

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JOYCE RODRIGUES DA SILVA

PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO DE LOTES COM *SET UP* DEPENDENTE
EM UMA EMPRESA DE CONFECÇÕES

CURITIBA

2016

JOYCE RODRIGUES DA SILVA

PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO DE LOTES COM *SET UP* DEPENDENTE
EM UMA EMPRESA DE CONFECÇÕES

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Área de Concentração em Programação Matemática, Setores de Tecnologia e Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre.
Orientadora: Prof^aNeida Maria Patias Volpi

CURITIBA

2016

Silva, Joyce Rodrigues da

Problema de dimensionamento de lotes com set up dependente em uma empresa de confecções / Joyce Rodrigues da Silva . – Curitiba, 2016.

65 f. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setores de Tecnologia e de Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia.

Orientadora: Neida Maria Patias Volpi

Bibliografia: p. 63-65

1. Modelos matemáticos. 2. Solução de problemas. I. Volpi, Neida Maria Patias. II. Título.

CDD 510.285



Ministério da Educação
Universidade Federal do Paraná
Setor de Tecnologia / Setor de Ciências Exatas
Departamento de Construção Civil / Departamento de Matemática/ Departamento
de Engenharia de Produção.
Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia –
PPGMNE/UFPR.



TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em MÉTODOS NUMÉRICOS EM ENGENHARIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de JOYCE RODRIGUES DA SILVA, intitulada: "PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO DE LOTES COM SET UP DEPENDENTE EM UMA EMPRESA DE CONFECÇÕES", após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua aprovação.

Curitiba, 07 de Julho de 2016.

Prof NEIDA MARIA PATIAS VOLPI
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

Prof GERSON ULBRICHT
Avaliador Externo (IFSC)

Prof GUSTAVO VALENTIM LOCH
Avaliador Interno (UFPR)

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo propor um modelo para representar um problema de planejamento de produção em uma indústria de confecção e escolher um método para encontrar boas soluções. O estudo se inicia com uma pesquisa voltada para os modelos de dimensionamento de lotes, uma pequena revisão de literatura é feita e cada modelo é analisado para comparar as principais diferenças entre eles. Com o objetivo de melhorar o planejamento de produção de uma empresa de confecções, foi adaptado um modelo de dimensionamento de lotes com *setup* dependente. Para encontrar soluções para o modelo uma matheurística foi proposta. O método híbrido consiste em uma busca tabu pura que combinada com uma metodologia exata retornam boas soluções para o problema. As soluções obtidas pelo método é comparada, quando possível, com as soluções obtidas pela metodologia exata, validando assim o método. O trabalho é finalizado com uma aplicação utilizando dados fictícios, o aplicativo *Lingo* foi usado para obter uma solução para ser comparada com a solução obtida pela matheurística.

Palavras-chaves: dimensionamento de lotes, busca tabu, matheurística.

ABSTRACT

The present work aims to propose a model to represent a problem of production planning in a garment industry and to choose a method to find good solutions. The study begins with a focused research to design models of lots, a small literature review is made and each model is analyzed to compare the main differences between them. With the objective to improve the production planning of a clothing company it has been adapted a model with lots sizing and dependent setup. To find solutions for the model an math heuristic it is proposed. The hybrid method consists in a pure tabu search which combined with a exact methodology return good solutions to the problem. If be possible the solutions obtained by the proposed method, is compared to the solution obtained by the exact methodology, thus validating the method. The work ends with a real application, using the Lingo application to obtain a solution to be compared with the solution by math heuristic.

Key-words: lot sizing, tabu search, math heuristic

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – A CLASSIFICAÇÃO DOS PROBLEMAS DE PLANEJAMENTO	14
FIGURA 2 – MODELO DLSP: OCIOSIDADE DE MÁQUINA E DUAS OCORRÊNCIAS DE PREPARAÇÃO	18
FIGURA 3 – MODELO CSLP: OCIOSIDADE DE MÁQUINA E UMA OCORRÊNCIA DE PREPARAÇÃO	18
FIGURA 4 – MODELO PLSP: PRODUÇÃO DO SEGUNDO ITEM NO MESMO PERÍODO	20
FIGURA 5 – MODELO GSLP: DIVISÃO DO PERÍODO EM POSIÇÕES	20
FIGURA 6 – CADEIA TÊXTIL-CONFECÇÃO	31
FIGURA 7 – FLUXO DE PRODUÇÃO	32
FIGURA 8 – SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE PEQUENO PORTE - q_{jn} , I_{jt} e C_{ext_t} .	37
FIGURA 9 – SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE PEQUENO PORTE - z_{jn} e y_{ijn}	37
FIGURA 10 – FLUXOGRAMA DA MATHEURÍSTICA	39
FIGURA 11 – SEQUENCIAMENTO DA LINHA DE PRODUÇÃO	57
FIGURA 12 – SEQUENCIAMENTO DA LINHA DE PRODUÇÃO	58

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – VALORES POSSÍVEIS PARA AS RESTRIÇÕES (2.3)	16
TABELA 2 – VALORES POSSÍVEIS PARA AS RESTRIÇÕES (2.10)	17
TABELA 3 – CAPACIDADES UTILIZADAS	47
TABELA 4 – DEMANDAS UTILIZADAS	48
TABELA 5 – DADOS UTILIZADOS	48
TABELA 6 – CUSTO DO <i>SETUP</i>	49
TABELA 7 – TEMPO DE <i>SETUP</i>	49
TABELA 8 – RESULTADOS OBTIDOS UTILIZANDO A METODOLOGIA EXATA .	50
TABELA 9 – RESULTADOS OBTIDOS UTILIZANDO A MATHEURÍSTICA	50
TABELA 10 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PELO <i>LINGO</i> E PELA MATHEURÍSTICA	51
TABELA 11 – ITENS PRODUZIDOS PELA EMPRESA	53
TABELA 12 – DEMANDAS DA EMPRESA	54
TABELA 13 – DADOS UTILIZADOS NA EMPRESA	54
TABELA 14 – CUSTO DO <i>SETUP</i> DA EMPRESA	55
TABELA 15 – TEMPO DE <i>SETUP</i> DA EMPRESA	55
TABELA 16 – QUANTIDADES PRODUZIDAS	56
TABELA 17 – ESTOQUES	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIT	Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção
B&B	<i>Branch and Bound</i>
B&C	<i>Branch and Cut</i>
CLSP	<i>Capacitated Lot Sizing Problem</i> (Problema de Dimensionamento de Lotes Capacitado)
CSLP	<i>Continuous Setup Lot Sizing Problem</i> (Problema de Programação e Dimensionamento de Lotes Contínuo)
DLSP	<i>Discrete Lot Sizing and Scheduling Problem</i> (Problema Discreto de Dimensionamento e Programação de Lotes)
GA	<i>Genetic Algorithms</i> (Algoritmo Genético)
GLSP	<i>General Lot Sizing and Scheduling Problem</i> (Problema de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes Generalizado)
GLSPST	<i>General Lot Sizing and Scheduling Problem Setup Times</i> (Problema Geral de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes - Sequências Dependentes)
MIP	<i>Mixed Integer Problem</i> (Problema Inteiro Misto)
PCP	Planejamento e Controle da Produção
PLSP	<i>Proportional Lot Sizing and Scheduling Problem</i> (Problema de Programação e Dimensionamento de Lotes Compartilhado)
SA	<i>Simulated Annealing</i>
TS	<i>Tabu Search</i> (Busca Tabu)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Objetivos	10
1.1.1 Objetivo Geral	10
1.1.2 Objetivos específicos	10
1.1.3 Limitações do trabalho	11
1.2 Estrutura do Trabalho	11
2 REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1 Dimensionamento e programação de Lotes	12
2.1.1 Modelos matemáticos	13
2.1.2 Problema de dimensionamento de lotes capacitado	14
2.1.3 Problema discreto de dimensionamento e sequenciamento de lotes	15
2.1.4 Problema contínuo de dimensionamento de lotes	17
2.1.5 Problema proporcional de dimensionamento e sequenciamento de lotes	19
2.1.6 Problema geral de dimensionamento e sequenciamento de lotes	19
2.1.7 Problema geral de dimensionamento e sequenciamento de lotes - Sequências dependentes	21
2.2 Métodos de solução	23
2.2.1 Métodos exatos	23
2.2.2 Métodos Heurísticos	24
2.2.3 Meta-heurística	25
2.2.3.1 Busca Tabu	26
2.2.4 Matheurística	28
2.3 Trabalhos correlatos	29
3 PLANEJAMENTO DE PRODUÇÃO DE UMA EMPRESA DE CONFECÇÕES	30
3.1 Contextualização	30
3.2 Planejamento atual da empresa	31
3.2.1 Descrição do fluxo de produção	31
3.3 Formulação matemática	33
3.4 Funcionamento do modelo - Resolução de um problema de pequeno porte	36
4 MATHEURÍSTICA PARA ENCONTRAR SOLUÇÕES	39
4.1 Modelo II	40
4.2 Representação das variáveis z_{jn} e y_{ijn}	41

4.3 Busca tabu adaptada	42
4.3.1 Solução inicial	42
4.3.2 Função de avaliação	43
4.3.3 Vizinhaça	43
4.3.4 Lista tabu	44
4.3.5 Critério de aspiração	45
4.3.6 Critério de parada	45
4.4 Algoritmo	45
4.5 Implementação e testes computacionais	47
5 APLICAÇÃO DA MATHEURÍSTICA EM UM PROBLEMA REAL	52
5.1 DADOS DA EMPRESA	52
5.2 RESOLUÇÃO DE UM PROBLEMA	53
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

O mercado têxtil e de confecção mundial é dos mais dinâmicos pois realiza lançamentos constantes de produtos e serviços. No ano de 2012, o setor têxtil e de confecção mundial movimentou cerca de U\$\$ 744 bilhões em transações entre países. O mapa da produção mundial começou a mudar na década de 80, saindo dos EUA, Europa e Japão para países emergentes da Ásia e, mais recentemente, Leste Europeu, Norte da África e Caribe. Atualmente, a Ásia é responsável por 73% do volumes totais produzidos no mundo (ABIT (2015a)).

O setor têxtil e de confecção é uma atividade com cerca de 200 anos no Brasil. Impulsionou muitas outras indústrias e foi o grande motor da revolução industrial no país. Hoje, emprega 1,6 milhão de pessoas de forma direta, das quais 75% são funcionários do segmento de confecção e em sua maior parte são mulheres. A indústria da moda é o segundo maior empregador na indústria de transformação e também segundo maior gerador do primeiro emprego. O setor têxtil e de confecção reúne mais de 33 mil empresas (com mais de 5 funcionários) das quais mais de 80% são confecções de pequeno e médio porte. Adaptando-se as novas tecnologias, as empresas desse setor, buscam constantemente o aperfeiçoamento dos sistemas de produção e otimização da utilização dos recursos produtivos, (ABIT (2015b)).

Visando otimizar a utilização dos recursos envolvidos na produção deste setor, uma grande quantidade de informações devem ser analisadas simultaneamente, o Planejamento e Controle da Produção (PCP) exercem um papel fundamental para auxiliar nas tomadas das decisões. O principal objetivo do PCP é definir a estratégia de produção, planejando quais as quantidades e o momento que devem ser fabricadas, quais máquinas ou linhas de produção deverão ser utilizadas. O planejamento tático e operacional (médio e curto prazo), as decisões do planejamento incluem o dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção. Alguns desafios são encontrados nas indústrias, como por exemplo, a sazonalidade na demanda por produtos, oferta de matérias primas e uma grande quantidade de produtos disputando os mesmos recursos produtivos.

Os problemas encontrados na indústria de confecção de pequeno porte é a razão motivadora deste trabalho. Primeiramente o modelo matemático proposto pretende responder as seguintes questões: qual produto e qual a quantidade que dever ser produzida em cada período, gerando uma sequência na produção, de modo a evitar atrasos no atendimento da demanda, minimizando os custos de preparação e de estoque. São feitas alterações nos modelos existentes na literatura para resultar no modelo próprio para o problema da empresa estudada.

Considerando que o tempo de planejamento é pequeno, as soluções do método implementado serão obtidos em pouco tempo computacional, para viabilizar a utilização do modelo como apoio na tomada das decisões. Além de propor um modelo para representar

adequadamente o problema, pretende-se estudar e aplicar métodos para resolução do modelo capaz de produzir boas soluções em pouco tempo de execução. O método para encontrar a solução, será testado em instâncias geradas aleatoriamente para problemas de pequeno porte, envolvendo diferentes quantidades de itens e períodos. As soluções encontradas serão confrontadas com soluções obtidas utilizando a metodologia exata. Para problemas de dimensões maiores, serão feitos vários testes para analisar a metodologia proposta.

1.1 OBJETIVOS

Abaixo são descritos os objetivos deste trabalho.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é propor um modelo para representar o problema encontrado numa pequena indústria de confecção, encontrar um método de solução, com o objetivo de que o modelo possa auxiliar nas decisões relacionadas ao dimensionamento e sequenciamento de lotes na indústria em questão.

1.1.2 Objetivos específicos

O desenvolvimento do trabalho se inicia com uma revisão de literatura, onde os modelos clássicos de planejamento da produção serão detalhadamente estudados e analisados. Uma comparação entre os modelos é realizada, discutindo as principais diferenças que existe entre eles, para entender perfeitamente o funcionamento de cada um. São geradas instâncias testes para analisar o funcionamento dos modelos e a capacidade da metodologia exata de encontrar soluções. Em todos os problemas encontrados na literatura, as metodologias exatas em geral, não encontram soluções para os modelos com instâncias de grande porte, sendo necessário o uso de heurísticas para encontrar soluções.

Sabendo que são difíceis de encontrar soluções para os modelos clássicos com instâncias de grande porte, iniciou-se o estudo de meta heurísticas que são capazes de resolver o problema em questão. Depois de conhecer o funcionamento de uma empresa de confecções, foi proposto um modelo matemático para auxiliar nas tomadas de decisões. Como o modelo matemático possui muitas restrições e variáveis, não é possível resolver por metodologia exata para o planejamento da empresa. Por isso, uma matheurística é sugerida para encontrar boas soluções.

Adaptando a busca tabu para o problema de dimensionamento de lotes com *setup* dependente, foram comparadas as soluções obtidas pela heurística e pela metodologia exata para validar a heurística, usando somente problemas de pequeno porte.

1.1.3 Limitações do trabalho

A principal limitação do trabalho, está no fato de que os dados reais não foram disponibilizados pela empresa de confecção, então para a realização dos testes computacionais, foram utilizados somente limites inferiores e superiores, dentro dos quais os parâmetros costumam variar. Mas esta limitação não compromete o trabalho. Na realização dos testes, os parâmetros foram gerados aleatoriamente dentro desses limites, permitindo assim testar o funcionamento do modelo e da matheurística de resolução.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho é dividido em 6 capítulos. No Capítulo 1 é apresentada a introdução, os objetivos e as limitações do trabalho. No Capítulo 2 é exposta uma breve revisão de literatura com os principais modelos de dimensionamento e sequenciamento da produção, uma revisão sobre meta-heurísticas e matheurísticas. No Capítulo 3 será apresentado o processo de fabricação de uma empresa de confecções, um modelo matemático é sugerido e um exemplo é resolvido. No Capítulo 4 é apresentado o método para encontrar soluções para o problema estudado, é abordado como é feito a adaptação da busca tabu para solucionar o modelo matemático simplificado, é detalhado como foi feita a escolha da representação das variáveis, um algoritmo é criado e a implementação e testes computacionais são realizados. No Capítulo 5 é feita uma aplicação para um problema real da empresa estudada. E no Capítulo 6 são feitas as considerações finais.

