_{t \in F_{pk}} 250 \cdot Z_{pkt} \quad (4.33)$$

Restrições:

$$\sum_{r=0, r \neq j}^n X_{kr} = 1 \quad ; \quad k = 0, \dots, n. \quad (4.34)$$

$$\sum_{k=0, k \neq r}^n X_{kr} = 1 \quad ; \quad r = 0, \dots, n. \quad (4.35)$$

$$Y_{pkt} = 1 \quad ; \quad p \in P, k = 1, \dots, n, t \in F_{pk}. \quad (4.36)$$

$$Y_{pkt} = 0 \quad ; \quad p \in P, k = 1, \dots, n, t \in F \setminus F_{pk}. \quad (4.37)$$

$$X_{kr} + Y_{prt} - Y_{pkt} \leq Z_{prt} + 1 \quad ; \quad p \in P, k = 0, \dots, n, r = 1, \dots, n, t \in F. \quad (4.38)$$

$$U_k - U_r + (n + 1) \cdot X_{kr} \leq n \quad ; \quad k, r = 1, \dots, n, k \neq r. \quad (4.39)$$

$$1 \leq U_k \leq n + 1 \quad ; \quad k = 1, \dots, n. \quad (4.40)$$

$$\sum_{t \in F \setminus F_{pk}} Z_{pkt} = 0 \quad ; p \in P, k = 1, \dots, n. \quad (4.41)$$

$$X_{kr}, Y_{pkt}, Z_{pkt} \in \{0, 1\}, U_k \in \mathbb{Z}, p \in P, k = 1, \dots, n, r = 1, \dots, n, t \in F. \quad (4.42)$$

Enquanto o número de restrições em (4.30) era exponencial, o número de restrições em (4.39) e (4.40) é polinomial.

4.3.4 Modelo 4

Neste modelo utilizamos a estrutura do problema do caixeiro viajante associada a um pré-processamento, onde dados dois boletins quaisquer de um conjunto com n boletins, calculamos antecipadamente o número de trocas no processamento de quaisquer dois boletins subsequentes escolhidos a partir desse conjunto, isto nos permite eliminar as variáveis Y_{pkt} e Z_{pkt} e as restrições (4.36), (4.37), (4.38) e (4.41) (Modelo 3), pois tais variáveis e restrições estão relacionadas ao computo das trocas, o que não é mais necessário no Modelo 4. Destacando que dados dois boletins, a ordem em que eles são processados não altera o número de trocas de gramaturas ou rolos corrugadores, o número de pares de boletins a serem analisados no pré-processamento para um conjunto com n boletins se reduz a um cálculo combinatório simples, a saber, $C_{n,2} = \frac{n \cdot (n-1)}{2}$. A função co associa 1 quando há troca de gramatura ou rolo corrugador para um determinado porta-bobinas entre dois boletins e 0 caso contrário.

Considere os seguintes índices, parâmetros e variáveis:

Índices:

- $k = 1, \dots, n$, onde k indica a posição do boletim no *tour* e n representa o número total de boletins.

Parâmetros:

- co_{pkr} : Indica se há troca de gramatura ou rolo corrugador entre dois boletins consecutivos k e r no porta-bobinas p .

Variáveis:

- X_{kr} : Variável binária. Vale 1 se o boletim k é seguido pelo boletim r .
- U_k : Variável inteira ≥ 0 e $\leq n$. Variável auxiliar utilizada na eliminação de sub-rotas, onde U_k determina a ordem em que o vértice k é visitado no tour.

O modelo proposto é o seguinte (**Modelo 4**):

Função Objetivo:

$$\min \sum_{p=1}^5 \sum_{k=1}^n \sum_{r=1}^k CO_{pkr} \cdot X_{kr} + \sum_{p=6}^7 \sum_{k=1}^n \sum_{r=1}^k 250 \cdot CO_{pkr} \cdot X_{kr} \quad (4.43)$$

Restrições:

$$\sum_{r=0, k \neq r}^n X_{kr} = 1 \quad ; \quad k = 0, \dots, n. \quad (4.44)$$

$$\sum_{k=0, k \neq r}^n X_{kr} = 1 \quad ; \quad r = 0, \dots, n. \quad (4.45)$$

$$U_k - U_r + (n - 1) \cdot X_{kr} + (n - 3) \cdot X_{rk} \leq n - 2 \quad ; \quad k = 2, \dots, n, \quad r = 2, \dots, n. \quad (4.46)$$

$$1 + (n - 3) \cdot X_{k1} + \sum_{r=2}^n X_{rk} \leq U_k \quad ; \quad k = 2, \dots, n. \quad (4.47)$$

$$n - 1 - (n - 3) \cdot X_{1k} - \sum_{r=2}^n X_{kr} \geq U_k \quad ; \quad k = 2, \dots, n. \quad (4.48)$$

$$X_{kr}, U_k \in \mathbb{Z}, \quad p \in P, \quad k = 1, \dots, n, \quad r = 1, \dots, n. \quad (4.49)$$

A função objetivo (4.43) visa minimizar o número de trocas de gramaturas (primeira parcela) e rolos corrugadores (segunda parcela). As restrições (4.44) e (4.45) dizem respeito à designação dos boletins, impondo que todos os boletins devem ser processados, um por vez. As restrições (4.46), (4.47) e (4.48) são as restrições de eliminação de sub-rotas de ordem polinomial propostas por Desrochers e Laporte (1991) e que são uma melhoria das restrições propostas por Miller, Tucker e Zemlin (1960). As restrições (4.46) fortalecem as restrições MTZ utilizando a técnica do lifting e as restrições (4.47) e (4.48) são inequações

válidas para o MTZ, que juntas fortalecem a relaxação linear. Em (4.49) temos o domínio das variáveis.

4.4 Resultados computacionais

Nesta seção apresentamos uma série de testes computacionais com instâncias geradas com base em dados reais. Inicialmente, descrevemos os principais parâmetros utilizados na criação do gerador de instâncias, desenvolvido na linguagem Java. Comparamos as soluções obtidas pelos quatro modelos propostos e, além disso, comparamos as soluções obtidas via modelo com soluções reais e processadas na prática para um conjunto de instâncias obtidas na IEPO visitada.

Os testes computacionais foram realizados utilizando um computador com processador Intel Core i7-2600, CPU de 3.4 GHz e 16 GB memória RAM. Os modelos foram escritos em AMPL e resolvidos com o CPLEX 12.7. O tempo máximo de processamento foi fixado em 600 segundos para cada instância.

4.4.1 Geração e caracterização dos dados

O primeiro desafio em relação a esses testes computacionais foi a geração de um conjunto de instâncias capaz de representar adequadamente o cenário encontrado na IEPO visitada. Como citado anteriormente, o PMTGRC é similar ao PMTF, para o qual já existia um conjunto de instâncias propostas inicialmente por Crama, Oerlemans e Spieksma (1994) e posteriormente por Yanasse, Rodrigues e Senne (2009) e disponibilizadas no sítio: www.feg.unesp.br/~elfsenne/instances. Devido às características próprias do PMTGRC não foi possível a utilização direta destas instâncias, porém a essência do processo de geração, descrita em Moreira (2016) foi aproveitada.

Para o PMTF existem três parâmetros fundamentais: tarefas, ferramentas e capacidade do *magazine* e, devido a semelhança como o PMTGRC, foi possível estabelecer um paralelo utilizando os seguintes parâmetros: boletins, gramaturas/rolos corrugadores e quantidade de porta-bobinas.

Estabelecemos três grupos de testes denotados por 1, 2 e 3, que indicam respectivamente, a programação de um, dois ou três turnos de 8 horas de trabalho e como em cada turno processa-se em média, de 8 a 10 boletins, a quantidade mínima e máxima de boletins em cada grupo também ficou definida. Fixamos em 10 o número de instâncias geradas em cada grupo, em seguida, escolhemos o tipo de papelão a ser produzido, indicando a

opção de instâncias com apenas papelão de parede simples por (S) e apenas papelão de parede dupla por (D). Finalmente, geramos aleatoriamente os tipos de gramaturas e os rolos corrugadores para cada instância. Na tela do gerador podemos fixar o grupo que queremos gerar, a quantidade de instâncias que serão geradas em cada grupo e os tipos de papelão a serem produzidos. A Tabela 6, traz um resumo dessas informações.

Tabela 6: Características das instâncias do PMTGRC

Grupos	Quantidade de boletins	Tipos de papelão	Tipos de Gramaturas ou Rolos Corrugadores
1	08 a 10	S, D	100, 120, 140, 160, 180, 200, A, B, C, E
2	16 a 20	S, D	100, 120, 140, 160, 180, 200, A, B, C, E
3	24 a 30	S, D	100, 120, 140, 160, 180, 200, A, B, C, E

Fonte: Autoria Própria

Consideramos então os seguintes parâmetros fundamentais:

a) Grupos - definimos três tipos de grupos: 1, que indica a programação de um turno de trabalho; 2, que indica a programação de dois turnos de trabalho e 3, que indica a programação de três turnos de trabalho.

b) Tipos de papelão - definimos dois tipos: S, indica que a instância é formada por boletins de parede simples e D que indica que a instância é formada por boletins de parede dupla.

Teremos então 6 classes para análise, que serão denotadas pelo grupo e pelo tipo de papelão, nesta ordem, por exemplo: **1S** indica o grupo 1 com boletins de parede simples (S). Como em cada classe temos 10 instâncias, teremos um total de 60 instâncias para serem analisadas na Seção 4.4.2. Além disso, temos a Seção 4.4.3 em que são apresentados resultados baseados em dados reais.

4.4.2 Comparando os modelos com dados gerados aleatoriamente

Nessa seção compararemos na Tabela 7 os resultados obtidos para o Modelos 1, 2, 3 e 4 para as 6 classes descritas na Tabela 6. Analisaremos os valores mínimos (Min), máximos (Max) para as trocas de gramaturas e rolos corrugadores e valores mínimos (Min), máximos (Max) e médios (\bar{M}) para F.O, tempo de processamento e GAP para as 10 instâncias de cada classe. Destacamos em negrito na primeira coluna o modelo que apresentou melhor resultado para cada classe.

Em relação a classe 1S, provou-se a otimalidade para todas as instâncias da classe para os quatro modelos testados, sendo que os tempos de processamento foram inferiores a 1 segundo. Os menores tempos de processamento foram observados no modelo 4 e os

Tabela 7: Resultados dos modelos para o PMTGRC

Classes/Modelo	TG		TRC		F.O.			T.			GAP		
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	\bar{M}	Min	Max	\bar{M}	Min	Max	\bar{M}
1S/1	18	19	2	3	518	769	718,3	0,32	0,98	0,54	0,00%	0,00%	0,00%
1S/2	18	19	2	3	518	769	718,3	0,26	0,73	0,40	0,00%	0,00%	0,00%
1S/3	18	19	2	3	518	769	718,3	0,09	0,32	0,17	0,00%	0,00%	0,00%
1S/4	18	19	2	3	518	769	718,3	0,09	0,17	0,12	0,00%	0,00%	0,00%
1D/1	27	28	5	7	1277	1778	1552,40	0,28	0,86	0,42	0,00%	0,00%	0,00%
1D/2	27	28	5	7	1277	1778	1552,40	0,14	0,23	0,17	0,00%	0,00%	0,00%
1D/3	27	28	5	7	1277	1778	1552,40	0,05	0,14	0,08	0,00%	0,00%	0,00%
1D/4	27	28	5	7	1277	1778	1552,40	0,08	0,31	0,14	0,00%	0,00%	0,00%
2S/1	29	35	3	3	779	785	782	54,69	157	92,75	0,00%	0,00%	0,00%
2S/2	29	35	3	3	779	785	782	122,59	206,04	173,15	0,00%	0,00%	0,00%
2S/3	29	35	3	3	779	785	782	181,59	600	535,04	0,00%	31,24%	24,85%
2S/4	29	35	3	3	779	785	782	56,71	600	307,93	0,00%	31,17%	3,12%
2D/1	56	59	8	14	2056	3559	2533,7	134	600	546	0,00%	48,93%	19,43%
2D/2	56	55	8	14	2056	3555	2532,7	51,90	110,21	82,00	0,00%	0,00%	0,00%
2D/3	56	55	8	14	2056	3555	2532,7	0,25	1,03	0,45	0,00%	0,00%	0,00%
2D/4	56	55	8	14	2056	3555	2532,7	0,10	0,37	0,21	0,00%	0,00%	0,00%
3S/1	39	46	3	3	789	796	791,80	600	600	600	1,59%	2,89%	2,31%
3S/2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3S/3	39	46	3	3	789	796	791,80	600	600	600	62,19%	94,12%	78,09%
3S/4	39	46	3	3	789	796	791,80	600	600	600	61,96%	94,04%	70,93%
3D/1	97	98	9	14	2347	3598	3047,4	600	600	600	29,21%	55,32%	46,80%
3D/2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3D/3	97	98	9	14	2347	3598	3047,4	1,21	37,07	9,41	0,00%	0,00%	0,00%
3D/4	97	98	9	14	2347	3598	3047,4	0,34	600	121	0,00%	8,36%	1,49%

Fonte: Autoria Própria

maiores tempos no modelo 1, em média, o tempo de processamento do modelo 4 foi 77,7% menor, se comparado ao modelo 1. Para essa classe o modelo 4 apresentou os melhores resultados.

Em relação a classe 1D, provou-se a otimalidade para todas as instâncias, para todos os modelos, sendo os menores tempos de processamento observados no modelo 3 e os maiores tempos no modelo 1, sendo que os tempos foram inferiores a 1 segundo. Para essa classe o modelo 3 apresentou os melhores resultados.

Em relação a classe 2S, provou-se a otimalidade para todas as instâncias da classe para os modelos 1 e 2, sendo que o tempo de processamento para o modelo 1 foi em média 47% menor, se comparado ao modelo 2. Utilizando o modelo 3, provou-se a otimalidade para apenas duas instâncias, os tempos de processamento foram bem maiores se comparados aos modelos 1 e 2 e o GAP médio foi de 24,85%. Já para o modelo 4, provou-se a otimalidade para 9 instâncias, incluindo 7 instâncias para as quais não provou-se otimalidade utilizando o modelo 3, sendo que o GAP médio igual a 3,12%. Em relação ao tempo, o modelo 1 consumiu 30,12% do tempo consumido pelo modelo 4, em média. Para essa classe o modelo 1 apresentou os melhores resultados.

Em relação a classe 2D, para os modelos 2, 3 e 4 provou-se a otimalidade para todas as instâncias da classe, já para o modelo 1, provou-se a otimalidade para apenas duas instâncias. Em relação aos tempos de processamento, o modelo 4 apresentou os menores valores, sendo o valor médio igual a 0,21 segundos, bem inferior aos 546 segundos do valor médio obtido para o modelo 1. Os valores para o GAP, relativos ao modelo 1, foram altos, atingindo um pico de 48,93% e uma média de 19,43%. Para essa classe o modelo 4

apresentou os melhores resultados.