Neste trabalho, itens e produtos tem o mesmo significado, essas palavras são usadas para referenciar ao que é produzido na empresa.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Segundo Arenales, Armentano e Morabito (2007), os problemas da área de produção em geral são decompostos hierarquicamente em três níveis: estratégico, tático e operacional. O nível estratégico é o mais alto e são englobadas as decisões de longo prazo que envolvem altos investimentos. Neste nível é escolhido o projeto do processo, o arranjo das máquinas e outros equipamentos, é determinada a capacidade em função da demanda futura e também é definido o tamanho do lote mínimo, ou seja, a menor quantidade em que um item é produzido. O nível tático envolve o planejamento das atividades, que consiste em dois sub-níveis: planejamento agregado da produção e o planejamento de quantidades de produção.

O planejamento agregado da produção envolve decisões como níveis de mão-de-obra, hora extra e subcontratação, e duram tipicamente de vários meses a um ano. O planejamento das quantidades de produção envolve a decisão de quanto e quando produzir de cada produto em um horizonte de tempo de algumas semanas a seis meses. O problema estudado nesta dissertação se encaixa nesse nível. Já o nível operacional controla as atividades diárias das ordens de produção provenientes do nível tático. As principais decisões destes nível são: designação de tarefas (*jobs*) a máquinas e programação (*scheduling*) das tarefas em cada máquina, (Arenales, Armentano e Morabito (2007)).

Neste capítulo será feito uma revisão dos principais modelos de planejamento de produção e dos métodos existentes para encontrar soluções.

2.1 DIMENSIONAMENTO E PROGRAMAÇÃO DE LOTES

Aqui é apresentada uma revisão bibliográfica do problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes. Para facilitar a compreensão, antes de iniciar a revisão, alguns conceitos e definições serão apresentados, eles são usados para caracterizar os problemas. Karimi, Ghomi e Wilson (2003) citam características importantes para o problema de dimensionamento de lotes. A seguir, as características são apresentadas resumidamente.

Horizonte de planejamento: é o limite superior de tempo que a produção deve ser planejada. Ele pode ser definido como finito ou infinito, o primeiro é acompanhado de uma demanda dinâmica e o segundo por uma demanda estacionária. O horizonte de planejamento pode ser dividido em grandes períodos que são chamados de *big buckets*, onde vários itens podem ser produzidos num mesmo período, e em pequenos períodos chamados de *small buckets*, cujo tempo de produção é curto, sendo possível somente a produção de um item por período. Uma outra variante do horizonte de planejamento é o horizonte rolante que é usado quando existe incerteza dos dados.

Número de níveis: Um sistema produtivo pode ser classificado como monoestágio

ou múltiplo estágio. No monoestágio, o sistema tem um único estágio de produção, ou seja, para um item ser produzido ele não depende de outro, as matérias primas são diretamente transformadas em produtos finais, com isso a demanda é independente. No sistema com múltiplos estágios, existem várias etapas de processamento, são produzidos itens intermediários, e existe uma relação de precedência entre estes itens. Se a demanda de um item em um nível depende da demanda dos itens finais, neste caso a demanda é dependente. Os problemas múltiplos estágios são geralmente mais complexos que problemas monoestágios.

Número de produtos: Os sistemas produtivos podem ser de um único item ou de multi-itens. O número de itens ou produtos finais em um sistema de produção é importante, pois afeta diretamente a complexidade da modelagem e da resolução dos problemas.

Restrições de capacidade ou recursos: Recursos ou capacidade em um sistema produtivo incluem mão de obra, equipamentos, máquinas, orçamento, tempo de produção disponível, etc. Quando não há uma limitação sobre os recursos, o problema é conhecido como incapacitado, e quando existem limitações o problema é chamado de capacitado. As restrições de capacidade afetam diretamente a complexidade do problema. Encontrar soluções para os problemas será mais difícil quando houver restrições de capacidade.

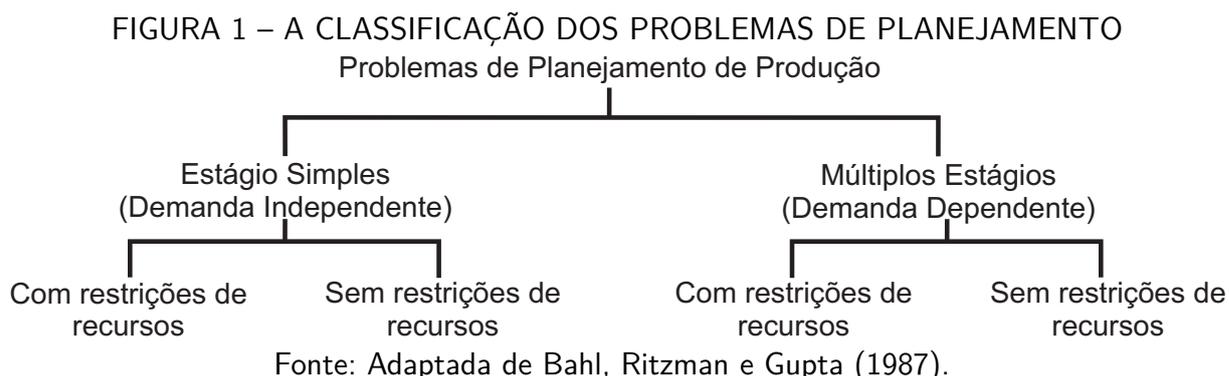
Demanda: é a quantidade necessária para atender aos pedidos daquele período. Tem-se duas variantes, a demanda estática que o seu valor não sofre mudanças ao longo do tempo, ela é estacionária ou até mesmo constante, enquanto a demanda dinâmica que o seu valor muda com o tempo. Se o valor da demanda é conhecido antecipadamente (estático ou dinâmico), é denominado determinística, mas se os valores não são conhecidos com exatidão ou são baseados em algumas probabilidades, ela é denominada como estocástica.

Estrutura da preparação para produção (*setup*): a preparação para produção existe quando se tem um custo de preparação e/ou um tempo de preparação. Além disso, há duas classes de preparação: a preparação independente, ou seja, são independentes de períodos ou itens anteriores; e a preparação dependente, que ocorre quando há uma dependência da sequência de períodos ou itens anteriores.

Bahl, Ritzman e Gupta (1987) classificam o problema de dimensionamento de lotes em função de duas características principais: estágios de produção e restrições de capacidade. Os problemas podem ser monoestágio ou múltiplos estágios, com e sem limite de capacidade.

2.1.1 Modelos matemáticos

O problema de dimensionamento de lotes com única máquinas consiste em determinar quanto produzir de um determinado item em cada um dos períodos em um horizonte de planejamento finito. O objetivo é encontrar um plano de produção que minimize os custos e que seja capaz de atender as demandas dos produtos sem violar a capacidade de produção disponível.



A literatura referente ao problema de dimensionamento de lotes é bastante rica e boas revisões podem ser encontradas em Bahl, Ritzman e Gupta (1987), Kuik, Salomon e Wassenhove (1994), Wolsey (1995), Drexel e Kimms (1997), Karimi, Ghomi e Wilson (2003) e Brahimi, Dauzere-Peres e Najid (2006).

Drexel e Kimms (1997) apresentam as diferenças de modelos formais do problema de dimensionamento e programação de lotes, e fornecem várias recomendações de leitura. Eles apresentam a divisão dos problemas, com único nível, tempo discreto e com o horizonte de planejamento finito, em cinco grandes grupos que são:

- Problema de dimensionamento de lotes capacitado (CLSP),
- Problema discreto de dimensionamento e sequenciamento de lotes (DLSP),
- Problema contínuo de dimensionamento de lotes (CSLP),
- Problema proporcional de dimensionamento e sequenciamento de lotes (PLSP),
- Problema geral de dimensionamento e sequenciamento de lotes (GLSP).

Meyr (2000) apresenta o problema geral de dimensionamento e sequenciamento de lotes, com sequências dependentes. A seguir serão descritas as principais características de cada modelo.

2.1.2 Problema de dimensionamento de lotes capacitado

O problema abordado em Drexel e Kimms (1997), é como CLSP (*Capacited Lot Sizing Problem*), é um problema capacitado e o modelo pode considerar um ou vários itens. O horizonte de planejamento é finito e caracterizado por períodos longos, conhecidos como *big buckets*. Em cada período vários itens podem ser produzidos.

Os índices usados são:

$i, j = 1, \dots, J$, onde J representa o número total de itens

$t = 1, \dots, T$, onde T é o número total de períodos no horizonte de planejamento

Os parâmetros considerados são:

C_t = Capacidade da máquina no período t

d_{jt} = Demanda do item j no período t

h_j = Custo unitário de estoque do produto j por período

I_{j0} = Estoque inicial do produto j

p_j = Tempo necessário para produzir uma unidade do produto j

s_j = Custo de preparação para o item j

As variáveis de decisão são:

I_{jt} = Quantidade em estoque para o item j no período t

q_{jt} = Quantidade produzida do item j no período t

$$y_{jt} = \begin{cases} 1 & \text{se há } \textit{setup} \text{ para o item } j \text{ no período } t \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Assim o modelo matemático será:

$$\text{Min} \quad \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J (s_j y_{jt} + h_j I_{jt}) \quad (2.1)$$

$$\text{s.a.} \quad I_{jt} = I_{j(t-1)} + q_{jt} - d_{jt} \quad j = 1, \dots, J, t = 1, \dots, T \quad (2.2)$$

$$p_j q_{jt} \leq C_t y_{jt} \quad j = 1, \dots, J, t = 1, \dots, T \quad (2.3)$$

$$\sum_{j=1}^J p_j q_{jt} \leq C_t \quad t = 1, \dots, T \quad (2.4)$$

$$y \in \mathbb{B}^{JT}, I \in \mathbb{R}_+^{JT}, q \in \mathbb{R}_+^{JT} \quad (2.5)$$

A função objetivo (2.1) busca minimizar a soma do custo de *setup* e do custo de estoque. As equações (2.2) representam o balanceamento de estoque em todo o horizonte de planejamento. O conjunto de restrições (2.3) garantem que um item só será produzido se houver a preparação para esse item em particular. O conjunto de restrições (2.4) garantem que a capacidade não seja ultrapassada em todos os períodos. O conjunto de restrições (2.5) indica que as variáveis y_{jt} são binárias, e as variáveis I_{jt} e q_{jt} são reais não negativas.

Ao observar a TABELA 1, em relação ao conjunto de restrições (2.3), é necessário destacar que se existe o *setup* ($y_{jt} = 1$), pode haver ou não a produção do item j no período t , porém se ($y_{jt} = 0$), então não há produção. Neste modelo é permitida a produção de vários itens em um mesmo período, cujo objetivo é definir o dimensionamento de lotes, mas não necessariamente a ordem de produção dos itens.

2.1.3 Problema discreto de dimensionamento e sequenciamento de lotes

Conhecido como DLSP (*Discrete Lot sizing and Scheduling Problem*) este é um problema que adota a filosofia “tudo ou nada”, ou seja, se um item pode ser produzido em cada período então este deve ocupar toda a capacidade disponível daquele período. Este tipo

TABELA 1 – VALORES POSSÍVEIS PARA AS RESTRIÇÕES (2.3)

Valor de y_{jt}	Valor de $C_t y_{jt}$	Valor de q_{jt}
1	C_t	≥ 0
0	0	$= 0$

Fonte: O autor (2016).

de problema é caracterizado por períodos curtos, conhecidos como *small buckets*. Para esse modelo será considerado os mesmos parâmetros e as mesmas variáveis que o modelo CLSP. Adicionando apenas um novo parâmetro e uma nova variável, (Drexel e Kimms (1997)).

Novo parâmetro:

$$z_{j0} = \begin{cases} 1 & \text{se a máquina está preparada para produzir o item } j \text{ no período} \\ & \text{inicial} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

É observado que o $\sum_{j=1}^J z_{j0} \leq 1$, ou seja, no início do período a máquina só estará preparada para no máximo um único item.

Nova variável:

$$z_{jt} = \begin{cases} 1 & \text{se a máquina está preparada para produzir o item } j \text{ no período } t \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

A partir deste problema, tem-se duas variáveis com significados parecidos, mas deve-se tomar o cuidado para saber diferenciá-las. A variável (y_{jt}) indica se existe *setup* de produção para o item j no período t ; sendo que esta preparação incide em um custo. E a variável (z_{jt}) indica se a máquina está preparada para a produção do item j no instante de tempo t . Uma vez que a máquina tem *setup* ($y_{j,t} = 1$), ela pode ficar produzindo ($z_{jt} = 1$) ou não ($z_{jt} = 0$).

O DLSP é considerado como um modelo de programação inteira mista.

$$\text{Min} \quad \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J (s_j y_{jt} + h_j I_{jt}) \quad (2.6)$$

$$\text{s.a :} \quad I_{jt} = I_{j(t-1)} + q_{jt} - d_{jt} \quad j = 1, \dots, J, t = 1, \dots, T \quad (2.7)$$

$$p_j q_{jt} = C_t z_{jt} \quad j = 1, \dots, J, t = 1, \dots, T \quad (2.8)$$

$$\sum_{j=1}^J z_{jt} \leq 1 \quad t = 1, \dots, T \quad (2.9)$$

$$y_{jt} \geq z_{jt} - z_{j(t-1)} \quad j = 1, \dots, J, t = 1, \dots, T \quad (2.10)$$

$$y \in \mathbb{B}^{JT}, z \in \mathbb{B}^{JT}, I \in \mathbb{R}_+^{JT}, q \in \mathbb{R}_+^{JT} \quad (2.11)$$

A função objetivo (2.6) e o conjunto das restrições (2.7) são iguais ao CLSP. A filosofia do “tudo ou nada” é representada matematicamente pelo conjunto de restrições (2.8), quando a máquina estiver preparada para o item j então será utilizada toda a capacidade para a produção deste item, e o item só poderá ser produzido se a máquina estiver preparada para este. O conjunto de restrições (2.9) garantem que a máquina pode estar preparada para no máximo um item por período. O início de um novo lote é controlado pelo conjunto de restrições (2.10); essas restrições também controlam se existe ou não um *setup*. Observa-se na TABELA

2, se no período $(t - 1)$ a máquina não estava preparada para a produção do item j isto é, $(z_{j(t-1)} = 0)$, e no período t ela passa a estar preparada, indica que existe uma preparação (gerando um custo de *setup*). Em todos os outros casos não existe um novo *setup*. O conjunto de restrições (2.11) indicam o tipo das variáveis. Neste modelo, uma das interpretações do conjunto de variáveis y_{jt} é a identificação do sequenciamento dos lotes na produção dos itens.

TABELA 2 – VALORES POSSÍVEIS PARA AS RESTRIÇÕES (2.10)

Valor de $z_j(t - 1)$	Valor de z_{jt}	Valor de y_{jt}
1	1	0
0	1	1
1	0	0

Fonte: O autor (2016).