Em relação a classe 3S, não provou-se a otimalidade para nenhuma das instâncias, em nenhum dos modelos testados, o que deixou todos os tempos de processamento no limite de 600 segundos. Em relação ao GAP médio, o melhor resultado foi observado no modelo 1, com 2,31%, seguido pelo modelo 4 com um valor de 70,93% e por fim temos o modelo 3 com valor médio de 78,09%. Já para o modelo 2, devido as restrições de eliminação de sub-rotas DFJ, que apresentam crescimento exponencial, a memória do computador não foi suficiente para o processamento e não obteve-se nenhuma solução, o que indicamos por (-). Para essa classe o modelo 1 apresentou os melhores resultados. Como teste auxiliar, processamos o modelo 1 retirando o limite de tempo de 600 s e obtivemos as soluções ótimas para todas as instâncias da classe, com tempo médio de processamento de 12.000 segundos e pico de 38.975 segundos, na 5ª instância da classe.

Em relação a classe 3D, para o modelo 1, não provou-se a otimalidade para nenhuma das instâncias da classe, o GAP atingiu um pico de 55,32% e uma média de 46,80%. Como teste auxiliar para esta classe, estendemos o tempo de processamento para 3600 s e ainda assim não provamos a otimalidade para nenhuma instância, porém o GAP médio se reduziu para 39,65%. Para o modelo 2, que utiliza as restrições de eliminação de sub-rotas DFJ, ocorreu o mesmo que na classe 3S anterior e não obtivemos nenhuma solução. Para o modelo 3 os resultados foram bem melhores, provou-se a otimalidade para todas as instâncias e tempo de processamento médio de 9,41 segundos. Para o modelo 4, provou-se a otimalidade para 8 instâncias, sendo que as duas instâncias sem otimalidade apresentaram GAP's iguais a 6,61% e 8,36%. De um modo geral os tempos de processamento para o modelo 4, foram mais baixos que os do modelo 3, mas o valor médio para o modelo 4 é bem maior devido as duas instâncias sem otimalidade que consumiram 600 segundos. Para essa classe o modelo 3 apresentou os melhores resultados.

Como os tempos de processamento para todos os modelos na classe 1S são inferiores a 1 segundo e os modelos 3 e 4 tem praticamente o mesmo tempo de processamento na classe 2D, se tivéssemos que eleger um modelo para cada tipo de papelão, poderíamos estabelecer o seguinte, utilizando as conclusões anteriores. O modelo 1 se mostrou eficiente para as instâncias cujos boletins tem parede simples, a saber, 1S, 2S e 3S e o modelo 3 se mostrou eficiente para os instâncias cujos boletins tem parede dupla, a saber, 1D, 2D e 3D.

Como a prova (ou não) da otimalidade está intimamente ligada a qualidade dos limitantes inferiores, analisamos também os valores das relaxações lineares de cada modelo como exposto na Tabela [8](#). Em relação ao modelo 1, observa-se de acordo com a Proposi-

ção 5.3.1 que as relaxações são fracas e iguais a zero para todas as instâncias. Em relação aos modelo 2 e modelo 3 observa-se resultados semelhantes para as classes 1D e 2D e resultados melhores para o modelo 2 nas classes 1S e 2S. Mesmo na relaxação linear, para o modelo 2 não obtemos resultados para as classes 3S e 3D, devido ao crescimento exponencial das restrições de eliminação de sub-rotas DFJ. Em relação ao modelo 4, observa-se os melhores resultados para as 1S, 3S, 1D, 2D e 3D, dentre essas, destacamos as classes de papelão de camada dupla onde obteve-se os melhores resultados, especialmente a classe 1D, onde em 30% das instâncias os valores das relaxações são iguais as soluções ótimas e em outros 30% diferem da solução ótima por apenas uma unidade.

Tabela 8: Valores das relaxações lineares dos modelos propostos

Classe	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Solução ótima	Classe	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Solução ótima
	0	125,37	31,19	516	764		0	482,28	482,28	1530	1777
	0	110,02	18	273	769		0	437,35	437,35	1529	1530
	0	111,18	29,06	272	769		0	437,35	437,35	1529	1530
	0	81,91	11	23	520		0	394,91	298,77	1229	1278
1S	0	109,33	16,18	271	768	1D	0	504,99	504,99	1774	1774
	0	82,75	11,25	22	518		0	504,99	504,99	1777	1777
	0	112,11	30,47	239,28	770		0	504,99	504,99	1778	1778
	0	149,53	14,4,35	485,14	768		0	482,62	482,61	1477,2	1526
	0	124,38	29,37	485,14	769		0	428,33	405,13	1276	1277
	0	114,29	15,36	486,28	768		0	327	284,85	1029	1277
Média	0	112,08	33,62	307,28	718,3		0	450,48	434,33	1492,82	1552,4
Classe	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Solução ótima	Classe	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Solução ótima
	0	72,73	14,42	35	782		0	437,15	437,15	1811	2308
	0	68,34	14,75	40	785		0	359,46	346,9	1541,07	2056
	0	68,34	14,75	36,86	783		0	496,51	496,51	3554	3555
	0	66,44	11,1	33	780		0	473,17	473,18	2559	2806
2S	0	68	13,8	37	782	2D	0	414,92	414,92	2065	2314
	0	89,73	12,3	34	779		0	464,33	464,33	2056	2553
	0	66,41	13,4	34	780		0	464,05	464,05	2065	2560
	0	66,76	14,35	36	782		0	452,49	452,49	1810	2305
	0	68,34	14,75	38,5	782		0	413,79	413,79	2042,21	2308
	0	68,16	14,25	41	785		0	454,38	454,38	2297,29	2562
Média	0	70,32	13,78	36,53	782		0	443,02	441,77	2180,05	2532,70
Classe	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Solução ótima	Classe	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Solução ótima
	0	*	13,67	43	788		0	*	410,31	2351	3093
	0	*	10,71	39	787		0	*	444,82	1600	2836
	0	*	13,52	45	790		0	*	458,34	2348	3339
	0	*	13,52	48	793		0	*	338,41	1352	2592
3S	0	*	13,62	44	789	3D	0	*	339,05	2077,17	2830
	0	*	13,6	50	794		0	*	459,05	3083,22	3584
	0	*	13,55	47	794		0	*	446,38	2091	3082
	0	*	12,1	42,5	790		0	*	85,32	1098	2334
	0	*	13,47	43,5	789		0	*	419,52	2095	2837
	0	*	13,75	43,4	788		0	*	436,36	2599	3342
Média	0	*	13,15	44,54	790,2		0	*	383,75	2069,43	2986,90

Fonte: Autoria Própria

4.4.3 Comparando soluções da prática com as do modelo matemático

Nesta Seção comparamos os valores obtidos na prática associados à troca de gramaturas, rolos corrugadores e valores de função objetivo para 20 conjuntos de boletins processados na IEPO visitada, com as soluções obtidas utilizando o **Modelo 1**. Esse modelo foi escolhido pois obteve-se com ele os melhores resultados analisando boletins de parede simples e os 20 conjuntos de boletins analisados na Tabela 9 são desse tipo, além disso, em cada boletim são utilizados no máximo 2 tipos de onda e destacamos em negrito as classes onde o valor obtido pelo modelo foi melhor do que o utilizado na prática.

Tabela 9: Comparando soluções da prática com as do modelo matemático

Conjunto	Boletins	TG		TRC		F.O.	
		Prática	Modelo	Prática	Modelo	Prática	Modelo
1	5	9	7	1	1	259	257
2	6	7	6	1	1	257	256
3	7	13	10	1	1	263	260
4	8	7	7	1	1	257	257
5	8	13	10	1	1	263	260
6	8	10	7	2	1	510	257
7	8	14	11	2	1	514	261
8	9	10	6	0	0	10	6
9	9	18	13	0	0	18	13
10	9	13	9	1	1	263	259
11	10	21	16	2	1	521	266
12	10	12	11	1	1	262	261
13	10	13	9	1	1	263	259
14	11	8	6	0	0	8	6
15	11	21	15	1	1	271	265
16	11	22	14	2	1	522	264
17	12	8	5	0	0	8	5
18	12	15	10	0	0	15	10
19	12	18	12	2	1	518	262
20	13	22	14	1	1	272	264

Fonte: Autoria Própria

Os resultados para a F.O. atestam que as soluções obtidas via modelo são melhores que as utilizadas atualmente na indústria, sendo que para alguns conjuntos analisados, como o conjunto 16 e o 20, houve redução de 37% no número de trocas de gramaturas.

Em relação a troca de rolos corrugadores, quando a solução obtida é 0, indica que todos os boletins tem mesmo tipo de onda. Como temos no máximo dois tipos de onda e a relação entre os pesos das trocas de gramaturas e trocas de rolos corrugadores é 1:250, há um agrupamento dos boletins com mesmo tipo de onda, o que se observa na prática para a maioria dos conjuntos processados, por isso as soluções ótimas são iguais a 1. Todas as soluções obtidas via modelo são ótimas e os tempos de processamentos são inferiores a 2 segundos.

Para maior clareza, na Tabela 10 destacamos as gramaturas e o tipo de rolo corrugador empregado no conjunto 16 da Tabela 9, com o sequenciamento que foi utilizado na prática, sendo que os porta-bobinas foram indicados por PB e o rolo corrugador por RC.

Tabela 10: Sequenciamento dos boletins do conjunto 16 realizado na prática

Boletins	Gramatura PB 1	Gramatura PB 2	Gramatura PB 3	Tipo de RC
1	120	120	140	B
2	160	160	160	B
3	160	160	160	B
4	140	140	140	B
5	120	120	120	B
6	100	100	100	B
7	160	180	160	C
8	160	140	160	B
9	140	120	120	B
10	140	120	120	B
11	200	200	200	B
Total de trocas	7	8	7	2

Fonte: Autoria Própria

Somando-se o total de trocas em cada porta-bobinas, no sequenciamento da Tabela 10 obtemos 22 trocas de gramaturas e 2 trocas de rolo corrugador, o que implica num valor de 522, que convertido em custos reais representa $22 \cdot \text{R\$ } 9,46 = \text{R\$ } 208,12$ relativo a troca da gramaturas e $2 \cdot \text{R\$ } 2.402,10 = \text{R\$ } 4.804,20$ relativo a troca de rolo corrugador, perfazendo um custo total de $\text{R\$ } 5.012,32$.

Já na Tabela 11 trazemos o sequenciamento obtido pelo modelo 1, que gerou 14 trocas de gramaturas e 1 troca de rolo corrugador, o que implica num valor de $\text{R\$ } 264$, que equivale a um custo total de $\text{R\$ } 2.534,54$, ou seja, numa redução de 49,57%, ou $\text{R\$ } 2.477,78$.

Tabela 11: Sequenciamento dos boletins do conjunto 16 utilizando o Modelo 1

	Gramatura PB 1	Gramatura PB 2	Gramatura PB 3	Tipo de RC
Boletim 11	200	200	200	B
Boletim 6	100	100	100	B
Boletim 10	140	120	120	B
Boletim 9	140	120	120	B
Boletim 5	120	120	120	B
Boletim 1	120	120	140	B
Boletim 4	140	140	140	B
Boletim 8	160	140	160	B
Boletim 2	160	160	160	B
Boletim 3	160	160	160	B
Boletim 7	160	180	160	C
Total de trocas	5	5	4	1

Fonte: Autoria Própria

Destacamos também na Tabela 11 que para o porta-bobinas 1, temos 5 tipos de gramaturas, o que fornece uma solução ótima igual a 5 para o número de trocas de gramaturas, já para o porta-bobinas 2 e para o porta-bobinas 3 temos respectivamente,

6 e 5 tipos de gramaturas, o que fornece um valor ótimo para o número de trocas de gramaturas, igual a 5 e 4, valores esses que foram obtidos via modelo matemático.

Nesse capítulo o PMTGRC foi caracterizado e pela primeira vez, foram apresentados modelos matemáticos capazes de representá-lo. Testes computacionais com dados aleatórios e com dados reais atestam que os modelos propostos são eficientes para lidarem com o problema apresentado.

Capítulo 5

O Problema de Alocação de Bobinas no Corrugador

Neste capítulo definiremos detalhadamente o PABC e apresentaremos um modelo linear inteiro misto capaz de integrar as principais considerações do problema e minimizar os custos de produção associados a programação do uso de bobinas no corrugador. Introduziremos um conjunto de restrições válidas capazes de gerar relaxações lineares mais fortes.

Descreveremos também o processo de geração de dados para os testes computacionais, que foi baseado em dados reais do processo produtivo das IEPO. Finalizaremos apresentando resultados computacionais que avaliam a eficiência do modelo proposto.

5.1 **Definição do problema**

O Problema de Alocação de Bobinas no Corrugador foi identificado em uma visita técnica realizada em uma indústria de embalagens de papelão ondulado situada na cidade de Uberaba - MG. As descrições que seguem estão de acordo com dados colhidos em entrevistas com operadores do corrugador, encarregados de produção, encarregados de estoque e coordenadores do PCP.

O problema a ser estudado faz parte da 2ª Etapa do processo produtivo, que ocorre no corrugador. Essa etapa começa com a formação e o envio dos boletins para a equipe de controle do corrugador, que dará início ao abastecimento do corrugador com as primeiras 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 está no mesmo porta-bobina) for totalmente consumida ou precisar ser substituída devido a uma estratégia de produção.

O papel proveniente das bobinas instaladas em cada conjunto de porta-bobinas alimenta 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 gramatura das capas deve ser maior ou igual a gramatura do miolo, e neste capítulo adotaremos que elas são iguais para cada boletim, como forma de simplificação.

A reposição de bobinas é bastante frequente, e pode ser motivada por um dos seguintes fatores: o comprimento das bobinas instaladas inicialmente não é suficiente para se produzir o comprimento da chapa descrita no boletim; uma bobina é danificada durante o processo produtivo, ou ainda, porque o boletim subsequente é de gramatura diferente. Para esse último caso, ocorre geralmente a sobra de um toco em cada conjunto de porta-bobinas, podendo esse toco ser aproveitável ou não.

Caso seja aproveitável, o toco volta ao estoque e é utilizado em um novo boletim, de gramatura igual ou inferior; caso não seja aproveitável, é enviado para a reciclagem. Uma sobra não aproveitável é todo toco com comprimento menor que 300 m, de acordo com [Chantrapornchai e Sathapanawat \(2010\)](#). Minimizar a quantidade de sobras não aproveitáveis é um problema relevante no contexto do processo produtivo da IEPO, pois várias toneladas de sobras não aproveitáveis são recicladas todos os meses.

Esse problema tem perdurado em muitas destas indústrias, pois na maioria delas, o operador da empilhadeira (responsável por localizar e transportar a bobina de papel do estoque até o corrugador e vice-versa), juntamente com o encarregado de produção do corrugador, fazem a seleção de quais bobinas serão utilizadas, baseando-se unicamente em sua experiência e bom senso, não havendo nenhuma ferramenta de decisão para auxiliá-los.

Esta escolha empírica, aliada a grande quantidade de bobinas em estoque e a grande diversidade nas características dos boletins, acaba por propiciar a geração de uma grande quantidade de sobras não aproveitáveis durante o processo produtivo. A minimização das sobras não aproveitáveis, no contexto do processo produtivo das IEPO, será a primeira consideração do problema a ser estudado nesse capítulo.

Na prática, para evitar que todas as sobras não aproveitáveis sejam recicladas, muitas delas são aproveitadas no boletim subsequente, desde que este seja de gramatura inferior. Estes aproveitamentos geram perdas, pois os clientes não pagam por este acréscimo na

gramatura utilizada no boletim. Uma análise dessa estratégia será colocada como proposta futura.

Outro aspecto importante do processo produtivo está relacionado à forma de consumo das bobinas, que pode ser feita parcialmente ou integralmente.

Na prática, o consumo integral de uma bobina tem prioridade em relação ao consumo parcial, e isto deve-se ao seguinte fato: quando uma bobina é consumida integralmente, o operador do corrugador faz um controle visual de quando a bobina está acabando, sem nenhuma programação no corrugador, já no consumo parcial, é necessária uma programação no corrugador para que ele possa medir o consumo parcial que precisa ser feito e é necessária muita atenção, para que seja feita a interrupção do consumo no momento certo, uma vez que o corrugador não faz esta parada automaticamente.

Na prática, os consumos parciais são feitos por aproximação, ou seja, consome-se uma parte da bobina deixando-se uma sobra que o operador do corrugador considera aceitável. Há também uma restrição importante relacionada a forma de consumo, pois quando faz-se o consumo parcial, deve-se estabelecer um consumo parcial mínimo e estabelecemos este valor em 450 m. Em relação ao custo, os consumos parciais são mais caros, pois após seu uso, a bobina deve ser transportada novamente até o estoque, o que não ocorre no caso de consumo integral. Além disso, existe o custo adicional de se administrar este estoque de bobinas consumidas parcialmente.

Em uma situação ideal, a cada boletim produzido deveria-se ter 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, mas na prática o número de consumos parciais é bem maior, podendo chegar a 5 por porta-bobinas. A minimização dos consumos parciais é relevante no contexto do processo produtivo das IEPO e será a segunda consideração do problema a ser estudado nesse capítulo.

Um outro ponto de grande relevância é a obtenção de soluções que minimizem as paragens do corrugador, uma vez que isso provoca perdas de produtividade. As paragens que aqui referimos são as provocadas por escolhas ou sequenciamentos equivocados de bobinas e não por fatores imprevisíveis, como falhas mecânicas ou rasgamentos.

Sabe-se que para uma bobina suportar a troca de sua bobina pareada, evitando assim que o corrugador pare no momento de sua substituição, ela deverá medir pelo menos 750 m, estabelecendo que a velocidade média do corrugador é de 150 m/min, sendo assim, uma bobina com 2500 m, suportaria a troca de até três bobinas pareadas com ela.

Na prática, as paragens são evitadas utilizando-se três estratégias: são utilizadas bobinas grandes durante o processo produtivo, pois estas suportam um grande número de reposições de bobinas pareadas a ela; faz-se o aproveitamento de sobras de bobinas de gramatura maior dos boletim anteriores, o que gera prejuízo, como comentado anteriormente; diminui-se a velocidade do corrugador, até que a troca da bobina pareada seja finalizada, mas isto provoca perdas na capacidade produtiva.

O uso frequente de bobinas grandes provoca o acúmulo de tocos no estoque, sendo que muitos desses se perdem devido aos efeitos da umidade, amassamento de tubetes, dentre outros.

Além disso, surge a necessidade de produção ou aquisição de novas bobinas, de forma desnecessária, devido a complexidade de se combinar bobinas pequenas em um mesmo pedido, o que implica em má gestão financeira. Essa restrição leva a uma análise não trivial de quais bobinas serão utilizadas de modo a minimizar as paragens do corrugador. A minimização de paragens do corrugador é relevante no contexto do processo produtivo das IEPO e será a terceira consideração do problema a ser estudado.

Relacionado a esse problema, surge também um problema de sequenciamento, uma vez que após a seleção das bobinas que serão utilizadas, da definição do quanto será consumido de cada uma delas e em qual porta-bobinas elas serão instaladas, ainda precisamos determinar a ordem em que as mesmas serão utilizadas, considerando que cada porta-bobinas é composto de dois pinos de suporte, e a sequência em que as bobinas serão instaladas e consumidas é fundamental para que o corrugador não tenha seu funcionamento interrompido. Para este sequenciamento foi desenvolvida uma estratégia, apresentada na Seção 5.3 e que se mostrou eficiente.

Finalmente, visando a minimização dos custos de produção associados a alocação de bobinas no corrugador, a minimização da quantidade total de bobinas utilizadas em um boletim é relevante no contexto do processo produtivo das IEPO e será a quarta consideração do problema a ser estudado.

Destaca-se que as soluções implementadas na prática, na indústria visitada, geram muitas sobras não aproveitáveis, muitos consumos parciais, muitas reposições e muitos aproveitamentos de gramaturas, além do acúmulo de bobinas pequenas no estoque, o que contribui para uma grande perda acumulada.

Nosso objetivo principal é reduzir o custo total da produção associado a escolha e alocação das bobinas no corrugador. Pelo apresentado acima, uma boa solução implicará em uma série de decisões, que deverão ser tomadas de forma a atender as seguintes

considerações:

1ª - minimizar o número de sobras não aproveitáveis.

2ª - minimizar a quantidade de consumos parciais.

3ª - minimizar o número de paragens do corrugador.

4ª - minimizar a quantidade total de bobinas utilizadas em cada boletim.

Além disso, a Restrição de Consumo Parcial Mínimo, estabelecido em 450 m, deve ser respeitada.

O Problema da Alocação de Bobinas no Corrugador (PABC) visa integrar estas quatro considerações e a restrição acima. Na seção 5.2 apresentaremos um modelo matemático para o problema.

5.2 Modelo matemático para o PABC

Nesta seção proporemos um modelo linear inteiro misto (MLIM) capaz de integrar as quatro considerações descritas acima, bem como a restrição de consumo parcial mínimo.

Destacamos que o modelo matemático proposto representa o problema de alocação de bobinas no corrugador para apenas um boletim, considerando que a decisão sobre o sequenciamento dos boletins dentro de um turno já foi tomada pelo PCP. Para obter resultados para vários boletins é preciso processar o modelo várias vezes. Considera-se também que ao iniciar a alocação de bobinas para um boletim, não há bobinas no corrugador. Quanto as unidades adotadas, destacamos que os comprimentos foram medidos em metros (m) e todos os custos foram calculados em reais.

Considere os seguintes índices, parâmetros e variáveis:

Índices:

- $i = 1 \dots m$, onde m representa o número total de bobinas.
- $j = 1 \dots n$, onde n representa o número total de camadas da chapa que será fabricada.

Parâmetros:

- w_i : Comprimento da bobina i .

- c_j : Comprimento da camada j .
- 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 em uma bobina em caso de consumo parcial.
- β_1 : Custo de transporte da bobina do estoque até o corrugador e de preparação da bobina no corrugador.
- β_2 : Custo de transporte da bobina do corrugador até o estoque.
- β_3 : Custo de reciclagem de um metro de sobra não aproveitável.
- β_4 : Custo de uma paragem do corrugador.

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 $0 \leq X_{ij} \leq w_i$. Determina o comprimento que será consumido da bobina i na camada j .
- T_{ij} : Variável binária. Vale 1 quando a bobina i utilizada na camada j for consumida parcialmente e vale 0 quando for consumida integralmente ou quando a bobina i não for utilizada na camada j .
- P_j : Variável inteira tal que $P_j \geq 0$. Indica o número de paragens na camada j .
- Z_{ij} : Variável inteira tal que $Z_{ij} \geq 0$. Indica o número de trocas suportadas pelo valor consumido X_{ij} da bobina i utilizada na camada j .

- A_{ij} : Variável Binária. Vale 1 quando gera-se sobra não aproveitável a partir da bobina i utilizada na camada j e 0 quando não gera-se sobra não aproveitável ou não utiliza-se a bobina.
- D_{ij} : Variável real tal que $D_{ij} \geq 0$. Determina o comprimento da sobra não aproveitável produzida pelo consumo da bobina i na camada j . Vale 0 para as bobinas consumidas integralmente, para as bobinas consumidas parcialmente gerando sobras aproveitáveis e para as bobinas não utilizadas.

Antes de apresentar o modelo, considere as seguintes observações sobre trocas, trocas suportadas e paragens do corrugador.

Trocas: Uma troca de bobina ocorre quando uma bobina substitui uma outra bobina no mesmo boletim. Note que as duas primeiras bobinas colocadas em cada porta-bobinas não são consideradas trocas, pois não substituem nenhuma bobina do boletim que será processado. Sendo assim, a quantidade de trocas necessárias para um conjunto com m bobinas selecionadas para o porta-bobina j é igual a $(\sum_{i=1}^m Y_{ij}) - 2$.

Trocas suportadas por uma bobina: O número de trocas suportadas por uma bobina (ou pelo que foi consumido dela) é igual ao número de bobinas pareadas a ela que podem ser substituídas sem que haja uma paragem. Esse número é dado por $\lfloor X_{ij}/p \rfloor$, que indica o maior inteiro menor que X_{ij}/p . Com isso, a quantidade de trocas suportadas por um conjunto com m bobinas selecionadas para o porta-bobinas j é dado por $\sum_{i=1}^m \lfloor X_{ij}/p \rfloor$.

Paragem: Uma paragem ocorre quando o número de trocas suportadas por um conjunto com m bobinas é menor que a quantidade de trocas para esse mesmo conjunto de bobinas, ou seja, se $[\sum_{i=1}^m Y_{ij} - 2] - \sum_{i=1}^m \lfloor X_{ij}/p \rfloor \leq P_j$, em que P_j fornecerá o número de paragens para um conjunto com m bobinas.

De fato, se tivermos $[\sum_{i=1}^m Y_{ij} - 2] \leq \sum_{i=1}^m \lfloor X_{ij}/p \rfloor$, então $[\sum_{i=1}^m Y_{ij} - 2] - \sum_{i=1}^m \lfloor X_{ij}/p \rfloor \leq 0$ e como $P_j \geq 0$, segue que $P_j = 0$ (devido a função objetivo definida a seguir), ou seja não teremos paragens.

Mas, se tivermos $[\sum_{i=1}^m Y_{ij} - 2] > \sum_{i=1}^m \lfloor X_{ij}/p \rfloor$, então $P_j \geq [\sum_{i=1}^m Y_{ij} - 2] - \sum_{i=1}^m \lfloor X_{ij}/p \rfloor > 0$, e como queremos minimizar P_j na função objetivo, $P_j = [\sum_{i=1}^m Y_{ij} - 2] - \sum_{i=1}^m \lfloor X_{ij}/p \rfloor$, sendo que esta diferença é exatamente o número de paragens para cada porta-bobinas j .

Destaca-se que o número de paragens por porta-bobinas é equivalente ao número de paragens por camada, uma vez que cada porta-bobina fornece papel para uma camada da chapa.

Com isso, podemos definir a Restrição das Paragens por camada, dada por: $\sum_{i=1}^m (Y_{ij} - \lfloor X_{ij}/p \rfloor) \leq 2 + P_j$, sendo que $\lfloor X_{ij}/p \rfloor$ pode ser linearizado por: $Z_{ij} \cdot p - X_{ij} \leq 0$ e $(Z_{ij} + 1) \cdot p - X_{ij} \geq 0$.

De fato, de $Z_{ij} \cdot p - X_{ij} \leq 0$ obtemos, $Z_{ij} \leq X_{ij}/p$ e de $(Z_{ij} + 1) \cdot p - X_{ij} \geq 0$, obtemos, $Z_{ij} \geq (X_{ij}/p) - 1$, ou seja, $(X_{ij}/p) - 1 \leq Z_{ij} \leq X_{ij}/p$ (*) e como na restrição de paragens teremos: $P_j \geq \sum_{i=1}^m (Y_{ij} - Z_{ij} - 2)$ e deseja-se minimizar P_j na função objetivo, o valor de Z_{ij} que é inteiro, será sempre o maior inteiro dentro do intervalo (*), valor que fornece o número de trocas suportadas, independente de $\lfloor X_{ij}/p \rfloor$ ser inteiro ou não.

Temos então o seguinte modelo:

Função Objetivo:

$$\min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \beta_1 \cdot Y_{ij} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \beta_2 \cdot T_{ij} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \beta_3 \cdot D_{ij} + \sum_{j=1}^n \beta_4 \cdot P_j \quad (5.1)$$

Restrições:

$$\sum_{i=1}^m X_{ij} = c_j \quad ; \quad j = 1, \dots, n. \quad (5.2)$$

$$\sum_{j=1}^n Y_{ij} \leq 1 \quad ; \quad i = 1, \dots, m. \quad (5.3)$$

$$\sum_{i=1}^m (Y_{ij} - Z_{ij}) \leq 2 + P_j \quad ; \quad j = 1, \dots, n. \quad (5.4)$$

$$Z_{ij} \cdot p - X_{ij} \leq 0 \quad ; \quad j = 1, \dots, n. \quad (5.5)$$

$$(Z_{ij} + 1) \cdot p - X_{ij} \geq 0 \quad ; \quad j = 1, \dots, n. \quad (5.6)$$

$$X_{ij} \leq w_i \cdot Y_{ij} \quad ; \quad i = 1 \dots m, \quad j = 1 \dots n. \quad (5.7)$$

$$w_i \cdot Y_{ij} - X_{ij} \geq s \cdot (1 - A_{ij}) \quad ; \quad i = 1 \dots m, \quad j = 1 \dots n. \quad (5.8)$$

$$w_i \cdot Y_{ij} - X_{ij} \leq w_i \cdot (1 - A_{ij}) + s \cdot A_{ij} \ ; \ i = 1 \dots m, \ j = 1 \dots n. \quad (5.9)$$

$$D_{ij} \leq s \cdot A_{ij} \ ; \ i = 1 \dots m, \ j = 1 \dots n. \quad (5.10)$$

$$D_{ij} \geq w_i \cdot Y_{ij} - X_{ij} - (1 - A_{ij}) \cdot w_i \ ; \ i = 1 \dots m, \ j = 1 \dots n. \quad (5.11)$$

$$X_{ij} \geq v \cdot T_{ij}, \ i = 1 \dots m, \ j = 1 \dots n. \quad (5.12)$$

$$w_i \cdot Y_{ij} - X_{ij} \leq w_i \cdot T_{ij} \ ; \ i = 1 \dots m, \ j = 1 \dots n. \quad (5.13)$$

$$Y_{ij}, \ T_{ij}, \ A_{ij} \in \{0, 1\}, \ P_j \in \mathbb{Z}^+, \ X_{ij}, \ D_{ij} \in \mathbb{R}^+ \quad (5.14)$$

A função objetivo (5.1) visa minimizar o custo total de utilização das bobinas no corrugador.

A expressão que calcula os custos de alocação é dada por:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \beta_1 \cdot Y_{ij}$$

A expressão que calcula os custos dos consumos parciais é dada por:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \beta_2 \cdot T_{ij}$$

A expressão que calcula os custos de reciclagem das sobras não aproveitáveis é dada por:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \beta_3 \cdot D_{ij}$$

A expressão que calcula os custos das paragens é dada por:

$$\sum_{j=1}^n \beta_4 \cdot P_j$$

As restrições (5.2) garantem que o boletim é produzido com exatidão. As restrições (5.3) garantem que cada bobina é usada no máximo uma vez em algum pino. As restrições (5.4)-(5.6), conforme descrito anteriormente, referem-se o número de paragens para um determinado conjunto de bobinas. As restrições (5.7) garantem que o comprimento consumido em uma bobina é limitado pelo seu comprimento.

As restrições (5.8) e (5.9) auxiliam no cálculo das quantidades de sobras aproveitáveis e não aproveitáveis, como segue.