2.1.4 Problema contínuo de dimensionamento de lotes

Outro problema importante analisado por Drexel e Kimms (1997), e o CSLP (*Continuous Setup Lot Sizing Problem*) este problema é semelhante ao DLSP, pois apenas um item pode ser produzido em cada período, porém, não é uma regra a utilização da capacidade total do período na produção do item. Assim o modelo para esse problema é:

$$\text{Min} \quad \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J (s_j y_{jt} + h_j I_{jt}) \quad (2.12)$$

$$\text{s.a :} \quad I_{jt} = I_{j(t-1)} + q_{jt} - d_{jt} \quad j = 1, \dots, J, t = 1, \dots, T \quad (2.13)$$

$$p_j q_{jt} \leq C_t z_{jt} \quad j = 1, \dots, J, t = 1, \dots, T \quad (2.14)$$

$$\sum_{j=1}^J z_{jt} \leq 1 \quad t = 1, \dots, T \quad (2.15)$$

$$y_{jt} \geq z_{jt} - z_{j(t-1)} \quad j = 1, \dots, J, t = 1, \dots, T \quad (2.16)$$

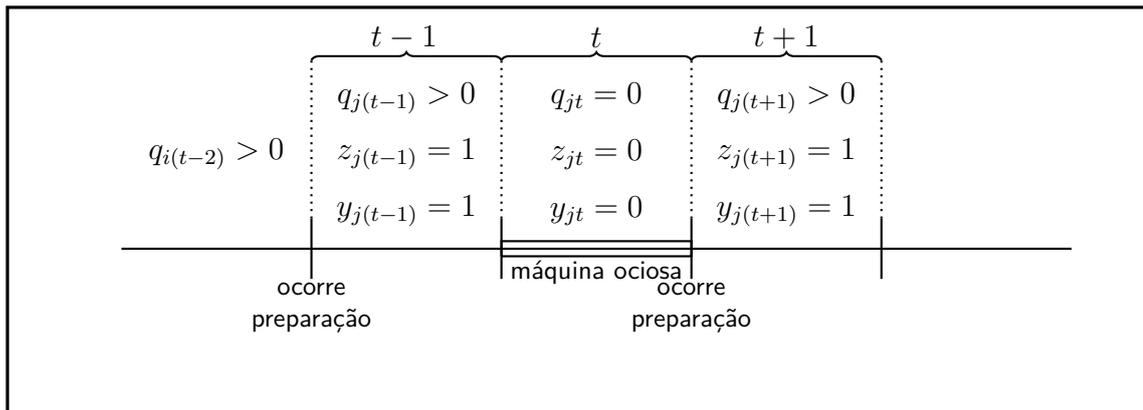
$$y \in \mathbb{B}^{JT}, z \in \mathbb{B}^{JT}, I \in \mathbb{R}_+^{JT}, q \in \mathbb{R}_+^{JT} \quad (2.17)$$

Será omitida a explicação dos conjuntos de restrições (2.12 - 2.17), pois são as mesmas utilizadas no modelo DLSP. Observando que apenas o conjunto de restrições (2.14) sofre uma mudança em relação ao conjunto de restrições (2.8), nota-se que anteriormente era uma igualdade e agora passa a ser uma desigualdade. Nesse modelo a capacidade não precisa ser usada totalmente, podendo apenas uma parte ser consumida, porém apenas um item pode ser produzido por período. Esta pequena mudança ainda garante que se a produção de um item j , seguido de um período de ociosidade da máquina e seguida ainda da produção deste mesmo item novamente, não seja contabilizado um novo custo de *setup*.

As FIGURAS 2 e 3 apresentam a principal diferença entre os modelos DLSP e o CSLP. Ao observar o modelo DLSP conforme ilustrado na FIGURA 2, se houver a produção do item j no período $(t - 1)$, em seguida, pelo menos em um período t , haja ociosidade da máquina de modo que não ocorra a produção de nenhum item (consequentemente $q_{jt} = 0$), o sinal da igualdade presente no conjunto de restrições (2.8), força que a preparação da máquina seja $z_{jt} = 0$ ou seja, quando a máquina estiver ociosa ela não está preparada para nenhum

item. Considerando ainda que o mesmo item j , volte a ser produzido no período $(t + 1)$, por causa das restrições (2.10) há ocorrência de um novo *setup* ($y_{j(t+1)} = 1$), gerando assim 2 *setups* para o mesmo item, indo contra uma situação real, pois já que a máquina foi preparada para o item j no início do período $(t - 1)$, então ela continua preparada para a produção do item j , a menos que haja uma mudança para um item i .

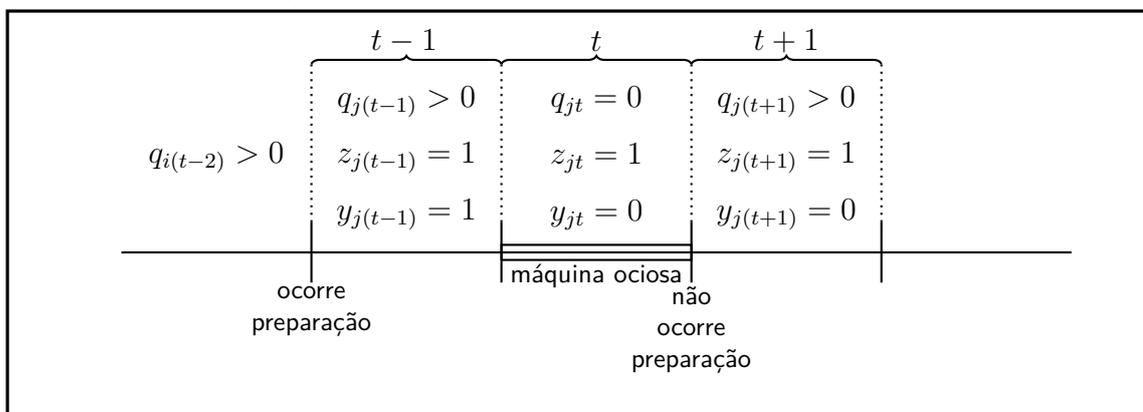
FIGURA 2 – MODELO DLSP: OCIOSIDADE DE MÁQUINA E DUAS OCORRÊNCIAS DE PREPARAÇÃO



Fonte: Adaptada de Ulbricht (2015).

Já na formulação proposta para o CSLP, permite que mesmo havendo ociosidade de máquina em pelo menos um período t (após a produção do item j no período $(t - 1)$), de modo que não ocorra no período t a produção de nenhum item (consequentemente $q_{jt} = 0$), se possa manter o estado de preparação da máquina ($z_{it} = 1$), possibilitando a produção do mesmo tipo de item j no período $(t + 1)$, evitando assim a ocorrência do custo de 2 *setups*, conforme ilustrado na FIGURA 3.

FIGURA 3 – MODELO CSLP: OCIOSIDADE DE MÁQUINA E UMA OCORRÊNCIA DE PREPARAÇÃO



Fonte: Adaptada de Ulbricht (2015).

2.1.5 Problema proporcional de dimensionamento e sequenciamento de lotes

Chamado de PLSP (*Proportional Lot sizing and Scheduling Problem*) este problema é semelhante ao CSLP, diferindo apenas em permitir a inclusão de um segundo item, quando a capacidade de produção em determinado período, não estiver sido totalmente utilizada pelo item cuja produção foi anteriormente iniciada. Segundo Drexl e Kimms (1997), se dois itens são produzidos no mesmo período, isto resulta em um custo de preparação e a produção de mais de um item em um mesmo período implica em decisões de sequenciamento da produção (*scheduling*), Drexl e Kimms (1997). Seu modelo matemático é descrito a seguir.

$$\text{Min} \quad \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J (s_j y_{jt} + h_j I_{jt}) \quad (2.18)$$

$$\text{s.a :} \quad I_{jt} = I_{j(t-1)} + q_{jt} - d_{jt} \quad j = 1, \dots, J, t = 1, \dots, T \quad (2.19)$$

$$p_j q_{jt} \leq C_t (z_{j(t-1)} + z_{jt}) \quad j = 1, \dots, J, t = 1, \dots, T \quad (2.20)$$

$$\sum_{j=1}^J p_j q_{jt} \leq C_t \quad j = 1, \dots, J, t = 1, \dots, T \quad (2.21)$$

$$\sum_{j=1}^J z_{jt} \leq 1 \quad t = 1, \dots, T \quad (2.22)$$

$$y_{jt} \geq z_{jt} - z_{j(t-1)} \quad j = 1, \dots, J, t = 1, \dots, T \quad (2.23)$$

$$y \in \mathbb{B}^{JT}, z \in \mathbb{B}^{JT}, I \in \mathbb{R}_+^{JT}, q \in \mathbb{R}_+^{JT} \quad (2.24)$$

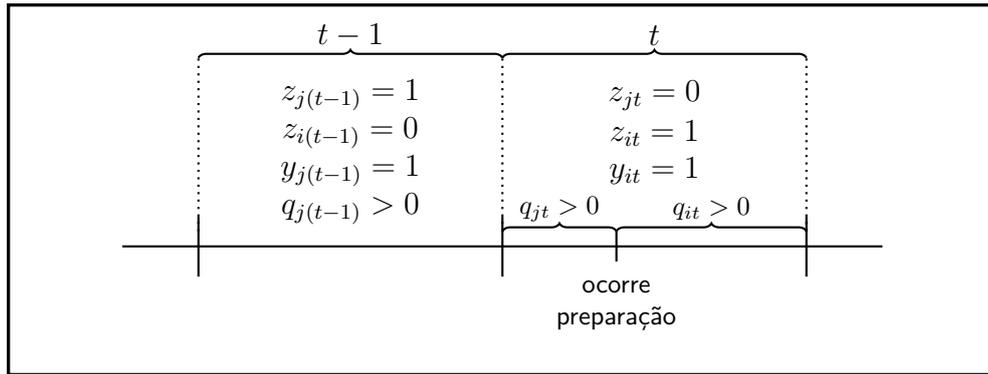
A função objetivo (2.18) e os conjuntos de restrições (2.19), (2.22 - 2.24) são as mesmas utilizadas no modelo (CSLP). O conjunto de restrições (2.20) permite que seja utilizada a preparação da máquina do período anterior para continuar a produção no período subsequente possibilitando assim a troca de item durante o período. O conjunto de restrições (2.21) garante que a capacidade total do período não seja ultrapassada pela produção dos itens. De modo similar ao CSLP, períodos ociosos entre os lotes não causam custos de *setup*.

A seguir será ilustrado o funcionamento do modelo PLSP através da FIGURA 4, considerando a produção de dois itens j e i . Na ilustração é possível observar que a produção do item j ocupou toda a capacidade do período $(t - 1)$ e foi utilizado uma parte do período t para finalizar a produção do lote deste mesmo item j . Com a finalidade de aproveitar a capacidade restante no período t , passou-se a então a produzir o item i , o que ocasionou a existência de um *setup* dentro do período t . As variáveis z_{jt} e y_{jt} mostram respectivamente, o estado de preparação da máquina e a ocorrência de *setup* de cada item (j ou i) em cada período $((t - 1)$ e t).

2.1.6 Problema geral de dimensionamento e sequenciamento de lotes

O GLSP (*General Lot Sizing and Scheduling Problem*) é um problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes capacitado. Os dados, parâmetros e variáveis são os mesmos utilizados no DLSP. Um novo parâmetro é adicionado, que serve para limitar a quantidade

FIGURA 4 – MODELO PLSP: PRODUÇÃO DO SEGUNDO ITEM NO MESMO PERÍODO



Fonte: Adaptada de Ulbricht (2015).

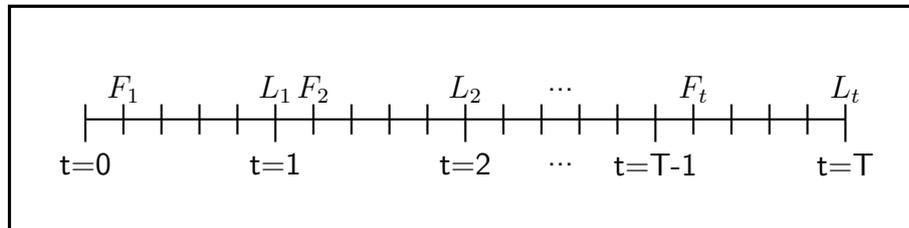
máxima de lotes no período e para cada lote é atribuído um número de posição para definir a sequência de produção, (Drexel e Kimms (1997)).

Novo parâmetro:

N_t = Número máximo de lotes no período t

Em cada período t serão criadas N_t posições para alocar os lotes no período. A FIGURA 5 ajuda a visualizar a divisão dos períodos em posições neste modelo.

FIGURA 5 – MODELO GSLP: DIVISÃO DO PERÍODO EM POSIÇÕES



Fonte: O autor (2016).

$F_t = 1 + \sum_{\tau=1}^{t-1} N_\tau$ para referenciar a primeira posição do período t e

$L_t = F_t + N_t - 1$ para referenciar a última posição do período t .

Conseqüentemente, $N = \sum_{t=1}^T N_t$ é o número máximo de lotes que podem ser ou não produzidos no horizonte de planejamento e N também representa a quantidade total de posições.

Será necessário mudar alguns índices das variáveis do modelo DLSP para que o modelo GLSP seja formulado. Considere as variáveis:

I_{jt} = Estoque para o item j no período t

q_{jn} = Quantidade produzida do item j na posição n

$$y_{jn} = \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ se há } \textit{setup} \text{ do item } j \text{ na posição } n \\ 0 \text{ caso contrário} \end{array} \right\}$$

$$z_{jn} = \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ se a máquina está preparada para a produção do item } j \\ \text{na posição } n \\ 0 \text{ caso contrário} \end{array} \right\}$$

Assim o GLSP pode ser formulado como um modelo de programação inteira mista:

$$\text{Min} \quad \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J s_j y_{jn} + \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T h_j I_{jt} \quad (2.25)$$

$$\text{s.a :} \quad I_{jt} = I_{j(t-1)} + \sum_{n=F_t}^{L_t} q_{jn} - d_{jt} \quad j = 1, \dots, J, t = 1, \dots, T \quad (2.26)$$

$$p_j q_{jn} \leq C_t z_{jn} \quad j = 1, \dots, J, t = 1, \dots, T, \quad (2.27)$$

$$n = F_t, \dots, L_t$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{n=F_t}^{L_t} p_j q_{jn} \leq C_t \quad t = 1, \dots, T \quad (2.28)$$

$$\sum_{j=1}^J z_{jn} \leq 1 \quad n = 1, \dots, N \quad (2.29)$$

$$y_{jn} \geq z_{jn} - z_{j(n-1)} \quad j = 1, \dots, J, n = 1, \dots, N \quad (2.30)$$

$$y \in \mathbb{B}^{JN}, z \in \mathbb{B}^{JN}, I \in \mathbb{R}_+^{JT}, q \in \mathbb{R}_+^{JN} \quad (2.31)$$

Igual aos modelos anteriores a função objetivo (2.25) é de minimizar o total da soma do custo de *setup* e do custo de estoque. As equações (2.26) representam o balanceamento de estoque. É observado que um item em particular pode ser produzido em várias posições em um período, por isso é necessário o somatório nesse conjunto de restrições. As restrições (2.27) asseguram que se a máquina está preparada para a produção item j na posição n , então esse item pode ser produzido. Já o conjunto de restrições (2.28) garantem que a capacidade do período t não seja extrapolada. O conjunto de restrições (2.29) forçam um único estado de preparação da máquina. As restrições (2.30) indicam o início de um novo lote. E o conjunto de restrições (2.31) define o tipo das variáveis.