Se $A_{ij} = 0$, pelas restrições (5.8) teremos $w_i \cdot Y_{ij} - X_{ij} \geq s$ e em (5.9), $w_i \cdot Y_{ij} - X_{ij} \leq w_i$, ou seja, teremos sobra aproveitável. Por outro lado, se tivermos sobra aproveitável, ou seja, $w_i \cdot Y_{ij} - X_{ij} \geq s$, por (5.8) devemos ter $A_{ij} = 0$.

Se $A_{ij} = 1$, pelas restrições (5.8) teremos $w_i \cdot Y_{ij} - X_{ij} \geq 0$, e em (5.9), $w_i \cdot Y_{ij} - X_{ij} \leq s$, ou seja, teremos sobra não aproveitável. Por outro lado, se tivermos sobra não aproveitável, ou seja, $w_i \cdot Y_{ij} - X_{ij} \leq s$, por (5.9), devemos ter $A_{ij} = 1$.

Quando $w_i \cdot Y_{ij} - X_{ij} = s$, por (5.8) e por (5.9) podemos ter $A_{ij} = 0$ ou $A_{ij} = 1$. Mas como queremos minimizar D_{ij} na função objetivo, por (5.11) teremos $A_{ij} = 0$ e $D_{ij} = 0$. Se $A_{ij} = 1$, por (5.8), (5.10) e por (5.11) teríamos $D_{ij} = s$. Concluimos então que para $w_i \cdot Y_{ij} - X_{ij} \geq s$, teremos $A_{ij} = 0$ e para $w_i \cdot Y_{ij} - X_{ij} < s$ teremos $A_{ij} = 1$.

As restrições (5.10) e (5.11) auxiliam no cálculo da variável D_{ij} . Se uma bobina não for selecionada, ou seja, se $Y_{ij} = 0$, segue por (5.7) que $X_{ij} = 0$ e então por (5.8) segue que $A_{ij} = 1$, e daí, por (5.11), $D_{ij} \geq 0$ e como queremos minimizar D_{ij} na função objetivo, $D_{ij} = 0$. Se uma bobina for selecionada, ou seja, $Y_{ij} = 1$, quando $A_{ij} = 0$, que identifica as sobras aproveitáveis, por (5.10) temos que $D_{ij} \leq 0$ e por (5.11), $D_{ij} \geq -X_{ij}$, e como $D_{ij} \geq 0$, segue que $D_{ij} = 0$. Quando $A_{ij} = 1$, que identifica as sobras não aproveitáveis, por (5.10), $D_{ij} \leq s$ e por (5.11), $D_{ij} \geq w_i - X_{ij}$, e como queremos minimizar D_{ij} na função objetivo, $D_{ij} = w_i - X_{ij}$, que será o comprimento da sobra não aproveitável.

As restrições (5.12) determinam que se houver consumo parcial, este será maior que ou igual v .

As restrições (5.13) auxiliam no cálculo das quantidades de consumos parciais e integrais. Quando tivermos um consumo integral, indicado por $w_i \cdot Y_{ij} - X_{ij} = 0$, por (5.13), podemos ter $T_{ij} = 0$ ou $T_{ij} = 1$, mas como queremos minimizar T_{ij} na função objetivo,

teremos $T_{ij} = 0$. Quando tivermos um consumo parcial, indicado por $w_i \cdot Y_{ij} - X_{ij} > 0$, por (5.13) devemos ter $T_{ij} = 1$. Em (5.14) temos o domínio de cada variável.

Nesta abordagem para programação de cada boletim de forma independente, o corugador no início de cada boletim deve estar sem bobinas. Se desejarmos obter soluções que permitam uma programação sequencial dos boletins, ou seja, soluções para o boletim atual que permitam a troca da primeira bobina do boletim subsequente, basta alterar as restrições (5.4) da seguinte forma:

$$\sum_{i=1}^m (Y_{ij} - \lfloor X_{ij}/p \rfloor) \leq 1 + P_j \quad ; \quad j = 1, \dots, n. \quad (5.15)$$

Nesse caso, no início do processamento de cada boletim, teremos sempre uma bobina do boletim anterior em cada porta-bobinas.

Um resumo do comportamento das variáveis binárias está descrito na Tabela 12.

Tabela 12: Resumo do comportamento das variáveis binárias

Bobina	Tipo de consumo	Tipo de Sobra	Variáveis		
			Y_{ij}	A_{ij}	T_{ij}
Não selecionada	Não há	Não há	0	1	0
Selecionada	Integral	Não há	1	1	0
Selecionada	Parcial	Aproveitável	1	0	1
Selecionada	Parcial	Não aproveitável	1	1	1

Fonte: Autoria Própria

5.2.1 Inequações válidas

Com intuito de obter melhores limitantes e resultados melhores para o modelo, utilizamos as seguintes inequações válidas para o problema.

$$Y_{ij} \geq T_{ij}, \quad i = 1 \dots m, \quad j = 1 \dots n. \quad (5.16)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Y_{ij} \geq \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n T_{ij}. \quad (5.17)$$

$$\sum_{i=1}^m Y_{ij} \geq 1 \quad ; \quad j = 1, \dots, n. \quad (5.18)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Y_{ij} \geq n. \quad (5.19)$$

$$A_{ij} + T_{i,j} \geq Y_{ij}, \quad i = 1 \dots m, \quad j = 1 \dots n. \quad (5.20)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (A_{ij} + T_{i,j}) \geq \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Y_{i,j}. \quad (5.21)$$

$$A_{ij} + T_{i,j} \geq 1, \quad i = 1 \dots m, \quad j = 1 \dots n. \quad (5.22)$$

$$A_{ij} + Y_{i,j} \geq 1, \quad i = 1 \dots m, \quad j = 1 \dots n. \quad (5.23)$$

$$w_i \cdot Y_{ij} - X_{ij} \geq T_{ij} \quad ; \quad i = 1 \dots m, \quad j = 1 \dots n. \quad (5.24)$$

As inequações (5.16) indicam que o valor da variável Y_{ij} é sempre maior ou igual que o da variável T_{ij} , e como ambas são variáveis binárias, isso é trivial para o caso em que $Y_{ij} = 1$. Para o caso em que $Y_{ij} = 0$, por (5.7) segue que $X_{ij} = 0$, mas se $X_{ij} = 0$, por (5.12) segue que $T_{ij} = 0$, como queríamos provar.

As inequações (5.17) são as inequações (5.16) somadas para todas as bobinas e camadas.

As inequações (5.18) indicam que devemos alocar pelo menos uma bobina em cada porta-bobinas.

As inequações (5.19) são uma extensão das restrições (5.18) e indicam que o número de bobinas alocadas deve ser maior ou igual ao número de camadas (porta-bobinas).

As inequações (5.20) podem ser facilmente obtidas da Tabela (12), uma vez que as variáveis binárias A_{ij} e T_{ij} não se anulam simultaneamente.

As inequações (5.21) são as inequações (5.20) somadas para todas as bobinas e camadas.

As inequações (5.22) podem ser facilmente obtidas da Tabela (12), uma vez que as variáveis binárias A_{ij} e T_{ij} não se anulam simultaneamente.

As inequações (5.23) podem ser facilmente obtidas da Tabela (12), uma vez que as

variáveis binárias A_{ij} e Y_{ij} não se anulam simultaneamente.

As inequações (5.24) indicam que quando tivermos consumo integral, indicado por $w_i \cdot Y_{ij} - X_{ij} = 0$, necessariamente, $T_{ij} = 0$. Estas inequações também obrigam que quando tivermos sobras, estas terão comprimentos maiores ou iguais a 1.

Para obtermos o melhor conjunto de inequações válidas que deveriam ser agregadas ao modelo, utilizamos a seguinte estratégia. Agregamos ao modelo proposto (MLIM) algumas inequações válidas e comparamos os GAP'S, computando os resultados onde os GAP'S foram iguais ou menores aos do modelo sem as inequações.

Quando as restrições são semelhantes, comparamos os pares listados abaixo para facilitar a análise, sendo que as restrições que trouxeram melhores resultados foram inseridas no modelo.

O bloco das melhores restrições recebeu o nome de Melhores Restrições Válidas (MRV) e foi agregado ao modelo, obtendo o MLIM + MRV com o qual realizamos os testes computacionais finais.

Devido ao tempo computacional requerido nessas comparações, utilizamos na análise uma instância de cada classe, sendo 54 classes no total. A estrutura dessas classes será detalhada na Seção 5.4. Os pares são os seguintes:

- MLIM + restrições (5.16) e MLIM + restrições (5.17)
- MLIM + restrições (5.18) e MLIM + restrições (5.19)
- MLIM + restrições (5.20) e MLIM + restrições (5.21)
- MLIM e MLIM + restrições (5.22) e (5.23)
- MLIM e MLIM + restrições (5.24)

Da Tabela (13) conclui-se que o bloco MRV será formado pelas seguintes restrições: (16), (19), (20), (22), (23) e (24). Além disso, ao acrescentarmos o bloco MRV ao modelo obtemos GAP'S menores ou iguais ao MLIM para 48 (88,88%) das instâncias analisadas, comprovando a eficiência do bloco de restrições.

Com a solução do modelo, o mesmo ainda deve ser validado, sendo que nossa estratégia de validação ocorreu em duas etapas.

Na primeira etapa, foram analisadas detalhadamente as soluções obtidas, sendo que as mesmas atendem à todas as considerações do problema e o comportamento das variáveis está de acordo com o esperado.

Tabela 13: Testes com restrições válidas

Pares de modelos	Quantidade de instâncias com GAP menor ou igual ao MLIM
MLIM + Restrições (16)	33
MLIM + Restrições (17)	28
MLIM + Restrições (18)	26
MLIM + Restrições (19)	33
MLIM + Restrições (20)	32
MLIM + Restrições (21)	28
MLIM + Restrições (22) e (23)	29
MLIM + Restrições (24)	34
MLIM + MRV	48

Fonte: Autoria Própria

Na segunda etapa, foram apresentadas as soluções de alguns problemas-exemplo ao encarregado de produção do corrugador, sendo que o mesmo destacou a qualidade das soluções obtidas, afirmando que as soluções são bem melhores que as utilizadas por eles na prática e que certamente trariam ganhos relacionados ao tempo e ao custo da produção do boletins.

5.3 Estratégia de sequenciamento das bobinas nos pinos

A partir da definição via modelo matemático do quanto será consumido de cada bobina e em quais porta-bobinas elas serão alocadas, ainda precisamos da definição da sequência de alocação das bobinas nos pinos e esse sequenciamento é importante no sentido de evitar paragens no corrugador. A estratégia abaixo cria o sequenciamento nos pinos de cada porta-bobinas.

Temos três casos especiais, para os quais as soluções são triviais, a saber:

1º - Se todas as bobinas selecionadas suportam pelo menos uma troca, independente do sequenciamento, não haverá paragens e neste caso qualquer sequência poderá ser utilizada.

2º - Se nenhuma das bobinas selecionadas suportam trocas, independente do sequenciamento, o número de paragens é igual $r - 2$, onde r indica o número total de bobinas que serão alocadas para a produção do boletim. Devemos desconsiderar trocas para as duas bobinas instaladas inicialmente.

3º - 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.

E temos o caso mais geral, quando o conjunto de bobinas a serem alocadas não se enquadra em nenhum dos 3 casos especiais acima, e nesse caso utilizamos a seguinte

estrat3gia:

1. Ordene as r bobinas selecionadas para um conjunto de porta-bobinas em ordem decrescente dos comprimentos que ser3o consumidos de cada uma, obtendo o conjunto:

$$\{a_1, a_2, \dots, a_r\}$$
2. Calcule o n3mero de reposi3o3es suportadas pela bobina a_1 , basta fazer $\lfloor X_{ija_1}/p \rfloor$, denote este valor por k_1 . O n3mero $\lfloor X_{ija_1}/p \rfloor$ indica o maior inteiro menor que X_{ija_1}/p .
3. No pino 1 deste conjunto de porta-bobinas ser3 alocada a bobina a_1 e no pino 2 as bobinas de posi3o3es: $r, r-1, \dots, r-(k_1-1)$, nesta ordem. O pino 2 ser3 o primeiro pino ativo, sendo que a bobina de posi3o3o r 3 consumida. Em seguida, o pino 1 se torna ativo, enquanto a bobina de posi3o3o $r-1$ 3 instalada no pino 2. Ent3o, o pino 1 torna-se inativo, o pino 2 torna-se ativo e a bobina de posi3o3o $r-1$ 3 consumida. Deve-se repetir este procedimento at3 que a bobina de posi3o3o $r-(k_1-1)$ seja consumida. Se $r-(k_1-1) = 2$ acabou o sequenciamento. Caso contr3rio, deve-se consumir o restante de papel da bobina a_1 enquanto a bobina a_2 3 instalada. V3 para a 4^a etapa.
4. Repita a 2^a e 3^a etapa para a bobina a_2 desconsiderando as bobinas j3 consumidas juntamente com a bobina a_1 . Se as bobinas se esgotarem, pare. Caso contr3rio, repita a 2^a e 3^a etapa para a bobina a_3 e assim por diante.

Destacamos que o n3mero de paragens obtidas via modelo, coincide com o n3mero de paragens obtidas ao se utilizar a estrat3gia de sequenciamento acima, o que indica que a estrat3gia se comporta como o desejado.

Apresentamos abaixo um exemplo onde aplicamos a estrat3gia de sequenciamento.

Considere um boletim para o qual foram selecionadas 8 bobinas para um determinado porta-bobinas. A forma de consumo e os valores que dever3o ser consumidos em metros s3o os seguintes: dois consumos parciais, um de 2100 (de uma bobina que mede 2500) e outro de 1620 (de uma bobina que mede 2000) e seis consumos integrais: 390, 580, 440, 700, 1800, 620.

O sequenciamento obtido est3 descrito na Tabela 14.

Tabela 14: Exemplo de sequenciamento para um conjunto de bobinas

Passo 1	Passo 2	Passo 3
Pino 1: Sem bobina Pino 2: Sem bobina	Pino 1: 2100 (Em espera) Pino 2: 390 (Sendo consumida)	Pino 1: 2100 (Sendo consumida) Pino 2: 0 (Será substituída).
Passo 4	Passo 5	Passo 6
Pino 1: 1350 (Em espera) Pino 2: 440 (Sendo consumida)	Pino 1: 1350 (Sendo consumida) Pino 2: 0 (Será substituída).	Pino 1: 0 (Será substituída) Pino 2: 1800 (Sendo consumida)
Passo 7	Passo 8	Passo 9
Pino 1: 580 (Sendo consumida) Pino 2: 1050 (Em espera)	Pino 1: 0 (Em espera) Pino 2: 1050 (Sendo consumida)	Pino 1: 1620 (Sendo consumida) Pino 2: 0 (Será substituída)
Passo 10	Passo 11	Passo 12
Pino 1: 870 (Em espera) Pino 2: 620 (Sendo consumida)	Pino 1: 870 (Sendo consumida) Pino 2: 0 (Será substituída)	Pino 1: 0 (Bobina final) Pino 2: 700 (Sendo consumida)
Passo 13	Passo 14	
Pino 1: Sem bobina Pino 2: 0 (Bobina final)	Pino 1: Sem bobina Pino 2: Sem bobina	

Fonte: Autoria Própria

5.4 Resultados computacionais

Nesta seção apresentaremos uma série de testes computacionais com instâncias geradas com base em dados reais. Inicialmente, descrevemos os principais parâmetros utilizados na criação do gerador de instâncias, desenvolvido na linguagem Java. Em seguida, fizemos a avaliação da influências destes parâmetros nas soluções.