2.1.7 Problema geral de dimensionamento e sequenciamento de lotes - Sequências dependentes

Uma extensão do modelo GLSP foi formulada por Meyr (2000), esse modelo é conhecido como GLSPST (*General Lot sizing and Scheduling Problem Setup Times*). A principal mudança é que o tempo de preparação é dependente da sequência. Omite-se a descrição dos dados, parâmetros e variáveis, pois são os mesmos utilizados anteriormente.

Os parâmetros considerados são:

m_j = Tamanho mínimo do lote do produto j

s_{ij} = Custo de preparação da máquina para mudar do produto i para o produto j

st_{ij} = Tempo de preparação da máquina para mudar do produto i para o produto j

E as seguintes variáveis:

$$y_{ijn} = \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ se há troca do item } i \text{ para o item } j \text{ na posição } n \\ 0 \text{ caso contrário} \end{array} \right\}$$

Assim o GLSPST pode ser modelado como:

$$\text{Min} \quad \sum_{i=1}^J \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N s_{ij} y_{ijn} + \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T h_j I_{jt} \quad (2.32)$$

$$\text{s.a :} \quad I_{jt} = I_{j(t-1)} + \sum_{n=F_t}^{L_t} q_{jn} - d_{jt} \quad j = 1, \dots, J, t = 1, \dots, T \quad (2.33)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{n=F_t}^{L_t} p_j q_{jn} + \sum_{i=1}^J \sum_{j=1}^J \sum_{n=F_t}^{L_t} st_{ij} y_{ijn} \leq C_t \quad t = 1, \dots, T \quad (2.34)$$

$$p_j q_{jn} \leq C_t z_{jn} \quad j = 1, \dots, J, t = 1, \dots, T, \quad (2.35)$$

$$n = F_t, \dots, L_t$$

$$q_{jn} \geq m_j (z_{jn} - z_{j(n-1)}) \quad j = 1, \dots, J, n = 1, \dots, N \quad (2.36)$$

$$\sum_{j=1}^J z_{jn} = 1 \quad n = 1, \dots, N \quad (2.37)$$

$$y_{ijn} \geq z_{i(n-1)} + z_{jn} - 1 \quad i = 1, \dots, J, j = 1, \dots, J, \quad (2.38)$$

$$n = 1, \dots, N$$

$$y \in \mathbb{B}^{JJN}, z \in \mathbb{B}^{JN}, I \in \mathbb{R}_+^{JT}, q \in \mathbb{R}_+^{JN} \quad (2.39)$$

A função objetivo (2.32) minimiza a soma do custo de *setup* dependentes da sequência e do custo de estoque. As restrições (2.33) consistem no balanceamento de estoques. O conjunto de restrições (2.34) são de capacidade, e fazem com que a capacidade disponível (tempo) seja reduzida, pela quantidade produzida e levando em conta os tempos de preparação. As restrições (2.35) e (2.37) determinam que a produção de um item só pode acontecer se a máquina estiver preparada para ele e somente um estado de preparação é permitido em cada posição n do período t . Note que se o produto j é produzido na posição n , então o tamanho do subperíodo é o tempo necessário para a produção do item j ($p_j q_{jn}$), mais um eventual tempo de preparação ($st_{ij} y_{ijn}$). As inequações (2.36) garantem que se houver uma preparação de máquina então terá que ser produzido pelo menos o lote mínimo, ou seja, quando houver troca de itens. Essa restrição é importante para os casos onde a matriz de custos de preparação não satisfaz a desigualdade triangular:

$$s_{ik} + s_{kj} \geq s_{ij} \quad i = 1, \dots, J, j = 1, \dots, J, k = 1, \dots, J. \quad (2.40)$$

Essa situação pode ocorrer em alguns processos produtivos, onde produzir o item i e depois o item j requer a limpeza do sistema produtivo para evitar contaminação, no entanto, se existir um item k que possa ser produzido depois de j para limpar o sistema produtivo, então a inequação (2.40) é violada (Meyr (2000)). Neste caso precisa-se produzir uma quantidade mínima do item k (m_k) para fazer a limpeza, o que é garantido pela restrição (2.36). O tamanho do lote é um parâmetro que depende das características de cada item, ou seja, a quantidade mínima a ser produzida deve ser determinada de forma que não sobre resíduos de outros itens (produzidos anteriormente) na linha. O conjunto de inequações (2.38) relacionam os indicadores do estado de preparação da máquina (z_{in}) aos indicadores de mudança de um produto para outro (y_{jin}). Ou seja, se a máquina estava preparada para o item j na posição $(n-1)$ então ($z_{j(n-1)} = 1$), e está preparada para o item i na posição n então ($z_{in} = 1$), ou seja existe uma preparação de j para i ($y_{jin} = 1$).

Esse modelo considera que mudar do item j para o item i implica em um tempo de preparação st_{ji} e em custos de preparação s_{ji} . As sequências de posições consecutivas onde um mesmo item é produzido define um lote deste item, enquanto a quantidade produzida nestas posições define o tamanho deste lote.

O estudo de caso apresentado neste trabalho está baseado neste modelo e será mostrado adiante detalhadamente.

2.2 MÉTODOS DE SOLUÇÃO

Nesta seção será apresentada uma breve revisão de alguns métodos de solução para os problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes. Como foi dito anteriormente estes problemas são modelados por programação inteira mista, e podem ser resolvidos por métodos exatos ou heurísticos. Pode-se ter heurísticas construtivas e heurísticas de busca local, meta-heurísticas ou matheurísticas (Drexl e Kimms (1997)). Devido a complexidade dos modelos de dimensionamento e sequenciamento de lotes, existem abordagens que combinam diferentes métodos de solução, tanto exatos quanto heurísticos.

2.2.1 Métodos exatos

Os métodos exatos mais utilizados para encontrar solução de modelos de programação matemática inteira mista (MIP-*Mixed Integer Program*) são *Branch-and-Bound (B&B)* e *Branch-and-Cut (B&C)*.

O *Branch-and-Bound* é um método de enumeração implícita, onde é usada a estratégia *dividir para conquistar*. A busca pela solução ótima é feita através da partição do conjunto de soluções possíveis do problema em subconjuntos mais restritos (subproblemas). Cada subproblema é avaliado para decidir se há necessidade de novas partições no processo de enumeração.

Segundo Pochet e Wolsey (2006) uma boa formulação do problema é determinante para resolver um MIP usando o método *Branch-and-Bound*. Uma sugestão de melhoria, seria adicionar desigualdades válidas na formulação inicial para reduzir a região factível, sem eliminar nenhuma solução inteira. Estas desigualdades são conhecidas como Planos de Corte, combinadas com o método *Branch-and-Bound* resultam no método *Branch-and-Cut*. Estes métodos podem ser encontrados em Land e Doig (1960) e Belvaux e Wolsey (2000) respectivamente.

A implementação computacional desses métodos é complexa. Atualmente existem alguns aplicativos comerciais para resolução destes modelos, os principais são: CPLEX (ILOG, *Inc*) e LINGO (LINDO *Systems, Inc*).

2.2.2 Métodos Heurísticos

Os modelos GLSP e o GLSPST são NP-Completo segundo Meyr (2000), tornando a aplicação dos modelos exatos inviável pelo alto tempo computacional para resolução. Motivado pela complexidade computacional, em paralelo com o desenvolvimento de modelos matemáticos, surgiram heurísticas baseadas no conhecimento do problema.

De acordo com Maes e Wassenhove (1988), as heurísticas de dimensionamento de lotes podem ser divididas em dois grupos. As heurísticas período-a-período constroem uma solução do período 1 ao T. Depois de ser determinado a quantidade a ser produzida em todos os períodos, o excesso de capacidade pode ser usado para atender demandas futuras, visando a economia dos custos de preparação. Usando índices de prioridade este tipo de heurística determina o produto e a quantidade a ser produzida nos períodos futuros. Exemplos podem ser encontrados em Gu (1987), Maes e Wassenhove (1988) e Trigeiro (1989). As heurísticas de melhoria começam com uma solução inicial, podendo esta inclusive ser ineficiente, essa solução pode ser gerada através de técnicas para dimensionamento de lotes não capacitado, e são compostas basicamente de três passos: a geração da solução inicial ignorando as restrições de capacidade, a factibilização da solução através de mudanças no tamanho dos lotes de um período para outro e o terceiro passo consiste em minimizar os custos impedindo soluções ineficientes.

Um exemplo de heurística de melhoria aplicada ao CLSP pode ser encontrado em Trigeiro (1989), onde inicialmente uma solução é encontrada utilizando a técnica lote-por-lote, ou seja, o tamanho do lote é igual a demanda em cada período. Para obter a factibilização é usado um procedimento retroativo, onde a produção de períodos com capacidade insuficiente é antecipada nos períodos com excesso de capacidade. O objetivo deste passo é tentar minimizar a soma dos custos de preparação e custos de estoques, para que as restrições de capacidade sejam respeitadas. E por último para melhorar a solução são feitos rearranjos.

Para Karimi, Ghomi e Wilson (2003), a organização da heurística para solucionar o problema de dimensionamento de lotes possui três passos: o dimensionamento de lotes, uma rotina de factibilização e um passo de melhoria. O dimensionamento dos lotes consiste em converter a matriz de demanda em uma matriz de lotes de produção. No passo de factibilização as quantidades são realocadas para que as restrições de capacidade sejam respeitadas e que toda a demanda seja atendida sem atrasos. Uma vez que é possível que em alguns períodos a demanda total ultrapasse a capacidade total, nesses casos deve haver um estoque anterior que atenda a demanda sem atrasos. E por último acontece o passo de melhoria, onde são aplicadas diversas regras para refinar e melhorar a solução encontrada.

Em Gupta e Magnusson (2005) é considerado o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes com tempos de custos de preparação dependentes da sequência, assumindo que a preparação da máquina deve ser mantida de um período para outro. (*setup*

carryover). Para este problema é proposta uma heurística chamada ISI (*Initialize, Sequence and Improve*), que é composta de três passos: primeiramente é encontrada uma solução inicial factível para determinar as quantidades a serem produzidas, depois são encontradas sequências produtivas com mínimo custo para cada período, e por fim a solução é refinada buscando antecipar a produção para economizar nos tempos de preparação. Esta heurística pressupõe que a desigualdade triangular (2.40) é válida para os tempos de preparação e alguns testes para pequenas instâncias são realizados, já para resolver grandes instâncias considerando os tempos de preparação dependentes da sequência é inviável.

2.2.3 Meta-heurística

Os problemas de dimensionamento de lotes são difíceis de resolver e tem sido propostas várias técnicas para encontrar uma solução. As meta-heurísticas estão se tornando ferramentas populares e eficientes para resolver problemas de otimização combinatória. Algumas utilizadas são Busca Tabu (TS - *Tabu Search*), Algoritmo Genético (GA - *Genetic Algorithms*) e *Simulated Annealing* (SA) (Glover (1989) e Glover (1990), Michalewicz e Fogel (2013), Kirkpatrick, Gelatt et al. (1983)). Uma das principais razões para o sucesso dessas meta-heurísticas é a sua flexibilidade e capacidade de lidar com problemas grandes e complexos, afirma Jans e Degraeve (2007).

Usando o *Simulated Annealing*, Kuik e Salomon (1990) aplicaram a meta-heurística para resolver um problema de dimensionamento de lotes com multi-nível. A partir de alguns experimentos, tornou-se claro que a heurística foi capaz de obter boas soluções em um tempo computacional razoável, apenas para problemas pequenos (20 itens e 20 períodos de planejamento). Para resolver problemas maiores foi necessário um grande tempo computacional. Um outro exemplo de aplicação do *Simulated Annealing* é encontrado em Tang (2004), onde é resolvido o problema de dimensionamento de lotes com vários itens sem restrições de capacidade. O autor destaca que as operações da heurística *Simulated Annealing* são aplicadas sobre a matriz de decisão do dimensionamento de lotes.

Um exemplo de aplicação do Algoritmo Genético pode ser encontrado em Sikora (1996), onde é proposto resolver um problema de programação da produção integrando decisões de dimensionamento e sequenciamentos de lotes, com tempos de preparação em cada máquina dependentes da sequência, restrições de capacidade e capacidade limitada de estoque intermediário entre as máquinas e datas de entrega. Usando uma adaptação do Sikora (1996) e combinando com as técnicas do *Simulated Annealing*, Ponnambalam e Reddy (2003) desenvolveram um procedimento híbrido de duas fases, que apresentou melhores resultados nos testes realizados.

Para solucionar o problema de dimensionamento de lotes com único item capacitado Hindi (1995) propõe um algoritmo de Busca Tabu de modo que, em experimentos, em todos os testes foram encontradas soluções ótimas.

Na implementação dessas meta-heurísticas algumas considerações precisam ser feitas. Segundo Michalewicz e Fogel (2013), por exemplo nas meta-heurísticas Busca Tabu e *Simulated Annealing* é necessário definir:

- como será representada uma solução,
- como avaliar uma solução,
- como definir uma vizinhança,
- uma solução inicial.

Além disso, há muitos parâmetros de controle que precisam ser fixados como a temperatura inicial, razão de resfriamento e o critério de parada no caso do *Simulated Annealing*. Já para a Busca Tabu tem-se a estrutura e o comprimento da memória, critério de aspiração e a condição de parada. Para o Algoritmo Genético, as principais considerações são: a representação da solução, a avaliação da solução, a construção dos operadores genéticos para geração dos filhos a escolha de um mecanismo de seleção para determinar a próxima geração, e alguns parâmetros precisam ser fixados como: tamanho da população, taxa de cruzamento, taxa de mutação e intervalo de geração.

Neste trabalho será utilizado a Busca Tabu, combinada com uma metodologia exata, razão pela qual ela será apresentada detalhadamente a seguir.

2.2.3.1 Busca Tabu

A Busca Tabu é uma meta-heurística que foi proposta por Glover (1989) e novamente abortada em Glover (1990), para ser utilizada na resolução de problemas de otimização combinatória. A estratégia da Busca Tabu consiste em buscar soluções de melhor qualidade para um problema na vizinhança de uma dada solução. A principal característica da Busca Tabu é a possibilidade da busca continuar mesmo depois de atingir um ótimo local do problema. É possível ir para uma solução vizinha de pior qualidade com a esperança de que após um determinado número de iterações seja encontrado outro mínimo local de melhor qualidade que o anterior. Uma aplicação da Busca Tabu foi proposta por Silva e Volpi (2015), onde foi utilizado essa heurística em conjunto com uma heurística chamada de Greedy-Mod para solucionar o problema GLSP.

Quando se caminha para uma solução vizinha de pior qualidade, a busca é atraída a voltar ao mínimo local anterior, isso caracteriza a ciclagem da solução e acaba impedindo a busca de novos mínimos locais. Por isso, é necessário incluir um elemento que restringe que a busca volte a essas soluções, tornado algumas soluções vizinhas como tabu, ou seja essas soluções são impedidas, permitindo assim explorar novas regiões. Estes elementos são chamados como restrições tabu.