Os testes computacionais foram realizados utilizando um computador com processador Intel Core i7-2600, CPU de 3.4 GHz e 16 GB memória RAM. Os modelos foram escritos em AMPL e resolvidos com o CPLEX 12.7. O tempo máximo de processamento foi fixado em 1800 segundos para cada instância e o modelo processado foi o MLIM.

5.4.1 Geração e caracterização dos dados

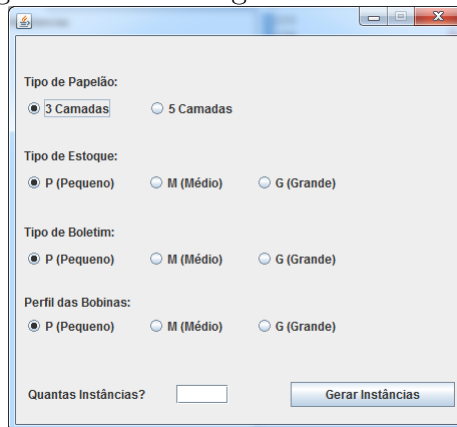
O primeiro desafio em relação aos testes computacionais foi a geração de um conjunto de instâncias capaz de representar adequadamente o cenário encontrado na IEPO visitada. Este conjunto de instâncias ainda não existia em outros trabalhos.

Fizemos inicialmente um levantamento dos principais parâmetros que deveriam fazer parte das instâncias e em seguida foi desenvolvido um gerador de instâncias na linguagem Java.

Neste gerador, podemos fixar por exemplo, quantas camadas terá o papelão, qual o tamanho do estoque que queremos usar, dentre outros. Foram geradas 10 instâncias em cada classe, onde cada instância representa um boletim. A tela padrão do gerador de instâncias está em destaque na Figura [15](#). Definimos também três tipos de comprimentos

mínimos descritos a seguir.

Figura 15: Tela do gerador de instâncias



Fonte: Autoria Própria

O comprimento mínimo que deve ser consumido em uma bobina em caso de consumo parcial é denotado por v e adotamos $v = 450$ m.

O comprimento mínimo para que uma bobina seja considerada aproveitável é denotado por s e adotamos $s = 300$ m.

O comprimento mínimo para que uma bobina suporte a troca de sua bobina pareada é denotado por p e adotamos $p = 750$ m.

Parâmetros fundamentais

Consideramos os seguintes parâmetros fundamentais:

a) Tipos de papelão - definimos pelo tipo de parede: Parede Simples (**S**) com 3 camadas ou Parede Dupla (**D**) com 5 camadas.

b) Tipos de estoque - definimos pelo tamanho do estoque: Pequeno (**P**) com 100 bobinas, Médio (**M**) com 200 bobinas e Grande (**G**) com 300 bobinas.

c) Perfis das bobinas - Após a determinação do tipo de estoque, definimos as características das bobinas que irão compô-lo. Buscando reproduzir o cenário real da IEPO visitada, criamos três tipos de perfis de comprimento para as bobinas, a saber: bobinas novas, medindo 6500 m, tocos com comprimento médio, variando de 750 m a 6499 m e tocos pequenos, com comprimento variando de 300 m a 749 m. Os percentuais em cada perfil estão descritos na Tabela [15](#).

Tabela 15: Perfis das bobinas

Perfil das Bobinas	Comprimento das Bobinas		
	6500	750 - 6500 m	300 - 749 m
Pequeno	5%	5%	90%
Médio	10%	10%	80%
Grande	15%	15%	70%

Fonte: Autoria Própria

d) Tipos de boletins - Com intuito de tornar os testes mais coerentes, o tipo do boletim foi definido a partir do comprimento do boletim (CB) e do comprimento total das bobinas em estoque (CTB). Quando $CB/CTB = 0,65$ por exemplo, temos que para se produzir esse boletim, vamos consumir 65% do comprimento total de bobinas em estoque. Quando a relação entre CB/CTB é um valor pequeno, na maioria dos casos utiliza-se apenas bobinas novas nas soluções. Já o caso em que $CB/CTB = 0,95$ retrata um cenário onde temos um estoque escasso de bobinas para atender o boletim, no qual a maioria das bobinas são utilizadas.

Tabela 16: Tipos de boletins

Tipo de boletim	CB/CTB
Pequeno	65 %
Médio	80 %
Grande	95 %

Fonte: Autoria Própria

A Tabela [17](#) abaixo sintetiza as principais características das classes que foram analisadas.

Tabela 17: Parâmetros das classes

Tipos de papelão	Tipos de estoque	Perfis de bobinas	Tipos de boletins
Parede Simples ou Parede Dupla	Pequeno, Médio ou Grande	Pequeno, Médio ou Grande	Pequeno, Médio ou Grande

Fonte: Autoria Própria

Como pode ser observado na Tabela [17](#), a combinação destes parâmetros gera 54 classes de instâncias, resultado do produto do número de possibilidades em cada parâmetro.

Denotamos as instâncias utilizando as iniciais em negrito de cada parâmetro, sendo assim, na instância **SPMG** teremos parede simples, estoque pequeno, perfil médio e boletim grande. Como foram geradas 10 instâncias para cada classe, temos um total de 540 instâncias analisadas.

Com o intuito dos testes representarem a realidade com maior fidelidade, fizemos um levantamento de custos baseado em dados reais da empresa, apresentado na próxima Seção.

Levantamento de custos de produção

Neste levantamento, o papel utilizado na produção da chapa de papelão tem as seguintes características: gramatura de $120g/m^2$, onda tipo *B* e largura de 2,380 m. Estes valores foram escolhidos por serem os mais comuns no processo produtivo.

Custos com a mão de Obra

Compreende os custos com os salários dos operadores da empilhadeira e dos operadores do corrugador. Existem outros colaboradores envolvidos no processo produtivo, como o encarregado de produção, mas este não está diretamente ligado aos processos de transporte ou substituições de bobinas, que são afetados pelo modelo que iremos utilizar.

Operador da empilhadeira

Este colaborador é responsável basicamente por quatro tipos de transporte dentro da indústria:

- a) Transporte das bobinas do estoque até o corrugador e do corrugador até o estoque.
- b) Transporte dos fardos formados por retângulos de papelão (produto final do corrugador), do corrugador até a área de armazenamento intermediário.
- c) Transporte dos fardos da área de armazenamento intermediário até a impressora flexográfica.
- d) Transporte dos fardos com as caixas acabadas até os caminhões que transportarão a mercadoria até os clientes.

O custo com este tipo de colaborador é de R\$ 1620 reais mensais, o que equivale a um custo de R\$ 0,14 por minuto.

Operador do corrugador

Este colaborador é responsável por colocar e retirar as bobinas do corrugador, o que chamaremos apenas de setup da bobina e manter a qualidade das placas de papelão que serão produzidas.

O custo com este tipo de colaborador é de R\$ 2200 reais mensais, o que equivale a um custo de R\$ 0,19 por minuto.

Aluguel da empilhadeira

Na indústria visitada as empilhadeiras são alugadas e o valor é cobrado por horas de uso. Na ocasião do levantamento dos preços, o valor era de R\$ 44,00 por hora, ou seja,

R\$ 0,73 por minuto.

Custos relacionados ao tipo de consumo das bobinas

O tempo de transporte de uma bobina do estoque até o corrugador ou do corrugador até o estoque é de aproximadamente 5 minutos e o tempo de *setup* da bobina é de aproximadamente 4 minutos. Com isto é possível estabelecer os seguintes custos:

Consumo integral de uma bobina

Neste tipo de consumo temos os seguintes custos envolvidos: custo de transporte da bobina do estoque até o corrugador e custo com *setup* da bobina.

O custo com transporte da bobina do estoque até o corrugador é igual a soma dos custos com o operador da empilhadeira e com o aluguel da empilhadeira. Obtemos então: $5 \cdot 0.14 + 5 \cdot 0,73 = 4,35$ reais e o custo de *setup* da bobina é igual a: $4 \cdot 0.19 = 0,76$ reais.

Portanto, o custo com o consumo integral de uma bobina é de $4,35 + 0,76 = 5,11$ reais, este custo será denotado por β_1 .

Consumo parcial de uma bobina

Neste tipo de consumo temos os seguintes custos envolvidos: custo de transporte da bobina do estoque até o corrugador, custo de transporte da bobina do corrugador até o estoque e custo com *setup* da bobina, ou seja, temos o valor calculado para o consumo integral adicionado ao custo de transporte da bobina do corrugador até o estoque, que denotaremos por β_2 . Utilizando os custos calculados anteriormente temos:

O custo com o consumo parcial de uma bobina é de $4,35 \cdot 2 + 0,76 = 9,46$ reais

Custos com a reciclagem das sobras não aproveitáveis

O valor para reciclagem de um metro de papelão com as especificações dadas inicialmente é de R\$ 0,05 por metro, custo que será denotado por β_3

Custos com as paragens do corrugador

As paragens do corrugador ocorrem por vários motivos, como por exemplo: a bobina instalada não suporta troca da bobina pareada (que tentaremos minimizar neste trabalho), problemas mecânicos, preparação da máquina, enrosco de papel, quebra de papel - folhas coladas, quebra de papel - pick lateral e paradas não identificadas.

A velocidade média do corrugador é de 150 m por minuto. O preço de um quilograma de chapa de papelão com as especificações dadas é igual a R\$ 3,40 e o peso de um metro de placa de papelão simples é igual a 0,942 kg. Logo, o valor da chapa de papelão produzida

em um minuto é igual a $150 \cdot 0,942 \cdot 3,4 = 480,42$ reais, este custo de produção será denotado por β_4 . Para simplificar, vamos estabelecer que as paragens são todas de 1 minuto.

Resumindo, para consumos integrais temos um custo associado β_1 , além de possível custo β_4 associado as paragens, e para consumos parciais temos um custo associado $\beta_1 + \beta_2$ e possíveis custos de reciclagens β_3 e custos com paragens β_4 .

5.4.2 Análise geral dos resultados

A Tabela 18 traz os resultados gerais para as 540 instâncias e a Tabela 19 traz a média dos valores obtidos para as 10 instâncias nas 54 classes analisadas.

Tabela 18: Análise geral das 540 instâncias

Item analisado	Totais	Percentuais
Total de Instâncias analisadas	540	100%
Instâncias com prova de otimalidade	266	49,25%
Instâncias sem prova de otimalidade	274	50,75%
Instâncias com sobras não aproveitáveis	36	6,67%
Instâncias com paragens	60	11,11%
Instâncias com apenas consumo integral	341	63,14%
Instâncias com um consumo parcial	63	11,66%
Instâncias com dois consumos parciais	45	8,33%
Instâncias com três consumos parciais	44	8,14%
Instâncias com quatro consumos parciais	24	4,44%
Instâncias com cinco consumos parciais	23	4,25%

Fonte: Autoria Própria

Essa primeira análise geral contida na Tabela 18 aponta que o modelo atende de forma satisfatória aos principais objetivos propostos. Na prática, na empresa visitada, são geradas cerca de 30 toneladas de sobras não aproveitáveis por mês e são processados 200 boletins em média, nos quais são utilizadas cerca de 12 bobinas por boletim, fornecendo um total médio de 2400 bobinas e uma perda média de $12,5 \text{ kg/bobina}$, sem auxílio de ferramentas de decisão. Em Chantrapornchai e Sathapanawat (2012), é apresentado um estudo de caso, onde a perda obtida com a utilização de uma heurística apresentada em Chantrapornchai e Sathapanawat (2011) foi de $5,38 \text{ kg/bobina}$. Levando em conta que na produção de todas as instâncias das 54 classes analisadas na Tabela 18 foram necessárias 51.531 bobinas e gerou-se uma perda de apenas 401 kg , distribuídos em 36 instâncias com sobras não aproveitáveis, a perda foi de $0,007 \text{ kg/bobina}$, mostrando que os resultados via modelo são bem melhores que ambos os casos. Destaca-se que no caso da heurística proposta em Chantrapornchai e Sathapanawat (2011), utiliza-se a estratégia de minimização dos tocos, o que não foi considerado no MLIM.

Em relação às paragens, não é possível uma análise direta, pois na prática, as paragens

são evitadas utilizando-se bobinas com muito papel e que suportam muitas trocas, porém essa estratégia acaba gerando muitos tocos durante o processo produtivo, bem como o acúmulo de tocos pequenos que são difíceis de combinar.

Em uma situação ideal, segundo entrevista com o encarregado de produção do corrugador, deveríamos ter, para cada boletim, no máximo um consumo parcial por porta-bobina, ou seja, no máximo 3 consumos parciais para boletins de parede simples e no máximo 5 consumos parciais para boletins de parede dupla. Esse objetivo foi claramente atingido pelos resultados na Tabela 18, sendo que em apenas 8,14% das instâncias tivemos três consumos parciais e em apenas 4,25 % tivemos cinco consumos parciais, prevalecendo os consumos integrais.

Tabela 19: Resumo das médias dos resultados das 10 instâncias de cada classe

	F.O	T.	B.	C.I	C.P	S.N.A	C.S.N.A	P.	GAP
01 - SPPP	152,73	547,50	29,80	29,70	0,10	0,10	0,30	0,00	0,41%
02 - SPPM	274,41	186,55	53,70	53,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03%
03 - SPPG	8702,17	7,32	85,90	85,90	0,00	0,00	0,00	17,20	0,00%
04 - SPMP	97,67	830,45	16,90	14,30	2,60	0,00	0,00	0,00	1,52%
05 - SPMM	205,91	191,18	40,20	40,10	0,10	0,10	1,10	0,00	0,25%
06 - SPMG	411,87	11,48	80,60	80,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00%
07 - SPGP	116,35	1462,04	20,30	17,40	2,90	0,00	0,00	0,00	2,97%
08 - SPGM	158,48	1802,07	29,80	28,50	1,30	0,50	10,90	0,00	5,93%
09 - SPGG	388,30	373,48	75,90	75,80	0,10	0,10	0,40	0,00	0,13%
10 - SMPP	296,38	190,40	58,00	58,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05%
11 - SMPM	549,33	372,87	107,50	107,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02%
12 - SMPG	19612,76	11,40	171,50	171,50	0,00	0,00	0,00	39,00	0,00%
13 - SMMP	173,47	1803,68	32,40	30,60	1,80	0,30	1,50	0,00	5,73%
14 - SMMM	392,96	195,72	76,90	76,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08%
15 - SMMG	818,11	199,60	160,10	160,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00%
16 - SMGP	211,13	1632,34	39,70	37,80	1,90	0,00	0,00	0,00	3,85%
17 - SMGM	305,56	1452,71	59,20	58,50	0,70	0,00	0,00	0,00	2,15%
18 - SMGG	772,63	217,67	151,20	151,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01%
19 - SGPP	436,91	200,11	85,50	85,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01%
20 - SGPM	817,60	28,38	160,00	160,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00%
21 - SGPG	33741,62	562,03	257,00	257,00	0,00	0,00	0,00	67,50	0,07%
22 - SGMP	250,28	1805,79	48,00	46,90	1,10	0,10	4,30	0,00	2,65%
23 - SGMM	602,98	31,45	118,00	118,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00%
24 - SGMG	1225,89	416,55	239,90	239,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01%
25 - SGGP	305,25	1534,72	58,80	57,70	1,10	0,00	0,00	0,00	1,89%
26 - SGGM	450,463	1804,779	87,30	86,30	1,00	0,10	0,20	0,00	1,16%
27 - SGGG	1152,82	213,84	225,60	225,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00%
28 - DPPP	152,64	1439,39	29,70	29,50	0,20	0,10	0,10	0,00	2,34%
29 - DPPM	272,87	303,31	53,40	53,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10%
30 - DPPG	5434,22	144,88	85,60	85,50	0,10	0,10	0,10	10,40	0,00%
31 - DPMP	110,84	1802,51	17,60	12,90	4,70	0,10	9,20	0,00	14,00%
32 - DPMM	204,19	1252,65	39,70	39,40	0,30	0,30	0,40	0,00	1,35%
33 - DPMG	413,33	529,90	80,80	80,70	0,10	0,10	0,10	0,00	0,25%
34 - DPGP	134,17	1805,67	22,00	17,00	5,00	0,00	0,00	0,00	14,35%
35 - DPGM	170,53	1645,78	31,30	28,90	2,40	0,40	3,00	0,00	10,78%
36 - DPGG	391,67	1172,98	76,30	75,90	0,40	0,40	0,70	0,00	0,71%
37 - DMPP	293,75	1357,39	57,40	57,30	0,10	0,00	0,00	0,00	1,53%
38 - DMPM	535,53	1134,51	104,80	104,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,52%
39 - DMPG	21248,21	515,41	171,90	171,90	0,00	0,00	0,00	42,40	0,09%
40 - DMMP	185,92	1803,99	33,30	29,70	3,60	0,10	1,90	0,00	10,87%
41 - DMMM	406,68	1312,54	79,50	79,40	0,10	0,00	0,00	0,00	0,94%
42 - DMMG	822,71	809,41	161,00	161,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16%
43 - DMGP	220,71	1806,34	39,70	35,60	4,10	0,10	0,10	0,00	8,38%
44 - DMGM	313,25	1804,45	58,90	56,10	2,80	0,40	1,90	0,00	5,87%
45 - DMGG	773,08	965,35	151,20	151,10	0,10	0,10	0,20	0,00	0,29%
46 - DGPP	451,14	936,51	88,00	88,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,66%
47 - DGPM	818,11	1629,38	160,10	160,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,40%
48 - DPGP	33888,81	972,64	257,60	257,60	0,00	0,00	0,00	67,80	0,14%
49 - DGMP	261,28	1808,66	48,10	44,60	3,50	0,10	5,30	0,00	7,44%
50 - DGMM	613,56	1614,38	119,90	119,70	0,20	0,00	0,00	0,00	0,94%
51 - DGGM	1227,86	1356,66	240,20	240,10	0,10	0,10	0,10	0,00	0,12%
52 - DGGP	319,52	1672,56	60,40	57,90	2,50	0,00	0,00	0,00	4,09%
53 - DGGM	462,86	1805,26	89,00	87,00	2,00	0,20	0,70	0,00	3,59%
54 - DGGG	1155,74	1637,42	226,00	226,00	0,00	0,10	0,10	0,00	0,32%

Legenda: F.O: Função objetivo, T: Tempo de processamento em segundos, B.: Média de bobinas utilizadas, C.I: Média das bobinas que são consumidas integralmente, C.P: Média das bobinas que são consumidas parcialmente, S.N.A: Média das sobras não aproveitáveis, C.S.N.A: Média dos comprimento das sobras não aproveitáveis, P.: Quantidade média de paragens, GAP: Valor médio do GAP relativo.

Destaca-se na Tabela 19, que para as classes SPGM, SMMP, SGMP, SGGM, DPMP, DPGP, DMMP, DMGP, DMGM, DGMP e DGGM não obteve-se a prova de otimalidade para nenhuma de suas instâncias. Dessas 11 classes, 63,63% são papelão de parede dupla, houve equilíbrio se considerarmos os tipos de estoque, sendo 3 classes com estoque P e 4 classes para estoques M e G, já para o perfil do estoque, 100% das instâncias se concentram nos perfis M ou G, havendo equilíbrio entre eles e finalmente, para o tipo de boletim, 100% das instâncias se concentram nos tipos P e M, sendo 63,63% do tipo P. Os dois maiores valores para o GAP médio foram observados nas classes DPGP e DPMP, valendo 14,35% e 14% respectivamente e o pico do GAP relativo foi atingido pela oitava instância da classe DPMP, sendo igual a 19,64%. Para as instâncias com papelão de parede simples, o maior GAP médio foi observado na classe SPGM, valendo 5,93% e o pico do GAP relativo, foi atingido pela terceira instância dessa mesma classe, valendo 8,27%.

A seguir, apresentamos uma análise de cada parâmetro das classes de forma independente, com o intuito de compreender suas influências nas principais considerações do PABC.

5.4.3 Análise da influência de cada parâmetro nos itens analisados

Nessa análise utilizaremos dois tipos de tabelas. A primeira traz um detalhamento para cada parâmetro dos dados fornecidos na Tabela 18 e a segunda traz as médias dos valores fornecidos na Tabela 19. Essas tabelas se complementam e permitem uma análise mais conclusiva dos resultados. Como as Tabelas 21, 23, 25 e 27 são um resumo da Tabela 19, elas mantêm a mesma legenda.

Comparativo entre papelão de parede simples e parede dupla

Tabela 20: Comparativo entre tipos de papelão

Item analisado	Totais	Percentuais	Simples		Dupla	
Total de Instâncias	540	100,00%	270		270	
Instâncias com prova de otimalidade	266	49,25%	175	64,81%	91	15,96%
Instâncias sem prova de otimalidade	274	50,75%	95	35,19%	179	84,04%
Instâncias com sobras não aproveitáveis	36	6,67%	10	27,77%	26	72,23%
Instâncias com paragens	60	11,11%	30	50,00%	30	50,00%
Instâncias com apenas consumo integral	341	63,14%	185	54,26%	156	45,74%
Instâncias com um consumo parcial	63	11,66%	40	63,49%	23	36,51%
Instâncias com dois consumos parciais	45	8,33%	28	62,22%	17	37,78%
Instâncias com três consumos parciais	44	8,14%	17	38,63%	27	61,37%
Instâncias com quatro consumos parciais	24	4,44%	0	0,00%	24	100,00%
Instâncias com cinco consumos parciais	23	4,25%	0	0,00%	23	100,00%

Tabela 21: Médias dos resultados da Tabela 18 - Comparativo entre tipos de papelão

	F.O	T.	B.	C.I	C.P	S.N.A	C.S.N.A	P.	GAP
Parede Dupla	2640,12	1297,78	95,68	94,46	1,21	0,10	0,89	4,47	3,34%

Fonte: Autoria Própria

Destacamos na Tabela [20](#), que entre as instâncias com solução ótima, 64,81% referem-se a papelão de parede simples, e somente 15,96% a papelão de parede dupla. Como na prática, os boletins de parede simples são mais comuns, o resultado é satisfatório.

Em relação às instâncias com sobras não aproveitáveis, 72,23% são para papelão de parede dupla, isso era esperado devido ao aumento no número de camadas, nas quais mais sobras não aproveitáveis podem ser geradas. Da Tabela [21](#) concluímos ainda que o comprimento das sobras não aproveitáveis também é maior para o papelão de parede dupla.

Em relação às instâncias com paragens, de acordo com a Tabela [20](#), este número foi idêntico para o papelão de parede simples e dupla, já a média de paragens, pela Tabela [21](#), foi discretamente menor para o papelão de parede dupla. Isso ocorre pois no caso de papelão de parede simples, teremos um acúmulo maior de bobinas pequenas em cada porta-bobinas (camada), induzindo um número maior de paragens e um consequente aumento na média.

Em relação ao consumos parciais, pela Tabela [20](#) temos que para os boletins com parede simples, nenhuma instância utilizou mais que três consumos parciais (um por porta-bobina) e para os boletins de parede dupla, nenhuma instância utilizou mais que cinco consumos parciais (um por porta-bobina), situação ideal em termos práticos. Pela Tabela [21](#) concluímos também que o quantidade média de consumos parciais aumenta para o papelão de parede dupla, o que era esperado devido ao aumento no número de camadas.

Como as sobras não aproveitáveis são geradas nos consumos parciais, deduz-se que em cada boletim de parede simples têm-se no máximo três sobras não aproveitáveis e no caso dos boletins de parede dupla, no máximo cinco sobras não aproveitáveis e em nosso testes, constatamos no máximo duas sobras não aproveitáveis por instância e apenas quatro instâncias ou 0,74% com duas sobras não aproveitáveis, sendo três no papelão de parede simples, nas classes SPGM (duas) e na classe SMMP (uma) e apenas uma no papelão de parede dupla, na classe DMGM.

Deduz-se que ao aplicarmos o modelo para selecionar as bobinas para cada porta-

bobina, seleciona-se as melhores bobinas que podem ser consumidas integralmente (forma de consumo mais barata) e, no final, seleciona-se se necessário, uma bobina para ser consumida parcialmente em cada porta-bobina, de forma a preencher o restante do boletim e atender aos objetivos propostos, como por exemplo, a minimização das sobras não aproveitáveis.

Em relação aos consumos integrais, pela Tabela 21, nota-se uma discreta redução para o papelão de parede dupla, induzida pelo aumento no número de consumos parciais, mais comuns nesse tipo de papelão.

Em relação ao valor da função objetivo, percebe-se uma discreta redução para o papelão de parede dupla, provocado pela redução na média das paragens e pela redução na média dos consumos integrais.

Em relação ao tempo de processamento, de acordo com a Tabela 21, houve um aumento para o papelão de parede dupla, o que era esperado pelo aumento no número de camadas. O tempo médio por camada foi de 223,28 segundos para o papelão de parede simples e de 259,55 segundos para o de parede dupla.

Em relação ao total de bobinas, a média para o papelão de parede dupla foi discretamente maior, algo esperado, pois temos mais camadas.

Em relação ao GAP, de acordo com a Tabela 21, houve aumento expressivo para o papelão de parede dupla, algo que era esperado pois duas camadas extras devem ser processadas. Para o papelão de parede simples, a classe SPGM apresentou o maior GAP médio, igual a 5,93% e para o papelão de parede dupla, o maior GAP médio foi para a classe DPGP, igual a 14,35%.

Além do exposto na Tabela 20, destacamos que a análise geral dos dados indica que para o papelão de parede simples, apenas 27 instâncias ou 10%, apresentaram GAP superior a 5%, sendo o maior GAP igual a 8,27% para uma instância da classe SPGP. Já para o papelão de parede dupla, 74 instâncias ou 27,40% apresentaram GAP superior a 5%, sendo o maior GAP igual a 19,64% para uma instância da classe DPMP.

Comparativo entre estoque pequeno, médio e grande

Destacamos na Tabela 22 que a quantidade de instâncias com solução ótima diminuiu na medida que aumentamos o tamanho do estoque, o que era esperado, pois temos mais bobinas para combinar.

Em relação às instâncias com sobras não aproveitáveis, estas diminuem na medida que aumentamos o tamanho do estoque, e isso deve-se ao fato de que com um estoque maior,

Tabela 22: Comparativo entre tipos de estoque

Item analisado	Totais	Percentuais	Pequeno		Médio		Grande	
			180	180	180	180		
Total de Instâncias	540	100,00%						
Instâncias com prova de otimalidade	266	49,25%	102	38,34%	88	33,08%	76	17,67%
Instâncias sem prova de otimalidade	274	50,75%	78	28,46%	92	33,57%	104	37,97%
Instâncias com sobras não aproveitáveis	36	6,67%	21	58,33%	8	22,22%	7	19,45%
Instâncias com paragens	60	11,11%	20	33,33%	20	33,33%	20	33,33%
Instâncias com apenas consumo integral	341	63,14%	108	31,67%	120	35,19%	113	33,14%
Instâncias com um consumo parcial	63	11,66%	19	30,15%	15	23,80%	29	46,05%
Instâncias com dois consumos parciais	45	8,33%	14	31,11%	20	44,44%	11	24,45%
Instâncias com três consumos parciais	44	8,14%	17	38,63%	7	15,90%	20	45,47%
Instâncias com quatro consumos parciais	24	4,44%	5	20,83%	14	58,34%	5	20,83%
Instâncias com cinco consumos parciais	23	4,25%	17	73,91%	4	17,39%	2	8,70%

Fonte: Autoria Própria

Tabela 23: Médias dos resultados da Tabela 18 - Comparativo entre tipos de estoque

	F.O	T.	B.	C.I	C.P	S.N.A	C.S.N.A	P.	GAP
Estoque Médio	2662,90	976,99	95,23	94,39	0,84	0,06	0,31	4,52	2,25%
Estoque Grande	4343,48	1112,84	142,74	142,07	0,67	0,04	0,59	7,52	1,31%

Fonte: Autoria Própria

teremos mais possibilidades de combinação de bobinas, de forma a evitar a geração de sobras não aproveitáveis. Pela Tabela [23](#) concluímos ainda que o comprimento das sobras não aproveitáveis diminui na medida que aumentamos o tamanho do estoque, e isso deve-se ao fato de termos mais bobinas em estoque, possibilitando uma escolha que minimize esse comprimento.

Em relação às instâncias com paragens, de acordo com a Tabela [22](#), este número foi exatamente o mesmo para cada tipo de estoque, já a média de paragens, pela Tabela [23](#), foi afetada de forma significativa pelo tamanho do estoque, de forma que ao se aumentar o tamanho do estoque, aumentou-se também o número de paragens. Isso ocorre pois pela Tabela [19](#), apenas as classes SPPG, DPPG, SMPG, DMPG, SGPG e DGPG apresentaram paragens e para todas elas, temos um mesmo tipo de perfil de bobinas (P) no qual temos muitas bobinas que induzem paragens e um mesmo tamanho de boletim (G), que obriga o uso da maioria do estoque, incluindo essas bobinas pequenas e com isto é esperado que a média das paragens aumente na medida que aumentamos o tamanho do estoque, pois aumentamos o uso de bobinas pequenas que induzem o aumento no número das paragens.

Em relação aos consumos parciais, pela Tabela [23](#), concluímos que há redução na média, na medida que aumentamos o tamanho do estoque. Essa redução é induzida pelo aumento no número de consumos integrais, que aumentam nos estoques com mais bobinas, uma vez que são mais baratos e são priorizados.

Uma conclusão interessante nesse ponto é a seguinte: como os consumos integrais são prioridade, o aumento do total de bobinas é acompanhado pelo aumento nos consumos integrais, esse aumento nos consumos integrais induz uma redução nos consumos parciais,

e essa redução dos consumos parciais é acompanhada de uma redução na quantidade das sobras não aproveitáveis, que surgem necessariamente dos consumos parciais.

Em relação ao valor da função objetivo, pela Tabela 23, concluímos que esse aumenta, na medida que aumentamos o tamanho do estoque, isso ocorre pois o tamanho do boletim foi definido em função do tamanho do estoque. Logo, estoques maiores gerarão boletins maiores, para os quais espera-se valores médios de F.O maiores.

O tempo de processamento também aumenta, na medida que aumentamos o tamanho do estoque, pois com mais bobinas disponíveis, a seleção das bobinas ideais torna-se mais difícil.

Em relação ao total de bobinas utilizadas, este aumenta, conforme aumentamos o tamanho do estoque, pois o tamanho do boletim depende do tamanho do estoque e boletins maiores requerem em média, mais bobinas.