Ao trocar de uma solução atual para uma solução vizinha é realizado o que se chama de movimento. Após o movimento é criada uma restrição tabu com as características do movimento, impedindo que a busca faça novamente esse movimento por algumas iterações. As restrições são armazenadas em uma lista tabu, que é atualizada a cada iteração.

O período tabu é o número de iterações que um determinado movimento permanece como tabu, não sendo permitida a realização desse movimento. Esse período é um elemento essencial para a eficiência da busca, pois períodos muito curtos podem gerar ciclos e já os períodos longos podem prejudicar a solução. O período tabu pode ser estático ou dinâmico. O período estático é fixo durante toda a busca e todos os elementos permanecem na Lista Tabu pelo mesmo número de iterações. Já o dinâmico não tem um período constante cada elemento pode ter um período diferente durante a busca. Esses podem ser gerados de forma randômica ou sistemática.

As restrições dos movimentos da lista tabu podem tornar a busca muito limitada, porém o número de iterações que uma restrição tabu deve permanecer na lista deve ser grande o suficiente para evitar a ciclagem, mas não tão grande a ponto de limitar a busca. Para não deixar a busca tão restritiva, é aplicado o critério de aspiração. Esse critério permite que um movimento, mesmo que esteja na lista tabu, seja realizado se a solução obtida for melhor que a melhor solução já encontrada.

As restrições tabu e o critério de aspiração são a base da função de memória de curto prazo da busca tabu. Essa função é responsável por realizar a busca por soluções de modo que se obtenha sempre a melhor solução de uma determinada região vizinha da solução.

Na maioria das vezes, utilizar somente a memória de curto prazo pode fazer com que o processo leve muito tempo para encontrar soluções de boa qualidade. Com o objetivo de melhorar a eficiência da busca, em muitas aplicações é necessário o uso de funções de memória de longo prazo. Essas funções, de curto e longo prazo, são responsáveis por promover a intensificação local e a diversificação global da solução respectivamente.

A estratégia de intensificação consiste em retornar a busca para regiões consideradas promissoras que foram recentemente visitadas pelo processo da busca, fazendo uma busca mais profunda nesta região. Um exemplo do uso da intensificação é a utilização da memória de frequência, onde, de tempos em tempos a fase de busca normal é interrompida para dar início ao processo de intensificação. A ideia é congelar os componentes considerados atraentes (os que aparecem com maior frequência) e modificar apenas os componentes restantes.

Em contraste com a intensificação, o objetivo da diversificação é estimular a geração de soluções que se diferem das anteriores. O processo é realizado de maneira inversa ao processo de intensificação, ou seja, é feita uma análise das características das soluções encontradas durante o processo de busca e, então, procura-se por soluções que tenham características distintas das encontradas até o momento, gerando um novo ponto de partida para a busca.

O critério de parada da busca tabu, assim como em outras meta-heurísticas, pode ser a partir de um número fixo de iterações ou um número fixo de iterações sem melhoria da solução, depois de uma quantidade de tempo da CPU ou quando alcançado um limite pré-estabelecido de qualidade da solução. Um pseudocódigo para a busca tabu pode ser encontrado no ALGORITMO 1.

ALGORITMO 1: Pseudocódigo do algoritmo da busca tabu:

- Passo 1:
 Encontrar uma solução inicial;
- Passo 2:
 Avaliar os elementos da vizinhança da solução atual que não seja tabu ou atenda o critério de aspiração;
- Passo 3:
 Tornar a melhor solução como a atual;
- Passo 4:
 Atualizar a lista tabu;
- Passo 5:
 Se o critério de parada for satisfeito continuar no passo 6, senão voltar ao passo 2;
- Passo 6:
 Retornar a melhor solução encontrada.
-

2.2.4 Matheurística

Segundo Boschetti et al. (2009), matheurísticas são heurísticas híbridas que misturam meta-heurísticas e técnicas de programação matemática. A característica essencial é a exploração de uma parte dos algoritmos derivados do modelo matemático do problema de interesse.

Os estudos envolvendo Matheurísticas são relativamente novos, o primeiro congresso internacional ocorreu na Itália em 2006 (Solnon e Fenet (2006)), e o primeiro livro dedicado para meta-heurísticas híbridas foi publicado em 2008 (Blum e Roli (2008)). A partir deste período alguns estudos vem aparecendo regularmente na literatura utilizando programação matemática e meta-heurísticas (Hansen, Mladenović e Pérez (2008), Boschetti e Maniezzo (2009), Baumgartner, Schmid e Blum (2011), entre outros). Esta junção pode ir em duas direções, uma é usar meta-heurísticas para melhorar técnicas de programação matemática e a outra é usar programação matemática inserida em meta-heurísticas. A proposta para encontrar soluções deste trabalho se baseia na última direção citada, inserindo programação matemática em meta-heurística.

Meta-heurísticas como Busca Tabu, *Simulated Annealing* e Algoritmos Genéticos foram propostos em um tempo em que os algoritmos de programação inteira mista (MIP) não eram tão eficientes ou não eram uma alternativa viável para resolver problemas em

instâncias reais, ou subproblemas significativos deles. Segundo Obal (2016), a pesquisa em programação matemática, tem tornado os MIP *solvers* ou códigos customizados em MIP cada vez mais aplicáveis. Com isso os estudos envolvendo otimização em programação matemática e meta-heurísticas estão crescendo. Pesquisadores no campo das meta-heurísticas têm sido atraídos para o estudo matemático e para a fundamentação teórica do campo da programação matemática, com a existência de *solvers* cada vez mais poderosos e a habilidade da programação matemática de resolver grande número de problemas bem definidos. Por outro lado, o campo da programação matemática tem tentado juntar ideias do campo das meta-heurísticas na busca de apresentar algoritmos mais eficientes e a aplicabilidade das meta-heurísticas em problemas de otimização. Atualmente o foco está em resolver o problema em mãos da melhor maneira possível, ao invés de promover uma certa meta-heurística.

Neste momento a revisão bibliográfica será direcionada para trabalhos de dimensionamento de lotes em empresas têxtil.

2.3 TRABALHOS CORRELATOS

O problema de dimensionamento de lotes em empresas da indústria têxtil é pouco explorado pelos pesquisadores. A seguir serão citados alguns trabalhos que foram encontrados durante a pesquisa.

O trabalho de Toni e Meneghetti (2000) investiga como as variáveis de decisão interferem no planejamento do processo de produção. As variáveis estudadas são referentes a duração do período de planejamento, a disponibilidade de material, a ligação entre a ordem de produção e os pedidos dos clientes, e o desempenho do sistema. Um estudo de caso de uma famosa empresa italiana foi realizado e criado um modelo de simulação.

Outro trabalho encontrado na pesquisa foi o do Silva e Magalhaes (2006), no qual foi estudado um problema encontrado em uma empresa produtora de fibras acrílicas utilizadas na indústria têxtil. Esse trabalho é interessante pois o problema é um caso particular do problema discreto de dimensionamento e sequenciamento de lotes (DLSP). O problema se resume em determinar o tamanho dos lotes a serem produzidos e gerar o sequenciamento em dez máquinas paralelas, minimizando as trocas de ferramentas e a quantidade de fibras que são entregues com atraso da produção. Os autores Silva e Magalhaes (2006) adaptaram com sucesso a heurística proposta por Pattloch, Schmidt e Kovalyov (2001) para solucionar o problema. O estudo foi levado até a empresa e implementado para gerar o plano de produção das unidades de fiação.

Levado em conta que poucos trabalhos foram encontrados, envolvendo dimensionamento de lotes e indústrias do ramo têxtil, escolheu-se estudar o planejamento de uma indústria de confecções. No próximo capítulo, será detalhado como é feito o planejamento de uma indústria de confecções.

3 PLANEJAMENTO DE PRODUÇÃO DE UMA EMPRESA DE CONFECÇÕES

Neste capítulo será apresentado a empresa foco do estudo, bem como as decisões envolvidas no dimensionamento e sequenciamento de lotes. Será adaptado o modelo GLSPST (2.32 - 2.39) visto anteriormente para ajudar na tomada de decisões da empresa.

3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A indústria têxtil é constituída dos segmentos de fiação, tecelagem e acabamento de fios e tecidos. O segmento de tecelagem é subdividido em mais dois segmentos: a tecelagem plana e malharia. Cada um destes segmentos pode oferecer ao mercado um produto acabado, estando desconectado dos demais (SEBRAE/SP (2001)).

A FIGURA 6, representa a cadeia têxtil e de confecção. A cadeia se inicia com o fornecimento das fibras, filamentos artificiais e sintéticos. A indústria química tem um papel importante na cadeia, pois fornece as fibras, os filamentos artificiais e sintéticos. Já a indústria petroquímica é responsável pelo abastecimento dos pigmentos e corantes além de fornecer os filamentos artificiais e sintéticos. A indústria agropecuária é responsável pelo fornecimento das fibras naturais.

O próximo processo consiste na tecelagem plana e malharia, onde o entrelaçamento dos fios ou filamentos são transformados em tecidos. Nas indústrias de confecções o tecido é transformado em artigos de vestuário ou artigos confeccionados. Após este processo os artigos são destinados para exportação, varejo físico, vendas por catálogo ou vendas eletrônicas chegando finalmente ao consumidor final.

O segmento de vestuário é composto pelas classes de roupa: íntima, de dormir, *fitness*, praia, gala, social, lazer infantil e das classes de roupas especiais, como as de segurança, profissionais e hospitalar. Já o segmento de artigos confeccionados é composto pela fabricação de meias, modeladores, acessórios para vestuário, artigos de cama, mesa, banho, cozinha e artigos para decoração. A produção do setor de confecção é destinada ao comércio atacadista, ao comércio varejista, às lojas de departamento, às lojas especializadas e a outras indústrias e atividades de serviços (SEBRAE/SP (2001)).

A empresa onde será desenvolvido este trabalho é especializada em uniformes hospitalares e os principais itens confeccionados são: lençóis de solteiro, pijamas cirúrgicos, aventais cirúrgicos, campos cirúrgicos, sapatilhas e cueiros de maternidade. Deve-se ressaltar que as cores dos produtos são diferentes uma das outras.

Quando se deseja confeccionar um produto é necessário fazer a regulagem da máquina em relação a espessura do tecido que irá ser costurado e trocar a cor do fio para mesma cor

FIGURA 6 – CADEIA TÊXTIL-CONFECÇÃO
Estrutura da cadeia produtiva e de distribuição têxtil e confecção



Fonte: Adaptada de ABIT (2015b).

da peça. Por exemplo, deseja-se que seja fabricado um campo cirúrgico na cor azul, então é necessário que a cor do fio na máquina seja azul.

Sendo assim, na linha de produção da confecção a decisão a ser tomada depende da cor do fio que entrará na produção e do tipo de tecido para produzir os produtos. Isto quer dizer que o *setup* ocorrerá quando houver mudança de cor e do tipo de tecido do produto que será produzido.

3.2 PLANEJAMENTO ATUAL DA EMPRESA

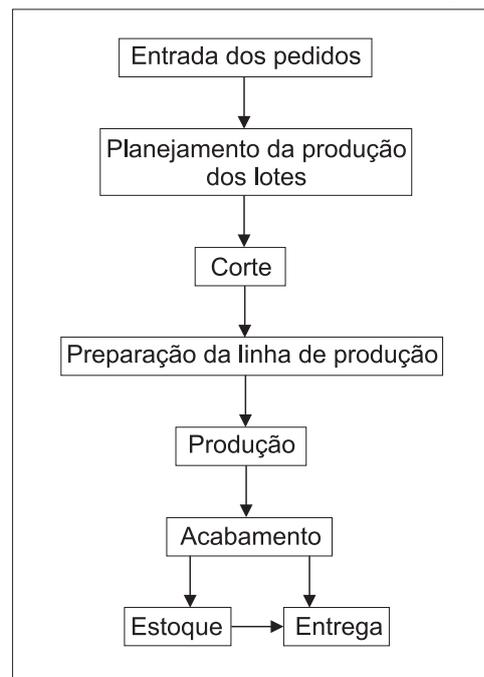
Atualmente na empresa, o planejamento é feito mensalmente. Sempre no início do mês é planejado qual o tamanho do lote a ser fabricado e qual a sequência das cores. Os pedidos chegam sempre com a regularidade de um mês. Existem dois clientes que necessitam de uniformes hospitalares e os pedidos desses clientes não consomem a capacidade total mensal disponível na linha de produção, por isso, outros pedidos menores, de outros itens e de outros clientes, são colocados de modo que a troca de cor seja a mínima possível. Todo o processo é planejado usando a experiência adquirida durante os anos de produção e nenhum processo de otimização é utilizado nele.

3.2.1 Descrição do fluxo de produção

Na FIGURA 7, é ilustrada toda a sequência que um pedido deve percorrer dentro da empresa. Na entrada dos pedidos, já é definida uma previsão de entrega. Como o planejamento é mensal, ainda existe a necessidade de semanalmente fazer um pequeno planejamento para ajustar a linha de produção, de forma que não ocorra ociosidade. Nesse pequeno planejamento

é verificado se existe outros clientes com demanda. Após ser planejado o sequenciamento, os itens precisam ser cortados. O planejamento do corte é feito por uma empresa terceirizada onde é otimizado o corte para os uniformes hospitalares. Para outros clientes o corte é planejado pelos próprios empregados, com ajuda de planilhas e da experiência adquirida. Após o corte os itens chegam na linha de produção e é necessário fazer o ajuste das máquinas, como troca de agulhas e do transportador, e a troca da cor da linha que irá ser usada para costurar as peças. Lembrando que a cor do fio tem que ser a mesma cor dos itens que irão ser costurados. Quando a linha de produção estiver preparada, os itens passam a ser produzidos. Assim que os itens são produzidos é feito o acabamento que consiste em retirar o excesso de linha, verificar se a peça está em perfeito estado e a adequação da embalagem. Quando o pedido de um cliente estiver pronto ele é notificado para fazer a retirada do pedido ou o pedido é entregue, pois a empresa não trabalha com estoques. O estoque só é feito por pouco tempo, para aglomerar os itens de um pedido.

FIGURA 7 – FLUXO DE PRODUÇÃO



Fonte: O autor (2016).

Neste trabalho o objetivo é resolver o problema de planejamento da produção e o sequenciamento dos lotes que devem entrar na linha de produção. O planejamento consiste em determinar a tamanho dos lotes em um determinado período considerando o número de itens, a capacidade de produção normal e extra, o *setup* dependente da sequência e os níveis de estoques. Aqui não será estudado o sequenciamento nas máquinas e sim, somente o sequenciamento dos lotes na linha de produção.

3.3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Para fazer a modelagem matemática do problema apresentado na seção 3.2.1, é necessário alterar o significado de algumas variáveis que foram descritas no Capítulo 2. Para facilitar a compreensão e o entendimento do modelo, serão descritos novamente todos os índices, parâmetros e variáveis. Os parâmetros são os dados disponíveis dos problemas e as variáveis de decisão são responsáveis por produzir um sequenciamento na linha de produção de modo que certas condições sejam satisfeitas.

Os índices usados são:

$i, j = 1, \dots, J$, onde J representa o número total de itens

$t = 1, \dots, T$, onde T é o número total de períodos no horizonte de planejamento

Os parâmetros são:

C_t = Capacidade da linha de produção no período t , em unidades de tempo

C_{max_t} = Capacidade máxima extra por período t , em unidades de tempo

d_{jt} = Demanda do item j no período t

I_{j0} = Estoque inicial do item j

s_{ij} = Custo de fazer os ajustes na linha de produção na troca do item i para o j

h_j = Custo unitário de estoque do item j por período

p_j = Tempo necessário para produzir uma unidade do item j

st_{ij} = Tempo de ajustar a linha de produção na troca do item i para o j

m_j = Tamanho do lote mínimo para o item j

G = Número grande, relativamente a s e a h

N_t = Número máximo de lotes no período t

O número máximo de lotes será considerado igual ao número de itens, para permitir que todos os itens possam ser produzidos em qualquer período t , caso seja necessário.

Em cada período t serão criadas N_t posições para alocar os lotes no período, sendo que:

$F_t = 1 + \sum_{\tau=1}^{t-1} N_\tau$ para referenciar a primeira posição do período t e

$L_t = F_t + N_t - 1$ para referenciar a última posição do período t

$N = \sum_{t=1}^T N_t$ é o número máximo de lotes que podem ser produzidos

$$z_{j0} = \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ se a linha de produção está preparada para o item } j \text{ no período} \\ \text{inicial} \\ 0 \text{ caso contrário} \end{array} \right\}$$

As variáveis são:

I_{jt} = Estoque do item j no período t

q_{jn} = Quantidade produzida do item j na posição n

$Cext_t$ = Capacidade extra usada no período t

$$y_{ijn} = \begin{cases} 1 & \text{se há } setup \text{ do item } i \text{ para o item } j \text{ na posição } n \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$z_{jn} = \begin{cases} 1 & \text{se a linha de produção está preparada para produzir o item } j \text{ na} \\ & \text{posição } n \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Vale ressaltar que estar preparada significa que tem um *setup* na posição n ou que já houve *setup* em alguma posição anterior.

Assim o problema exposto na seção 3.2.1, especificamente em relação a preparação da linha de produção será modelado a seguir. O Modelo I é baseado na modelagem do Meyr (2000), com algumas modificações.

Modelo I:

$$Min \quad \sum_{i=1}^J \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N s_{ij} y_{ijn} + \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T h_j I_{jt} + G \sum_{t=1}^T Cext_t \quad (3.1)$$

$$s.a : \quad I_{jt} = I_{j(t-1)} + \sum_{n=F_t}^{L_t} q_{jn} - d_{jt} \quad \begin{matrix} j = 1, \dots, J, \\ t = 1, \dots, T \end{matrix} \quad (3.2)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{n=F_t}^{L_t} p_j q_{jn} + \sum_{i=1}^J \sum_{j=1}^J \sum_{n=F_t}^{L_t} st_{ij} y_{ijn} \leq C_t + Cext_t \quad t = 1, \dots, T \quad (3.3)$$

$$Cext_t \leq Cmax_t \quad t = 1, \dots, T \quad (3.4)$$

$$p_j q_{jn} \leq (C_t + Cmax_t) z_{jn} \quad \begin{matrix} j = 1, \dots, J, \\ t = 1, \dots, T \\ n = F_t, \dots, L_t \end{matrix} \quad (3.5)$$

$$q_{jn} \geq m_j (z_{jn} - z_{j(n-1)}) \quad \begin{matrix} j = 1, \dots, J, \\ n = 1, \dots, N \end{matrix} \quad (3.6)$$

$$\sum_{j=1}^J z_{jn} = 1 \quad n = 1, \dots, N \quad (3.7)$$

$$y_{ijn} \geq z_{i(n-1)} + z_{jn} - 1 \quad \begin{array}{l} i = 1, \dots, J, \\ j = 1, \dots, J, \\ n = 1, \dots, N \end{array} \quad (3.8)$$

$$y \in \mathbb{B}^{JJN}, z \in \mathbb{B}^{JN}, I \in \mathbb{R}_+^{JT}, q \in \mathbb{R}_+^{JN}, C_{ext} \in \mathbb{R}_+^T \quad (3.9)$$

A função objetivo (3.2) aborda a minimização da soma do custo de *setup* dependentes da sequência e do custo de estoque, mais uma penalização de uso da capacidade extra. O número grande G serve para impedir que a capacidade extra seja utilizada quando não é necessário. As restrições (3.2) consistem no balanceamento do estoque. O conjunto de restrições (3.3) trata da capacidade, e fazem com que a capacidade disponível (tempo), normal ou extra, seja diminuída pela quantidade que é produzida e levando em conta os tempos de preparação da linha de produção. O conjunto de restrições (3.3) garante que a produção não ultrapasse a capacidade disponível. O conjunto de restrições (3.4) limita a capacidade extra utilizada. As restrições (3.5) juntamente com as restrições (3.7) determinam que a produção de um item só pode acontecer se a linha de produção estiver preparada para ele e somente um estado de preparação é permitido em cada posição n do período t , ou seja, só pode ser produzido um tipo de item por posição. Note que se o produto j é produzido na posição n , então o tamanho do sub-período é o tempo necessário para a produção do item j ($p_j q_{jn}$), mais um eventual tempo de preparação ($st_{ij} y_{ijn}$). O conjunto de restrições (3.5) também permite que toda capacidade disponível seja usada para a produção de um único item. Para facilitar a resolução do modelo exato, o C_{ext_t} é trocado por C_{max_t} para que o problema continue linear. O conjunto de restrições (3.6) garante que se houver preparação da linha de produção então terá que ser produzido pelo menos o lote mínimo deste item. O conjunto de restrições (3.8) relacionam os indicadores do estado de preparação da linha de produção (z_{in}) aos indicadores de mudança de um produto para outro (y_{ijn}) que implicam em custos. Ou seja, se a linha de produção estava preparada para o item i na posição $(n - 1)$ então ($z_{i(n-1)} = 1$), e está preparada para o item j na posição n então ($z_{jn} = 1$), ou seja existe uma preparação de i para j ($y_{ijn} = 1$). Esse modelo considera que mudar do item i para o item j implica em um tempo de preparação st_{ij} e em custos de preparação s_{ij} . As sequências de posições consecutivas onde um mesmo item é produzido define um lote deste item, enquanto a quantidade produzida nestas posições define o tamanho deste lote. E por fim o conjunto de restrições (3.9) define o domínio das variáveis.

Para ajudar no entendimento do modelo proposto em (3.2 - 3.9) um pequeno exemplo foi resolvido.

3.4 FUNCIONAMENTO DO MODELO - RESOLUÇÃO DE UM PROBLEMA DE PEQUENO PORTE

Para ajudar na implementação da metodologia escolhida, será explicado como é cada variável e como foi escolhida a melhor forma de representar cada uma. Para ser mais fácil a compreensão é criado um pequeno exemplo teste. Os dados foram criados aleatoriamente dentro de limites pré estabelecidos, com utilização de ferramentas de análise, como as planilhas do *Excel*. Foi utilizado o aplicativo *Lingo* para uma implementação do modelo. Todos os parâmetros e variáveis, serão representados na forma matricial.

Considerando o planejamento de produção de 3 itens em 2 períodos, tem-se a matriz de demanda igual a:

$$demanda = \begin{bmatrix} 80 & 50 \\ 50 & 60 \\ 27 & 52 \end{bmatrix},$$

onde as linhas estão representando os itens e as colunas os períodos. A capacidade está representada em minutos e foi representada da seguinte maneira: $C = [3000 \ 1000]$.

O lote mínimo considerado é de 10 unidades, foi definido $G = 10^{10}$, $Cmax_t = [4000 \ 4000]$. Os dados referentes ao custo de estoque (h), o tempo de produção (p), o estoque inicial (I_0) e o estado de preparação inicial (z_0) da linha de produção, são mostrados nas matrizes a seguir:

$$h = \begin{bmatrix} 5 \\ 10 \\ 7 \end{bmatrix}, \quad p = \begin{bmatrix} 20 \\ 10 \\ 20 \end{bmatrix}, \quad I_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad z_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

No início do horizonte de planejamento a linha de produção estará preparada para no máximo um item, por isso o estado de preparação inicial é representado dessa forma, foi usado a aleatoriedade para começar com a linha de produção preparada para a produção do item 1. Os últimos dados necessários são o custo e o tempo do *setup*, lembrando que aqui as matrizes são dispostas de forma que as linhas e colunas representam os itens. Por exemplo, na matriz s o elemento s_{12} representa o custo de *setup* na linha de produção na troca do item 1 para o item 2.

$$s = \begin{bmatrix} 0 & 100 & 1000 \\ 100 & 0 & 1000 \\ 1000 & 1000 & 0 \end{bmatrix}, \quad st = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 18 \\ 3 & 0 & 18 \\ 18 & 18 & 0 \end{bmatrix}.$$

Ao solucionar o modelo exato no aplicativo *Lingo* tem-se a quantidade, os níveis de estoque, e a capacidade extra utilizada, conforme representado na FIGURA 8.

para o item 3 ($z_{33} = 1$) e com isso gerou *setup* ($y_{233} = 1$, troca do item 2 para o item 3 na posição 3).

Assim é finalizada a sequência do primeiro período. Como o último item que foi produzido no primeiro período foi o item 3, então a linha de produção está preparada para este mesmo item e neste caso não há *setup*. O período 2 se inicia com a produção do item 3. Como o estoque é capaz de suprir a demanda dos outros itens do período 2, tem-se somente a produção do item 3. O valor da função objetivo é de 1950 desconsiderando o valor da penalização.

É importante ressaltar os dois objetivos principais deste modelo. O primeiro é desejado que a preparação de um item seja mantida na troca de períodos, e o segundo é que sejam produzidos em sequência os itens que tenham os menores valores de custo de *setup* entre si.

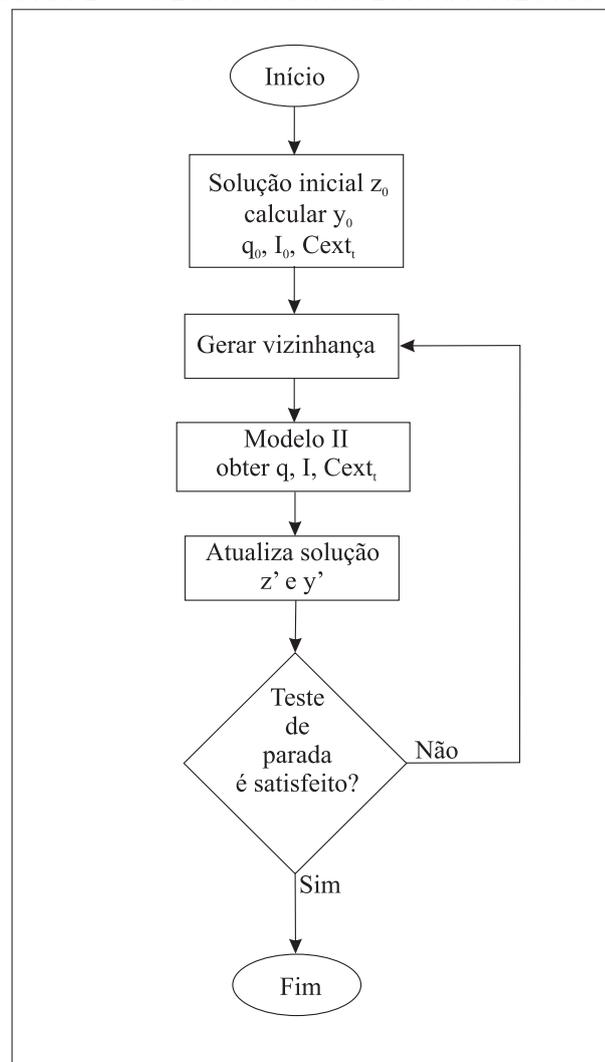
Neste pequeno exemplo, nota-se que os dois objetivos foram atingidos. O primeiro é a preparação do item 3 que é preservada na troca do período 1 para o período 2. E o segundo é a produção do item 1 e em sequência o item 2, pois eles tem os menores valores de custo de *setup* entre si.

Com a finalização da explicação do exemplo, é possível prosseguir para apresentação da implementação da metodologia que será proposta.

4 MATHEURÍSTICA PARA ENCONTRAR SOLUÇÕES

Neste capítulo será apresentada a proposta para encontrar soluções usando uma matheurística. A ideia geral do algoritmo proposto é usar a busca tabu para gerar a variável de decisão de preparação z_{jn} e usando o conjunto de restrições (3.8) é possível calcular os valores da variável y_{ijn} . Ao fazer isso o Modelo I é simplificado, gerando o que será chamado de Modelo II. Este modelo é usado para obter as variáveis contínuas I_{jt} , q_{jt} e $Cext_t$ pela metodologia exata. Esta sequência pode ser vista na FIGURA 10. Um dos objetivos deste capítulo é explicar o funcionamento do algoritmo proposto para solucionar o problema de dimensionamento de lotes com *setup* dependente da sequência de uma empresa de confecções.

FIGURA 10 – FLUXOGRAMA DA MATHEURÍSTICA



Fonte: O autor (2016).

Ao longo desse capítulo tem-se adaptação do Modelo I para o Modelo II, a explicação da escolha da representação das variáveis binárias z_{jn} e y_{ijn} . Todos os passos da Busca Tabu serão

explicados detalhadamente e para finalizar o capítulo, tem-se o algoritmo, a implementação e os testes computacionais.

4.1 MODELO II

A Busca Tabu será responsável por gerar a variável z_{jn} e com isso é possível calcular a variável y_{ijn} . Porém para resolver o problema ainda é necessário calcular as quantidades a serem produzidas que é representado pela variável q_{jt} , os níveis de estoque I_{jt} e a capacidade extra que foi utilizada $Cext_t$. A intenção é diminuir o número de variáveis e restrições que serão calculadas pelo aplicativo *Lingo* e neste caso, eliminar as variáveis binárias.

Aqui será omitido a descrição das variáveis pois são as mesmas utilizadas na formulação matemática do Capítulo 3. Um fato importante é que agora as variáveis z_{jn} e y_{ijn} , passam a ser parâmetros, pois são obtidas pela busca tabu. O modelo matemático se resume a :

Modelo II:

$$Min \quad \sum_{i=1}^J \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N s_{ij} y_{ijn} + \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T h_j I_{jt} + G \sum_{t=1}^T Cext_t \quad (4.1)$$

$$s.a : \quad I_{jt} = I_{j(t-1)} + \sum_{n=F_t}^{L_t} q_{jn} - d_{jt} \quad \begin{array}{l} j = 1, \dots, J, \\ t = 1, \dots, T \end{array} \quad (4.2)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{n=F_t}^{L_t} p_j q_{jn} + \sum_{i=1}^J \sum_{j=1}^J \sum_{n=F_t}^{L_t} st_{ij} y_{ijn} \leq C_t + Cext_t \quad t = 1, \dots, T \quad (4.3)$$

$$Cext_t \leq Cmax \quad t = 1, \dots, T \quad (4.4)$$

$$p_j q_{jn} \leq (C_t + Cmax) z_{jn} \quad \begin{array}{l} j = 1, \dots, J, \\ t = 1, \dots, T \\ n = F_t, \dots, L_t \end{array} \quad (4.5)$$

$$q_{jn} \geq m_j (z_{jn} - z_{j(n-1)}) \quad \begin{array}{l} j = 1, \dots, J, \\ n = 1, \dots, N \end{array} \quad (4.6)$$

$$I \in \mathbb{R}_+^{JT}, q \in \mathbb{R}_+^{JN}, Cext \in \mathbb{R}_+^T \quad (4.7)$$

O modelo acima é semelhante ao modelo (3.2 - 3.9), os conjuntos de restrições (3.7) e (3.8) são excluídos do mesmo, pois z_{jn} e y_{ijn} são obtidos através da busca tabu.