Os dados indicam que o GAP diminui na medida que aumentamos o tamanho do estoque, e isso deve-se ao fato de que apesar de termos mais bobinas para combinar, temos bobinas melhores o que facilita a solução. Os maiores GAP's médios, de acordo com a Tabela 19 foram obtidos para o estoque pequeno, na classe DPGP, com valor de 14,35%, para o estoque médio, na classe DMMP com valor de 10,87% e para o estoque grande, na classe DGMP, com valor de 7,44%.

Comparativo entre perfis de bobinas

Tabela 24: Comparando perfis de bobinas

Item analisado	Totais	Percentuais	Pequeno		Médio		Grande	
			180	180	180	180		
Total de Instâncias	540	100,00%						
Instâncias com prova de otimalidade	266	49,25%	128	48,12%	89	33,45%	49	18,43%
Instâncias sem prova de otimalidade	274	50,75%	52	18,97%	91	33,21%	131	47,82%
Instâncias com sobras não aproveitáveis	36	6,67%	3	8,33%	12	33,33%	21	58,34%
Instâncias com paragens	60	11,11%	60	100,00%	0	0,00%	0	0,00%
Instâncias com apenas consumo integral	341	63,14%	174	51,02%	123	36,07%	44	12,91%
Instâncias com um consumo parcial	63	11,66%	6	9,52%	17	26,98%	40	36,5%
Instâncias com dois consumos parciais	45	8,33%	0	0,00%	16	35,55%	29	64,45%
Instâncias com três consumos parciais	44	8,14%	0	0,00%	13	29,54%	31	70,46%
Instâncias com quatro consumos parciais	24	4,44%	0	0,00%	10	41,66%	14	58,34%
Instâncias com cinco consumos parciais	23	4,25%	0	0,00%	10	43,47%	13	56,53%

Fonte: Autoria Própria

Tabela 25: Médias dos resultados da Tabela 18 - Comparativo entre perfis de bobinas

	F.O	T.	B.	C.I	C.P	S.N.A	C.S.N.A	P.	GAP
Perfil Pequeno	7093,29	585,55	112,09	112,06	0,03	0,02	0,03	13,57	0,35%
Perfil Médio	468,08	987,59	90,73	89,72	1,01	0,07	1,33	0,00	2,57%
Perfil Grande	433,47	1378,30	83,46	81,87	1,59	0,13	1,01	0,00	3,69%

Fonte: Autoria Própria

Destacamos na Tabela 24 que a quantidade de instâncias com solução ótima diminui na medida que aumentamos o perfil do estoque. Isso deve-se ao fato de que com mais bobinas

grandes no estoque a obtenção das soluções torna-se mais trabalhosa, pois desejamos minimizar a quantidade total de bobinas utilizadas e então teremos mais bobinas que podem ser utilizadas.

Em relação a quantidade de instâncias com sobras não aproveitáveis conclui-se que quanto maior o perfil do estoque, mais instâncias com sobras não aproveitáveis são geradas, isso ocorre pois ao aumentarmos o tamanho dos perfis, temos claramente uma redução nos percentuais de instâncias apenas com consumos integrais e um aumento nos percentuais das instâncias com um ou mais consumos parciais, e são dessas instâncias com consumos parciais que surgem as sobras não aproveitáveis. O comprimento das sobras não aproveitáveis também aumenta, quando aumentamos o perfil do estoque, pois o uso de bobinas maiores induzem sobras não aproveitáveis maiores.

Em relação as paragens, pela Tabela 24 concluímos que essas se concentraram 100% no perfil pequeno, e isso ocorre pois, é neste perfil que temos a maior quantidade de bobinas pequenas, que induzem mais trocas, e conseqüentemente, mais paragens.

Em relação a função objetivo, pela Tabela 25 concluímos que esse valor reduz, na medida que aumentamos o perfil do estoque, o que está sendo afetado pela redução no número total de bobinas utilizadas, pela redução de consumos integrais e pela redução no número de paragens.

Em relação ao tempo de processamento, pela Tabela 25 concluímos que esse aumenta, na medida que aumentamos o perfil do estoque, isso ocorre pois com o acréscimo de bobinas maiores, priorizadas no consumo, a obtenção das soluções torna-se mais trabalhosa.

Em relação ao total de bobinas, esse também diminui, uma vez que tendo bobinas maiores, podemos alocar uma quantidade menor de bobinas.

Os dados apontam um aumento no GAP quando aumenta-se o perfil do estoque, evidenciando que lidar com estoques com mais bobinas grandes é mais trabalhoso. Os maiores GAPS médios, de acordo com a Tabela 19 foram obtidos para o perfil pequeno na classe DPPP, com valor de 2,34%, para o perfil médio, na classe DPMP, com valor de 14,00 % e para o perfil grande, na classe DPGP, com valor de 14,35%.

Comparativo entre boletim pequeno, médio e grande

Destacamos na Tabela 26 que a quantidade de instâncias com solução ótima aumenta, quando aumentamos o tamanho do boletim. Para o caso específico dos boletins grandes, das 180 instâncias, para 134 ou 74,44% temos solução ótima. Isso deve-se ao fato de que o tamanho do boletim é calculado em função do tamanho do estoque e para boletins grandes

Tabela 26: Comparando entre tipo de boletins

Item analisado	Totais	Percentuais	Pequeno		Médio		Grande	
Total de Instâncias	540	100,00%	180		180		180	
Instâncias com prova de otimalidade	266	49,25%	51	19,17%	81	30,45%	134	50,38%
Instâncias sem prova de otimalidade	274	50,75%	129	47,08%	99	36,13%	46	16,79%
Instâncias com sobras não aproveitáveis	36	6,67%	9	25,00%	17	47,22%	10	27,78%
Instâncias com paragens	60	11,11%	0	0,00%	0	0,00%	60	100,00%
Instâncias com apenas consumo integral	341	63,14%	59	17,30%	129	37,82%	153	44,88%
Instâncias com um consumo parcial	63	11,66%	24	38,09%	28	44,44%	11	17,47%
Instâncias com dois consumos parciais	45	8,33%	27	60,00%	18	40,00%	0	0,00%
Instâncias com três consumos parciais	44	8,14%	28	63,63%	9	20,45%	7	15,92%
Instâncias com quatro consumos parciais	24	4,44%	19	79,16%	5	20,84%	0	0,00%
Instâncias com cinco consumos parciais	23	4,25%	23	100,00%	0	0,00%	0	0,00%

Fonte: Autoria Própria

Tabela 27: Médias dos resultados da Tabela 18 - Comparativo entre tipos de boletins

	F.O	T.	B.	C.I	C.P	S.N.A	C.S.N.A	P.	GAP
Boletim Pequeno	231,67	1357,78	43,66	41,69	1,96	0,06	1,26	0,00	4,60%
Boletim Médio	419,74	1031,55	81,61	80,99	0,62	0,11	1,01	0,00	1,89%
Boletim Grande	7343,43	562,11	161,02	160,96	0,06	0,06	0,09	13,57	0,13%

Fonte: Autoria Própria

utilizaremos 95% do estoque, ou seja, praticamente todas as bobinas são utilizadas o que facilita a obtenção das soluções.

Em relação as quantidades de instâncias com sobras não aproveitáveis, percebe-se um equilíbrio para os boletins pequenos e grandes e os dados indicam que nos dois casos mais extremos gera-se menos sobras não aproveitáveis. Os boletins médios foram os que apresentaram maior número de sobras não aproveitáveis, com 47,22% do total.

Já em relação ao comprimento das sobras não aproveitáveis, percebe-se claramente que quanto maior o boletim, menor o comprimento total das sobras não aproveitáveis, ou seja, boletins grandes (que equivalem a estoques mais escassos), geram sobras não aproveitáveis menores. Isso ocorre pois as bobinas selecionadas no fim do processo serão as menores e essas geram consequentemente sobras menores. Para os boletins pequenos por exemplo, pode-se atender ao boletim utilizando-se apenas bobinas grandes, as quais induzem sobras não aproveitáveis maiores.

Em relação às instâncias com paragens, pela Tabela [26](#) concluímos que essas se concentraram 100% nos boletins grandes, pois somente nestes obriga-se o consumo de muitas bobinas pequenas presentes no estoque, o que não ocorre nos boletins pequenos e médios e são justamente as bobinas pequenas que influenciam no número de paragens.

Em relação as médias dos consumos integrais, pela Tabela [27](#) concluímos que esses valores aumentam, quando aumentamos o tamanho dos boletins e ocorre uma consequente redução dos consumos parciais. Isso ocorre pois ao aumentarmos o tamanho do boletim, aumentamos, pela definição do tamanho do boletim, o percentual do estoque de bobinas

que é consumido e como o consumo integral é prioridade, ocorre aumento natural desses, o que induz redução dos consumos parciais.

Em relação ao valor da função objetivo, pela Tabela 27 concluimos que esse valor aumenta, na medida que aumentamos o tamanho dos boletins, isto é esperado, uma vez que boletins maiores consomem naturalmente uma quantidade maior de bobinas, como pode ser constatado na tabela em análise.

Em relação ao tempo de processamento, pela Tabela 27 concluimos que esse valor diminui na medida que aumentamos o tamanho dos boletins, pois o comprimento dos boletins depende do tamanho do estoque e os boletins grandes consomem por definição, 95% do estoque, ou seja, praticamente todas as bobinas são utilizadas, simplificando a análise. Devido ao mesmo argumento o GAP diminui quando aumentamos o tamanho dos boletins.

Nesse capítulo, o PABC que até o momento havia sido tratado apenas superficialmente, foi totalmente caracterizado e pela primeira vez, foi apresentado um modelo matemático capaz de integrar quatro das principais considerações do problema. Testes computacionais utilizando instâncias geradas com base em dados reais atestam que o modelo proposto é eficiente para lidar com o problema apresentado.

Capítulo 6

Conclusões e Perspectivas Futuras

O ambiente de produção das Indústrias de Embalagens de Papelão Ondulado (IEPO) é rico em problemas de Pesquisa Operacional, tais como problemas de corte e sequenciamento de produção, como ficou claro no Capítulo 3. Por meio das visitas técnicas realizadas em uma IEPO de grande porte situada na cidade de Uberaba-MG, conseguimos identificar dois problemas relevantes dentro do processo produtivo e pouco explorados, sendo que ambos ocorrem no corrugador, máquina multi-estágio que produz as chapas de papelão ondulado. O primeiro, denotado por Problema de Alocação de Bobinas no Corrugador (PABC), tinha sido investigado apenas superficialmente em dois artigos, [Chantrapornchai e Sathapanawat \(2011\)](#) e [Chantrapornchai e Sathapanawat \(2012\)](#), sendo que neste último é apresentada uma heurística. O outro problema, denotado por Problema de Minimização de Trocas de Gramaturas e Rolos Corrugadores (PMTGRC) é inédito, e foi tratado utilizando a teoria desenvolvida para um problema bem conhecido, o Problema de Minimização de Trocas de Ferramentas (PMTF).

Ao compreender a relevância dos problemas e os impactos que poderiam ser causados com a resolução dos mesmos, apresentamos uma descrição detalhada do processo produtivo em uma IEPO com foco no processo de corrugação e identificamos e descrevemos os principais problemas presentes neste processo. A partir daí, apresentamos uma caracterização completa do Problema de Alocação de Bobinas no Corrugador e do Problema de Minimização de Troca de Gramaturas e Rolos Corrugadores. A caracterização do PABC por exemplo, é bem mais profunda e completa do que a apresentada em [Chantrapornchai e Sathapanawat \(2011\)](#).

Com o entendimento das principais considerações dos problemas, apresentamos modelos lineares capazes de representá-los com fidelidade, sendo um modelo para o PABC e quatro para o PMTGRC. Para avaliar esses modelos, apresentamos uma série de testes

computacionais, sendo que o primeiro passo dessa fase, foi a criação de dois geradores de dados, que não encontram paralelo em nenhum outro trabalho, baseados nos aspectos reais do processo produtivo das IEPO.

Os resultados dos testes computacionais atestam que o modelo apresentado para o PABC atende de forma satisfatória aos principais objetivos propostos. Houve acentuada redução nos consumos parciais, mais caros que os consumos integrais e redução das sobras não aproveitáveis, que impactam em custos de reciclagem. A quantidade de paragens também é minimizada, mostrando ser possível fazer um sequenciamento das bobinas no corrugador de forma a minimizar as paragens sem ter que fazer aproveitamento de gramaturas maiores que as contratadas, algo muito comum na prática ou se realizar produção em excesso. Ao se evitar o aproveitamento de gramaturas evita-se o desperdício de matéria-prima, pois o cliente não paga pelo acréscimo e evitando o excesso de produção reduz-se custos de estocagem.

Em relação ao PMTGRC, os quatro modelos apresentados tiveram desempenho computacional satisfatório para algumas classes de instâncias, provando-se a otimalidade para a maioria das instâncias em tempos inferiores a 600 segundos. Destacamos o modelo 1 para as classes de papelão de parede simples e o modelo 3 para os papelões de parede dupla. Para uma das classes 3 não se provou a otimalidade para nenhuma das 10 instâncias no tempo de 600 segundos, e para a outra classe, somente para o modelo 3 provou-se a otimalidade para todas as instâncias, no tempo estipulado. Esse resultado aponta que para classe maiores serão necessárias melhorias nos modelos, para obtenção da otimalidade em tempos menores e aceitáveis do ponto de vista prático.

Comparamos também algumas sequências de boletins de parede simples utilizadas na prática, com as geradas via modelo 1, e observamos que houve redução no número de trocas associadas a gramaturas e rolos corrugadores, indicando que o modelo apresentado atende de forma satisfatória aos principais objetivos propostos, reduzindo custos de produção. A comparação com um conjunto de 20 sequências de boletins utilizadas na prática apontam que os resultados obtidos via modelo 1 são melhores em 95% dos casos. Entendemos que o PMTGRC é um problema interessante, abordado pela primeira vez nessa tese e que merece ser investigado sobre outras perspectivas, como destacamos nas propostas futuras.

6.1 Propostas futuras

Durante o desenvolvimento dessa tese identificamos algumas direções que poderiam ser exploradas posteriormente as quais listamos abaixo.

Em relação ao PABC destacamos os seguinte pontos.

Aproveitamento de gramaturas.

Na prática, é comum o aproveitamento das sobras das últimas bobinas de um boletim no boletim subsequente, desde que esse seja de gramatura menor. Quando não há este aproveitamento, muitas destas sobras vão para a reciclagem. Comparar a produção com aproveitamento de gramaturas e sem aproveitamento de gramaturas é relevante para que a melhor decisão seja tomada. Tais observações também são válidas para o PMTGRC.

Processar vários boletins consecutivos a partir de um mesmo estoque.

Em nossa abordagem, para a produção de cada boletim criou-se um determinado estoque e os vários estoques criados funcionam como fotografias da evolução do estoque, decorrente da produção de cada boletim. Uma direção a ser explorada é analisar o processamento de vários boletins consecutivos a partir de um único estoque inicial, o que possibilitaria a reutilização de uma mesma bobina em vários boletins, diferente de nossa abordagem atual onde uma bobina só pode ser utilizada uma vez em um determinado boletim.

Trabalhar com vários corrugadores.