Com isso é esperado que o aplicativo *Lingo*, seja capaz de resolver o problema para um volume maior de dados.

O próximo passo é explicar como é feita a representação das variáveis binárias para então passar a explicar como é a busca tabu adaptada para o problema estudado neste trabalho.

4.2 REPRESENTAÇÃO DAS VARIÁVEIS z_{jn} E y_{ijn}

A interpretação das variáveis y e z deve ser feita em conjunto. Supondo que já se tenha obtido a matriz z , o próximo passo é obter a matriz y . No modelo (3.2 - 3.9), a variável y é tridimensional, e para facilitar a visualização dos resultados ela foi transformada em uma matriz bidimensional. Para representar a mudança de período serão usadas duas listras verticais na matriz y e também na matriz z . Quando houver uma listra vertical na matriz y indica a mudança de posição dentro do período.

Voltando ao exemplo que foi explicado na Seção (3.4), seja

$$z = \left[\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{array} \right]$$

a solução informada pela matriz z que representa a preparação da linha de produção. Nesta representação no primeiro período são produzidos os itens 1, 2 e 3 na sequência e no segundo período apenas o item 3. Então é observado que são necessárias 3 posições por período, pois tem-se 3 itens e é necessário no mínimo 3 posições para alocar os lotes. Como o horizonte de planejamento do exemplo é de 2 períodos, é necessário no mínimo 6 posições para alocar os lotes que serão ou não produzidos. Com essa justificativa, a representação da matriz y tem 6 blocos:

$$y = \left[\begin{array}{ccc|ccc|ccc|ccc|ccc} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right].$$

Cada bloco (3x3) da matriz y , representa se houve ou não a troca de item, isto é, se ($y_{ijn} = 1$) significa que no bloco n houve uma troca do item i para o item j . Por exemplo, no bloco 1 não houve troca de item, pois a linha estava preparada para a produção do item 1 ($z_{01} = 1$) e manteve a preparação ($z_{11} = 1$) do item 1, como não houve troca de item então não foi calculado o custo e o tempo para ajustar a linha. Já no segundo bloco, houve a troca do item 1 para o item 2, então pode-se observar na matriz y no segundo bloco que há troca do item 1 para o item 2 que é correspondente ao ($y_{122} = 1$), implicando no custo e no tempo para ajustar a linha para começar a produzir o item 2. No terceiro bloco do período 1, há troca do item 2 para o item 3 ($y_{233} = 1$) levando em custo e tempo de ajuste da linha de produção.

Observando que $z_{33} = 1$ e $z_{34} = 1$, a preparação da linha está sendo mantida do período 1 para o período 2, e como no final do período 1 há produção do item 3 e no início do período 2 também, foi mantida a preparação e houve uma economia de ajuste da linha de produção. Assim o valor de y no quarto bloco para todos os elementos é zero; no quinto e no sexto bloco o mesmo acontece. A variável y além de ser responsável por atribuir o custo e o tempo de ajuste da linha de produção, ela também representa a sequência da troca dos lotes e a variável z representa a sequência de produção dos lotes.

Assim, foi escolhida a forma de representar as variáveis binárias. Este tipo de representação é indicado pois facilita a interpretação dos resultados. A seguir será detalhado como foi aplicada a Busca Tabu para obter soluções para resolver o problema proposto.

4.3 BUSCA TABU ADAPTADA

O método proposto consiste na busca tabu pura, ou seja, será usado apenas estruturas de memória de curto prazo. O objetivo é desenvolver uma busca tabu que usa a aleatoriedade para encontrar boas soluções.

4.3.1 Solução inicial

Já foi mencionado que a busca tabu necessita de uma solução inicial para iniciar a heurística. Neste trabalho serão comparado dois tipos de soluções iniciais. O primeiro, chamado de solução do tipo 1, consiste em gerar a matriz z de acordo com a demanda. Esta heurística é conhecida como lote por lote. A produção de um item em determinado período é a demanda dele e o sequenciamento segue a ordem: item 1, item 2, item 3, ..., etc, por período. A matriz de preparação da linha de produção terá valor 1 nos locais onde há demanda. Usando os mesmos dados do exemplo descrito no Capítulo 3, uma solução inicial para o problema usando esse tipo de heurística seria:

$$z = \left[\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right].$$

e através do conjunto de restrições (3.8) tem-se a matriz:

$$y = \left[\begin{array}{ccc|ccc|ccc|ccc} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right].$$

Como

$$z_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

neste caso na primeira posição da matriz y não há *setup*, pois a linha de produção já estava preparada para o item 1. Na segunda posição tem-se uma *setup* referente a troca de item 1 para o item 2 e na terceira posição há uma troca do item 2 para o item 3. Continuando com esta mesma interpretação, no segundo período, na posição 4 há a troca do item 3 para o item 1, na posição 5 há a troca do item 1 para o item 2 e finalizando na posição 6 há a troca do item 2 para o item 3.

O segundo tipo de solução inicial, chamado de solução do tipo 2, também segue a heurística lote por lote, porém o sequenciamento é feito de forma aleatória. Um exemplo seria:

$$z = \left[\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{array} \right]$$

e calculando através do conjunto de restrições (3.8) tem-se a matriz:

$$y = \left[\begin{array}{ccc|ccc|ccc|ccc|ccc} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{array} \right].$$

No modelo estudado a solução do tipo 1 não gera soluções ineficazes, pois o modelo conta com a capacidade extra adequada, que poderá ser usada no caso em que a demanda de um período ultrapasse a capacidade disponível. Já a solução do tipo 2 pode acontecer de gerar soluções ineficazes, como a sequência gerada é criada aleatoriamente pode acontecer de um item ter demanda no primeiro período e a linha de produção não estar preparada para ele. Por exemplo, supondo que no primeiro período tem-se demanda dos 3 itens, porém ao criar uma solução inicial do tipo 2, seja gerada no primeiro período a preparação do item 1, depois do item 2 e mantida a preparação do item 2. Para o item 3 não houve a preparação da linha de produção, então não é possível produzir este item, como este modelo não permite atraso na produção, esta solução é ineficaz, supondo que o estoque inicial seja nulo.

4.3.2 Função de avaliação

Para avaliar se uma solução é melhor que outra, os resultados são substituídos na função objetivo (3.2). Como o modelo requer uma solução de minimização, o objetivo é encontrar uma solução de menor valor possível.

4.3.3 Vizinhaça

A vizinhaça, consiste em um pequeno movimento na matriz de preparação z . Para exemplificar considere a matriz de preparação a seguir

$$z = \left[\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right].$$

Por exemplo, no primeiro período a ordem de produção era, produzir o item 1, o item 2 e por fim o item 3. O primeiro tipo de vizinhança consiste em escolher aleatoriamente uma linha e uma coluna da matriz z e trocar o valor, se 0 por 1 e se 1 por 0. Como o conjunto de restrições (3.7) indica que apenas um item pode ser produzido por posição, o valor de $z(3, 3)$ deve ser alterado para 0. Isto indica no primeiro período apenas o item 1 e 2 serão produzidos, se houver demanda do item 3, sem estoque inicial, então esta solução será infactível. Por exemplo, sorteia-se a linha 2 e a coluna 3, então o movimento na matriz z gera uma matriz z' com os seguintes valores:

$$z' = \left[\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right].$$

Observa-se que o item 3 não está sendo produzindo no primeiro período, se houver demanda do item 3 no primeiro período, e não houver estoque inicial para este item, então essa solução será infactível.

Os movimentos citados anteriormente podem gerar soluções infactíveis, então um outro tipo de vizinhança é proposto. Essa vizinhança consiste em trocar a ordem de dois itens que serão produzidos. Esse tipo de movimento é importante para gerar soluções que mantêm a preparação de um item. Considerando a matriz z , ao trocar a ordem de produção, por exemplo, a produção do primeiro período passar a ser item 1, item 3 e depois o item 2, esse pequeno movimento gerou uma nova solução. Então um novo vizinho de z é

$$z'' = \left[\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right].$$

A vizinhança de uma solução é composta por diferentes movimentos que são obtidos conforme foi descrito anteriormente. A troca na ordem de produção está ligada diretamente com a função de avaliação através da matriz y , com isso é possível encontrar soluções com valor menor que a solução inicial.

4.3.4 Lista tabu

O papel desenvolvido pela lista tabu é bloquear por algumas iterações o movimento que foi escolhido. Como os movimentos que geram novas possíveis soluções são realizados na matriz de preparação z , então foi necessário criar uma matriz do mesmo tamanho que a matriz z para controlar os elementos da lista tabu.

Quando uma solução da vizinhança é escolhida para ser a solução atual, é necessário adicionar na lista tabu os movimentos que geraram essa solução. Na mesma posição onde ocorre a mudança da matriz z para a matriz z' é adicionado na matriz tabu o número de iterações que aquele movimento está proibido de ser realizado. A cada iteração é diminuído uma unidade nos movimentos que estão tabu, assim a matriz tabu é atualizada.

4.3.5 Critério de aspiração

O critério de aspiração consiste em permitir que um movimento seja realizado mesmo que este esteja na lista tabu, de modo que se possa melhorar o valor da função de avaliação. Ou seja, se um movimento está na lista tabu, porém esse movimento vai permitir que o valor da função avaliadora seja menor do que já foi encontrado, então esse movimento é aceito.

4.3.6 Critério de parada

Os critérios de parada usados neste trabalho é o número máximo de iterações e um limite de iterações onde uma solução não é alterada. É importante ressaltar que a quantidade máxima de iterações é obtida através de testes e varia de acordo com o tamanho do problema a ser resolvido.

Visto que os passos necessários para implementação da Busca Tabu foram detalhados. Agora, é necessário criar um algoritmo capaz de resolver o problema em questão.

4.4 ALGORITMO

O método para encontrar soluções para o problema de dimensionamento de lotes com *setup* dependente é descrito aqui. O modelo simplificado foi escrito na linguagem do aplicativo *Lingo* para ser usado com a Busca Tabu.

Primeiramente tem-se a entrada dos dados, com isso é possível gerar uma solução inicial $Z_{inicial}$ e calcular o $Y_{inicial}$ correspondente. Os valores de $Z_{inicial}$ e $Y_{inicial}$ são passados para a metodologia exata para serem obtidos os valores das variáveis contínuas, após obter o valor de todas as variáveis é calculado o valor da função objetivo.

A partir deste momento inicia-se um ciclo de repetição que só é finalizado quando for atingido o número máximo de iterações. Após obter uma solução inicial, é necessário gerar uma vizinhança, e obter o valor da função objetivo para cada vizinho que tenha uma solução factível. É escolhido o vizinho com o menor valor na função objetivo. E analisando se o movimento que gerou esse vizinho é tabu ou não. É necessário fazer uma comparação entre a função objetivo do vizinho e da função objetivo da solução atual, se a função objetivo do vizinho for menor que a solução atual então o movimento que gerou o vizinho entra na lista tabu ou aplica-se o critério de aspiração, e a solução atual passa a ser solução do vizinho. Neste mesmo instante é atualizada a lista tabu. O critério de parada é testado e se for satisfeito, então é retornada a solução atual, se não é necessário voltar ao início do ciclo e fazer todos os passos novamente.

O ALGORITMO 2 mostra todos os passos necessários para a implementação desse método, vale ressaltar que ele pode ser implementado em qualquer linguagem de programação.

ALGORITMO 2: Pseudocódigo para encontrar soluções:

- Passo 1:
Entrada dos dados.
- Passo 2:
Criar uma solução inicial $z_{inicial}$ e calcular o $y_{inicial}$.
- Passo 3:
Usar a metodologia exata para resolver o modelo simplificado.

Obtem-se o valor das variáveis: q , I , C_{ext} e calcula-se o valor da função objetivo inicial.
- Passo 4:
Fazer $z_{atual} = z_{inicial}$ e o valor da função objetivo atual vai receber o valor da função objetivo inicial.
- Passo 5:
Criar uma vizinhança, com diferentes movimentos.
- Passo 6:
Avaliar os elementos da vizinhança da solução atual que não seja tabu ou atenda o critério de aspiração.

Usar a metodologia exata para obter os valores das variáveis: q , I , C_{ext} e calcular o valor da função objetivo para cada elemento da vizinhança.
- Passo 7:
Escolher o elemento da vizinhança que possui o menor valor na função objetivo e fazer este elemento ser o z_{atual} , e a função objetivo referente a ele é transformada na função objetivo atual.
- Passo 8:
Atualizar a lista tabu.
- Passo 9:
Se o critério de parada for satisfeito continuar no passo 10, senão voltar ao passo 2.
- Passo 10:
Retorne a melhor solução disponível.
-

4.5 IMPLEMENTAÇÃO E TESTES COMPUTACIONAIS

A linguagem escolhida para a implementação do algoritmo foi a linguagem utilizada no *Matlab*. Esta linguagem foi escolhida pois existe uma boa interação com o *Lingo*. Usando o comando "*runlingo*" do *Matlab* os modelos escritos no ambiente *Lingo* podem ser resolvidos facilmente.

O computador usado nos testes possui um processador *Pentium Dual-Core T4500* 2,30 GHz com 4,00 GB de memória *ram* e sistema operacional *Windows 7 Home Basic* (64 bits). A versão do aplicativo *Lingo* é a 13.0 e do *Matlab* é a R2013a.

Para a realização dos testes foram criadas várias instâncias com valores próximos aos encontrados na indústria de confecções. Como o objetivo é resolver um problema de planejamento mensal, o horizonte de planejamento será dividido em 4 períodos, por isso as instâncias criadas todas tem 4 períodos. Ao total foram criadas 10 instâncias onde o número de itens começa em 3 e vai aumentando até chegar em uma instância com 12 itens. Os dados estarão a seguir.

As matrizes a seguir correspondem a 12 itens, porém elas podem ser usadas para todas as instâncias menores que 12. Por exemplo, para a primeira instância foram utilizados 3 itens, então é usado um bloco da matriz correspondente aos 3 primeiros itens. O único dado que não é usado desta maneira é o de capacidade, pois demandas maiores requerem capacidade maior, se os itens tiverem que ser produzidos em um período t . Os dados estão dispostos de forma que o modelo trabalhe com a capacidade extra e com estoques. Estes dados são usados em todas as instâncias: número grande $G = 10^5$ e capacidade máxima

$$C_{max} = \begin{bmatrix} 4000 & 4000 & 4000 & 4000 \end{bmatrix}.$$

As capacidades para cada instância são mostrados na TABELA 3. Sendo assim, foram reduzidas as capacidades por período para que surgissem estoques entre os períodos.