Em nossa abordagem realizamos a programação do uso das bobinas em apenas um corrugador, cenário mais comum nas IEPO. Porém, analisar o cenário onde temos vários corrugadores é interessante, pois apesar de mais raras, existem algumas IEPO com esta configuração. Tais observações também são válidas para o PMTGRC.

Inserir sequenciamento das bobinas no modelo.

Após a seleção via modelo de quais bobinas serão utilizadas, ainda é necessário sequenciá-las nos pinos e para tanto utilizamos uma estratégia de sequenciamento que se mostrou eficiente. Uma direção a ser explorada é a inserção deste sequenciamento dentro do modelo.

Considerar velocidade do corrugador.

Em nossa abordagem utilizamos o valor da velocidade média do corrugador, 150 m/min, como valor padrão para a velocidade. Na prática, o corrugador pode sofrer

alterações na velocidade e isso afetará, por exemplo, o comprimento mínimo para uma bobina suportar a troca da bobina pareada e conseqüentemente o tempo real de paragem, destacada acima. Considerar a velocidade real tornaria o modelo ainda mais realista o que reforça o interesse pelo assunto.

Considerar permutações nos porta-bobinas utilizados na produção dos boletins.

O corrugador da IEPO visitada possui 5 porta-bobinas, que podem ser denotados a partir do primeiro até o último, por 1, 2, 3, 4 e 5, sendo dois deles, o 2º e o 4º, específicos para a produção dos miolos. Para os outros três, a partir dos quais as capas serão produzidas, existe certa flexibilidade de escolha de qual será utilizado na produção de um boletim. Por exemplo, para os boletins de camada simples, poderíamos utilizar os porta-bobinas 1, 2 e 3 ou ainda, os porta-bobinas, 1, 4 e 5. Esta flexibilização influenciará tanto o PABC como o PMTGRC, uma vez que, teremos sempre dois porta-bobinas livres, nos quais bobinas poderão ser alocadas bobinas convenientes mesmo quando o corrugador estiver funcionando.

Em relação ao PMTGRC destacamos os seguinte pontos.

Analisar avanços para o PMTF.

Analisar os avanços propostos na literatura para o Problema de Minimização de Trocas de Ferramentas, presentes em [Yanasse, Rodrigues e Senne \(2009\)](#), [Moreira \(2016\)](#) e [Djellab, Djellab e Gourgand \(2000\)](#), dentre outros, e adaptá-los quando possível.

Adaptar outros modelos.

Adaptar outros modelos e métodos da literatura, desenvolvidos para o PMTF, como os propostos em [Laporte, Salazar-Gonzalez e Semet \(2004\)](#), [Catanzaro, Gouveia e Labbé \(2015\)](#), [Chaves et al. \(2016\)](#), dentre outros, de forma a melhorar os resultados computacionais.

Inserir novas classes.

Trabalhar com classes que contemplem um horizonte de programação maior.

Integrar o PMTGRC com o PMPA.

O Problema de Minimização das Pilhas em Aberto (PMPA) é um problema de sequenciamento dos boletins, e este sequenciamento tem impacto direto no PMTGRC. A integração do PMTGRC com o PMPA é relevante e pode trazer ganhos ao processo produtivo.

Integrar o PMTGRC com o PABC.

É sabido que dado um conjunto de boletins, a sequência que estes serão produzidos tem impacto em todas as considerações do PABC, uma vez que ao se produzir um boletim o estoque de bobinas é modificado, alterando os resultados dos boletins subsequentes. Como as sequências de produção também influenciam o PMTGRC, integrar o PABC com o PMTGRC tem relevância no processo produtivo e pode trazer ganhos operacionais e financeiros.

REFERÊNCIAS

- ABUABARA, A.; MORABITO, R. Modelos de programação inteira mista para o planejamento do corte unidimensional de tubos metálicos na indústria aeronáutica agrícola. *Gestão & Produção*, FapUNIFESP (SciELO), v. 15, n. 3, p. 605–617, dec 2008.
- ABUABARA, A.; MORABITO, R. Cutting optimization of structural tubes to build agricultural light aircrafts. *Annals of Operations Research*, Springer, v. 169, n. 1, p. 149, 2009.
- APPOLINÁRIO, F. *Metodologia da ciência: filosofia e prática da pesquisa*. USA: Thomson, 2006.
- ASSOCIATION, F. B. et al. *Fibre box handbook*. USA: Fibre Box Association, 1999.
- BANDA, M. G. De la; STUCKEY, P. J. Dynamic programming to minimize the maximum number of open stacks. *INFORMS Journal on Computing*, INFORMS, v. 19, n. 4, p. 607–617, 2007.
- BECCENERI, J. C.; YANASSE, H. H.; SOMA, N. Y. A method for solving the minimization of the maximum number of open stacks problem within a cutting process. *Computers & Operations Research*, Elsevier, v. 31, n. 14, p. 2315–2332, 2004.
- BERGE, C.; MINIEKA, E. *Graphs and hypergraphs*. North-Holland publishing company Amsterdam, 1973.
- BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations & Production Management*, MCB UP Ltd, v. 22, n. 2, p. 241–264, 2002.
- BOLAT, A. An extended scheduling model for producing corrugated boxes. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 38, n. 7, p. 1579–1599, 2000.
- BOOKBINDER, J. H.; HIGGINSON, J. K. Customer service vs trim waste in corrugated box manufacture. *Journal of the Operational Research Society*, Springer, v. 37, n. 11, p. 1061–1071, 1986.
- CATANZARO, D.; GOUVEIA, L.; LABBÉ, M. Improved integer linear programming formulations for the job sequencing and tool switching problem. *European journal of operational research*, Elsevier, v. 244, n. 3, p. 766–777, 2015.
- CHANTRAPORNCHAI, C.; SATHAPANAWAT, T. Scheduling and planning software for corrugation process. In: *Signal Processing and Multimedia*. Switzerland: Springer, 2010. p. 260–266.

- CHANTRAPORNCHAI, C.; SATHAPANAWAT, T. Heuristic for paper roll selection for corrugation process simulation. In: *U-and E-Service, Science and Technology*. Switzerland: Springer, 2011. p. 153–159.
- CHANTRAPORNCHAI, C.; SATHAPANAWAT, T. Corrugation software development and deployment: A case study. *International Journal of u-and e-Service, Science and Technology*, v. 5, n. 1, p. 1–24, 2012.
- CHAVES, A. A. et al. Hybrid method with cs and brkga applied to the minimization of tool switches problem. *Computers & Operations Research*, Elsevier, v. 67, p. 174–183, 2016.
- CRAMA, Y.; OERLEMANS, A. G.; SPIEKSMAN, F. C. Minimizing the number of tool switches on a flexible machine. In: *Production Planning in Automated Manufacturing*. Switzerland: Springer, 1994. p. 165–195.
- DANTZIG, G.; FULKERSON, R.; JOHNSON, S. Solution of a large-scale traveling-salesman problem. *Journal of the operations research society of America*, INFORMS, v. 2, n. 4, p. 393–410, 1954.
- DARLEY, V.; SANDERS, D.; TESSIN, P. von. An agent-based model of a corrugated-box factory: the trade-off between finished goods stock and on-time-in-full delivery. In: *Proceedings of the Fifth Workshop on Agent-Based Simulation*. United Kingdom: Citeseer, 2004.
- DESROCHERS, M.; LAPORTE, G. Improvements and extensions to the miller-tucker-zemlin subtour elimination constraints. *Operations Research Letters*, Elsevier, v. 10, n. 1, p. 27–36, 1991.
- DJELLAB, H.; DJELLAB, K.; GOURGAND, M. A new heuristic based on a hypergraph representation for the tool switching problem. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 64, n. 1-3, p. 165–176, 2000.
- DUYNE, R. V. Ibm 1401 heuristic corrugator scheduling. IBM Corporation, Kingston, New York, USA, 1965.
- FAGGIOLI, E.; BENTIVOGLIO, C. A. Heuristic and exact methods for the cutting sequencing problem. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 110, n. 3, p. 564–575, 1998.
- GARFINKEL, R. S.; NEMHAUSER, G. L. The set-partitioning problem: set covering with equality constraints. *Operations Research*, INFORMS, v. 17, n. 5, p. 848–856, 1969.
- GILMORE, P.; GOMORY, R. E. Multistage cutting stock problems of two and more dimensions. *Operations research*, INFORMS, v. 13, n. 1, p. 94–120, 1965.
- GILMORE, P.; GOMORY, R. E. The theory and computation of knapsack functions. *Operations Research*, INFORMS, v. 14, n. 6, p. 1045–1074, 1966.
- GILMORE, P. C.; GOMORY, R. E. A linear programming approach to the cutting-stock problem. *Operations research*, INFORMS, v. 9, n. 6, p. 849–859, 1961.

- GILMORE, P. C.; GOMORY, R. E. A linear programming approach to the cutting stock problem—part ii. *Operations research*, INFORMS, v. 11, n. 6, p. 863–888, 1963.
- HAESSLER, R. W. Production planning and scheduling for an integrated container company. *Automatica*, Elsevier, v. 21, n. 4, p. 445–452, 1985.
- HAESSLER, R. W.; TALBOT, F. B. A 0-1 model for solving the corrugator trim problem. *Management science*, INFORMS, v. 29, n. 2, p. 200–209, 1983.
- HAMADEH, A.; HELLSTRÖM, D. The problem of corrugator sequencing and its impact on packaging processes. Publisher information missing, 2008.
- HERRMANN, J. W. Information flow and decision-making in production scheduling. In: INSTITUTE OF INDUSTRIAL ENGINEERS-PUBLISHER. *IIE Annual Conference. Proceedings*. Chicago, USA, 2004. p. 1.
- HINXMAN, A. The trim-loss and assortment problems: A survey. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 5, n. 1, p. 8–18, 1980.
- JARAMILLO, J. D.; CORREA, F. J.; JARAMILLO, R. Desarrollo de un método basado en algoritmos genéticos y programación lineal para la solución de un problema de corte unidimensional. *Revista de Ingeniería de la Universidad Eafit*, 2009.
- KLIR, G.; YUAN, B. *Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice hall New Jersey, 1995.
- LAPORTE, G.; SALAZAR-GONZALEZ, J. J.; SEMET, F. Exact algorithms for the job sequencing and tool switching problem. *IIE Transactions*, Taylor & Francis, v. 36, n. 1, p. 37–45, 2004.
- LINS, S. Conjug: Um sistema para diminuir perdas no corte industrial de chapas, barras, bobinas. *The Proceedings of the XXI Congresso Nacional de Informatica.*, 1988.
- LINS, S. Traversing trees and scheduling tasks for duplex corrugator machines. *Pesquisa Operacional*, v. 9, n. 1, p. 40–54, 1989.
- LIZARAZO, N. A. et al. Modelo para programación de operaciones en la fabricación de cajas de cartón corrugado. *Ingeniería y Desarrollo*, Fundación Universidad del Norte, n. 13, 2003.
- MALTENFORT, G. G. *Corrugated shipping containers: An Engineering approach*. New York, USA: Jelmar, 1990.
- MATSUMOTO, K.; MIWA, H.; IBARAKI, T. Scheduling of corrugated paper production. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 192, n. 3, p. 782–792, 2009.
- MCKEE, R.; GANDER, J.; WACHUTA, J. Compression strength formula for corrugated boxes. *Paperboard packaging*, v. 48, n. 8, p. 149–159, 1963.
- MILLER, C. E.; TUCKER, A. W.; ZEMLIN, R. A. Integer programming formulation of traveling salesman problems. *Journal of the ACM (JACM)*, ACM, v. 7, n. 4, p. 326–329, 1960.

- MORÁBITO, R. Modelos de otimização para o problema de corte nas indústrias de papel e papelão e de móveis. *Gestão & Produção*, SciELO Brasil, v. 1, n. 1, p. 59–76, 1994.
- MOREIRA, A. C. B. *O problema de minimização de trocas de ferramentas*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2016.
- PEGELS, C. A comparison of scheduling models for corrugator production. *Journal of Industrial Engineering*, v. 18, n. 8, p. 466, 1967.
- PERES, P. Coluna abpo: A história do papelão ondulado. *Papel-São Paulo-*, Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel, v. 63, n. 11, p. 107–107, 2002.
- PRESSANTO, A. J. *O ecodesign como instrumento de educação ambiental em instituições de ensino fundamental*. 2004.
- RICHARDSON, R. *Pesquisa social métodos e técnicas*. São Paulo: Editora Atlas SA, 1989.
- ROBERT, N. T. Dossiê técnico-produção de embalagem de papel. *Rio de Janeiro: Rede de Tecnologia do Rio de Janeiro-REDETEC*, 2007.
- RODAMMER, F. A.; WHITE-JR, K. P. A recent survey of production scheduling. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on, IEEE*, v. 18, n. 6, p. 841–851, 1988.
- RODRÍGUEZ, M. A.; VECCHIETTI, A. An efficient model implementation to solve a real-world cutting stock problem for a corrugated board boxes mill. *Computer Aided Chemical Engineering*, Citeseer, v. 24, p. 601, 2007.
- RODRÍGUEZ, T. F. T. 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*, Departamento de Economía, Métodos Cuantitativos e Historia Económica, n. 8, p. 71–86, 2009.
- SAVSAR, M.; COGUN, C. Analysis and modelling of a production line in a corrugated box factory. *The International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 32, n. 7, p. 1571–1589, 1994.
- SMITH, B.; GENT, I. First constraint modeling challenge. *Edinburgh, Scotland:IJCAI*, 2005.
- TANG, C. S.; DENARDO, E. V. Models arising from a flexible manufacturing machine, part i: minimization of the number of tool switches. *Operations research, INFORMS*, v. 36, n. 5, p. 767–777, 1988.
- TEIXEIRA, J. d. A. Design & materiais. *Curitiba: Ed. CEFET-PR*, p. 237, 1999.
- VELASQUEZ, A. et al. A multi-objective approach based on soft computing techniques for production scheduling in corrugator manufacturing plants. *Ingeniería y Desarrollo*, Fundación Universidad del Norte, n. 21, 2007.

- VIDAL, A. C. F. O mercado de papelão ondulado e os desafios da competitividade da indústria brasileira. *BNDES Setorial*, n. 35, mar. 2012, p. 5-46, Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2012.
- WADE, C. 1620 corrugator trim and schedule program. IBM Watson Research Center, Yorktown Heights, New York, USA, 1964.
- WORMER, T. V. *The Trimmer: A heuristic solution to the trim problem in the corrugated container industry*. Tese (Doutorado) — Carnegie Institute of Technology, 1963.
- YANASSE, H. H. On a pattern sequencing problem to minimize the maximum number of open stacks. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 100, n. 3, p. 454–463, 1997.
- YANASSE, H. H. Limitante inferior para o problema de minimizar o número de trocas de ferramentas. *XXXIX Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Fortaleza, CE. Proceedings of the XXXIX SBPO, in CD, arq0170*, p. 1886–1892, 2007.
- YANASSE, H. H.; RODRIGUES, R. d. C. M.; SENNE, E. L. F. Um algoritmo enumerativo baseado em ordenamento parcial para resolução do problema de minimização de trocas de ferramentas. *Gestão & Produção*, SciELO Brasil, p. 370–381, 2009.
- YUEN, B. J. Heuristics for sequencing cutting patterns. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 55, n. 2, p. 183–190, 1991.
- YUEN, B. J. Improved heuristics for sequencing cutting patterns. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 87, n. 1, p. 57–64, 1995.