TABELA 3 – CAPACIDADES UTILIZADAS

Instância	Nº de itens	Período 1	Período 2	Período 3	Período 4
Instância 1	3	500	100	100	100
Instância 2	4	500	100	100	100
Instância 3	5	1000	500	500	100
Instância 4	6	2000	1000	500	500
Instância 5	7	2000	1000	500	500
Instância 6	8	2000	1000	500	500
Instância 7	9	2500	1500	500	500
Instância 8	10	2500	1500	500	500
Instância 9	11	2000	1000	1000	500
Instância 10	12	2500	2500	2500	2500

Fonte: O autor (2016).

As demandas são mostradas na TABELA 4.

TABELA 4 – DEMANDAS UTILIZADAS

	Período 1	Período 2	Período 3	Período 4
Item 1	100	199	100	100
Item 2	200	50	200	50
Item 3	100	70	288	102
Item 4	72	200	350	100
Item 5	373	104	200	100
Item 6	24	0	214	391
Item 7	21	111	0	132
Item 8	215	300	50	124
Item 9	50	187	67	567
Item 10	100	298	100	34
Item 11	300	227	500	114
Item 12	150	50	200	223

Fonte: O autor (2016).

Por exemplo, na TABELA 6 referente ao custo de preparação s , quando se deseja trabalhar com a instância 1 considera-se apenas o bloco (3x3) do canto superior esquerdo, conforme destacado. Desta mesma forma serão usadas as outras matrizes. Para as outras instâncias é feito este mesmo procedimento.

A seguir tem-se na TABELA 5 os dados referentes ao custo de estoque, o tempo de produção, o estoque inicial, o estado de preparação inicial e o lote mínimo. A linha de produção inicialmente estará preparada para produzir o item 3 em todas as instâncias.

TABELA 5 – DADOS UTILIZADOS

	Custo de estoque	Tempo de produção	Estoque inicial	Estado de preparação inicial	lote mínimo
Item 1	100	0,5	0	0	10
Item 2	100	0,2	0	0	10
Item 3	100	4	0	1	10
Item 4	100	3	0	0	10
Item 5	100	1	0	0	10
Item 6	100	2	0	0	10
Item 7	100	3	0	0	10
Item 8	100	0,4	0	0	10
Item 9	100	2	0	0	10
Item 10	100	0,4	0	0	10
Item 11	100	1	0	0	10
Item 12	100	0,4	0	0	10

Fonte: O autor (2016).

O custo de *setup* da linha de produção são mostrados na TABELA 6, e o tempo de *setup* na TABELA 7.

Primeiramente as instâncias são executadas no *Lingo*. O modelo matemático (3.2 - 3.9) foi escrito na linguagem do aplicativo, sendo que a metodologia utilizada para se obter as

soluções foi a exata. Para instâncias maiores que 5 itens o *Lingo* leva um tempo considerável para retornar uma solução exata. Em um caso de teste, o *Lingo* ficou procurando uma solução exata por 24 horas. Devido ao excesso de tempo para retornar uma solução o processo foi interrompido pelo usuário. Levando isso em conta, uma instância é processada pelo *Lingo* por um tempo máximo de 1800 segundos, sendo que ao chegar neste limite de tempo é retornada a melhor solução encontrada até o momento.

TABELA 6 – CUSTO DO *SETUP*

Itens:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Item 1	0	30	180	30	30	180	180	180	0	180	180	180
Item 2	30	0	180	30	180	0	30	30	180	180	30	180
Item 3	180	180	0	180	30	180	180	180	30	30	180	180
Item 4	30	30	180	0	30	180	180	30	30	180	30	180
Item 5	30	180	30	30	0	180	30	30	180	0	180	30
Item 6	180	0	180	180	180	0	30	180	30	180	30	180
Item 7	180	30	180	180	30	30	0	180	30	0	180	30
Item 8	180	30	180	30	30	180	180	0	180	30	180	180
Item 9	0	180	30	30	180	30	30	180	0	180	30	180
Item 10	180	180	30	180	0	180	0	30	180	0	30	180
Item 11	180	30	180	30	180	30	180	180	30	30	0	180
Item 12	180	180	180	180	30	180	30	180	180	180	180	0

Fonte: O autor (2016).

TABELA 7 – TEMPO DE *SETUP*

Itens:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Item 1	0	3	18	3	3	18	18	18	0	18	18	18
Item 2	3	0	18	3	18	0	3	3	18	18	3	18
Item 3	18	18	0	18	3	18	18	18	3	3	18	18
Item 4	3	3	18	0	3	18	18	3	3	18	3	18
Item 5	3	18	3	3	0	18	3	3	18	0	18	3
Item 6	18	0	18	18	18	0	3	18	3	18	3	18
Item 7	18	3	18	18	3	3	0	18	3	0	18	3
Item 8	18	3	18	3	3	18	18	0	18	3	18	18
Item 9	0	18	3	3	18	3	3	18	0	18	3	18
Item 10	18	18	3	18	0	18	0	3	18	0	3	18
Item 11	18	3	18	3	18	3	18	18	3	3	0	18
Item 12	18	18	18	18	3	18	3	18	18	18	18	0

Fonte: O autor (2016).

A seguir é apresentada a TABELA 8, onde pode-se observar os resultados obtidos utilizando a metodologia exata. Na primeira coluna tem-se o nome da instância, na segunda coluna o número de itens, na terceira coluna tem-se o melhor valor encontrado pelo *Lingo* até o limite de 1800 segundos e por último o tempo de processamento de cada instância. Somente nas três primeiras instâncias é possível afirmar que o valor ótimo é alcançado, nas demais é o

menor valor encontrado até os 1800 segundos. No valor da função objetivo não foi considerado o valor referente a penalização.

TABELA 8 – RESULTADOS OBTIDOS UTILIZANDO A METODOLOGIA EXATA

Instância	Nº de itens	Valor da função objetivo sem G	Tempo em segundos
1	3	134430	25
2	4	205180	46
3	5	315930	177
4	6	241430	1800
5	7	128600	1800
6	8	211230	1800
7	9	540180	1800
8	10	432730	1800
9	11	216180	1800
10	12	368330	1800

Fonte: O autor (2016).

Para validar a matheurística proposta, foi implementado o ALGORITMO 2 e elaborados os testes usando as mesmas instâncias testadas no *Lingo*. Inicialmente os dois tipos de solução inicial estavam sendo testadas, porém a solução inicial do tipo 1 não apresentou bons resultados, mesmo aumentando o número de iterações. Com isso os testes foram conduzidos usando a solução inicial do tipo 2. Para a vizinhança foram usados todos os tipos descritos na seção 4.3.3. A seguir, na TABELA 9, pode-se encontrar os valores referentes aos testes realizados.

TABELA 9 – RESULTADOS OBTIDOS UTILIZANDO A MATHEURÍSTICA

Instância	Nº de itens	Valor da função objetivo sem G	Tempo em segundos
1	3	134430	15
2	4	205180	30
3	5	315930	49
4	6	241430	43
5	7	128600	59
6	8	121430	72
7	9	314230	90
8	10	432730	289
9	11	216180	549
10	12	368330	1273

Fonte: O autor (2016).

Comparando as TABELAS 8 e 9, a primeira diferença que é observada é em relação aos tempos, sendo que a matheurística é mais rápida. A segunda diferença é em relação aos resultados obtidos, onde para as instâncias 6 e 7 a matheurística apresenta valores melhores que os obtidos pelo aplicativo *Lingo* e em um tempo menor. A seguir na TABELA 10, são comparadas as soluções obtidas pelas duas metodologias.

TABELA 10 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PELO *LINGO* E PELA MATHEURÍSTICA

Instância	Valor obtido pelo <i>Lingo</i>	Valor obtido pela matheurística	Ganho em porcentagem do tempo computacional
1	134430	134430	24 %
2	205180	205180	22 %
3	315930	315930	73 %
4	241430	241430	97 %
5	128600	128600	96 %
6	211230	121430	95 %
7	540180	314230	94 %
8	432730	432730	85 %
9	216180	216180	70 %
10	368330	368330	31 %

Fonte: O autor (2016).

Os valores das funções objetivos, são os mesmos na maioria dos casos, exceto nas instâncias 6 e 7, em que foram obtidos valores melhores. O tempo computacional da matheurística implementada foi menor em todas as instâncias testes.

Estes resultados mostram-se promissores, pois na empresa estudada o número máximo de itens produzidos mensal é de aproximadamente 12. Por este motivo esta técnica será utilizada em um caso real da empresa de confecções.

5 APLICAÇÃO DA MATHEURÍSTICA EM UM PROBLEMA REAL

Neste capítulo, será executada a matheurística proposta para solucionar um problema de planejamento da empresa de confecções estudada.

5.1 DADOS DA EMPRESA

Algumas considerações são explicadas a seguir para ajudar no entendimento. Será detalhado o significado de alguns parâmetros da empresa em questão.

O tamanho do lote mínimo é de 10 unidades para todos os itens. Considerando a política da própria empresa, não é rentável produzir menos que 10 unidades de um item. Sabendo que a empresa usa o planejamento mensal, será escolhida a capacidade semanal para o modelo. A capacidade será representada pela quantidade de minutos de trabalho disponíveis em uma semana, ou seja 2640 minutos. Usando a média obtida através dos históricos da empresa, é possível calcular o tempo de produção de cada item.

É necessário ressaltar que a empresa além de uniformes hospitalares também confecciona outros produtos, como uniformes escolares, agasalhos e pijamas para que a linha de produção não fique ociosa. Quando a linha de produção está preparada para produzir os itens referentes a uniformes hospitalares e passa a produzir outro tipo de artigo confeccionado, além da troca de fios é necessário fazer a regulagem das máquinas, pois o tecido utilizado na produção dos uniformes hospitalares é diferente do tecido utilizado para confeccionar os pijamas. Então na troca de alguns itens, existe o *setup* dependente na troca da cor do fio e o *setup* referente a regulagem das máquinas; também há dois tempos, o tempo da troca da cor do fio e o tempo de regulagem das máquinas. Se houver uma regulagem de máquina, então deve existir um *setup* e um tempo referente a troca de cor, pois não é possível regular as máquinas sem retirar os fios.

É necessário definir o que é considerado como um item. É suposto que existem 3 tipos de camisetas a serem fabricadas, uma branca de algodão, uma azul de algodão e uma amarela de malha. Considere ainda uma camisa branca de algodão. Neste caso tem-se 4 itens, há *setup* da troca de fios da camiseta branca para a azul e *setup* de troca de fios e regulagem das máquina na troca da camiseta azul para a amarela. Porém se na linha estiver sendo produzido uma camisa branca de algodão e for trocado para uma camiseta branca de algodão, não haverá *setup*, pois os estes itens usam a mesma regulagem de máquina e a mesma cor de fio.

Através de estimativas feitas na empresa o tempo de troca na cor do fio é 3 minutos e o tempo de regulagem das máquinas é 15 minutos. Então quando existe a troca na cor do fio mais a regulagem das máquinas o tempo de preparação da linha de produção é de 18 minutos e quando há somente a troca na cor do fio o tempo de preparação é de apenas 3 minutos,

lembrando que não é possível fazer a regulagem das máquinas sem trocar o fio. Existe ainda a troca de item que não resulta nem em troca da cor do fio nem em regulagem das máquinas, como em um dos exemplos citados anteriormente, então o tempo referente a troca deste tipo de item é 0 minutos e consequentemente não há custo.

É desejado que o modelo aglomere os lotes de mesma cor para minimizar a troca de cor na linha de produção, para que isto aconteça será adicionado um custo fictício a referente a troca de cor. Então o custo para fazer o ajuste na linha de produção é composto pela soma do custo da troca de cor e o custo da regulagem das máquinas. As vezes na troca de item tem-se somente o custo da troca de cor, como já foi explicado antes. Neste exemplo executado a ordem de grandeza do custo, foi considerado proporcional ao tempo gasto no *setup* correspondente.

Todas as máquinas disponíveis, serão consideradas como a linha de produção. Nesta aplicação o custo e o tempo de *setup* serão referentes a linha de produção e não referentes as máquinas.

5.2 RESOLUÇÃO DE UM PROBLEMA

Usando dados aproximados dos encontrados na empresa, foi criada um instância para simular um problema de planejamento da empresa. O número de itens diferentes que a empresa produz é de no máximo 12. Como o planejamento é mensal o número de períodos é 4. Então esta instância de simulação terá 12 itens e 4 períodos. O dados a serem usados são mostrados a seguir. Tem-se número grande $G = 10^5$. O limite da capacidade extra por período foi considerado grande pois existem muitas confecções menores que fazem a parte terceirizada.

$$C_{ext} \leq C_{max} = [4000 \quad 4000 \quad 4000 \quad 4000]$$

Os itens a serem produzidos estão na TABELA 11.

TABELA 11 – ITENS PRODUZIDOS PELA EMPRESA

Itens	Tipo	Cor	Tecido	Tamanho em cm
1	Lençol com elástico	Branco	Algodão	215 x 90
2	Lençol sem elástico	Branco	Algodão	250 x 140
3	Fronha	Branco	Algodão	50 x 70
4	Fronha	Branco	Cambráia	50 x 68
5	Lençol de transporte	Amarelo	Algodão pesado	250 x 140
6	Campo cirúrgico simples	Verde	Algodão pesado	45 x 45
7	Campo cirúrgico duplo	Verde	Algodão pesado	45 x 45
8	Campo cirúrgico duplo	Verde	Algodão pesado	90 x 60
9	Campo cirúrgico simples	Azul	Algodão pesado	45 x 45
10	Campo cirúrgico simples	Azul	Algodão pesado	90 x 90
11	Campo cirúrgico simples	Azul	Algodão pesado	120 x 100
12	Campo cirúrgico simples	Azul	Algodão pesado	180 x 160

Fonte: O autor (2016).

TABELA 12 – DEMANDAS DA EMPRESA

	Período 1	Período 2	Período 3	Período 4
Item 1	500	500	500	500
Item 2	300	500	1000	500
Item 3	500	500	1000	500
Item 4	500	500	1000	1000
Item 5	300	300	400	300
Item 6	500	200	300	600
Item 7	500	200	300	600
Item 8	500	200	300	600
Item 9	700	800	300	600
Item 10	700	800	700	1000
Item 11	700	800	700	1000
Item 12	300	500	200	500

Fonte: O autor (2016).

A demanda para os 4 períodos de cada item está na TABELA 12 .

Na TABELA 13 tem-se os dados referentes ao custo de estoque, o tempo de produção, o estoque inicial, o estado de preparação inicial e o lote mínimo.

TABELA 13 – DADOS UTILIZADOS NA EMPRESA

	Custo de estoque	Tempo de produção	Estoque inicial	Estado de preparação inicial	lote mínimo
Item 1	100	0,7	0	0	10
Item 2	100	0,5	0	0	10
Item 3	100	0,2	0	0	10
Item 4	100	0,2	0	0	10
Item 5	100	0,5	0	0	10
Item 6	100	0,2	0	0	10
Item 7	100	0,3	0	0	10
Item 8	100	0,4	0	0	10
Item 9	100	0,2	0	0	10
Item 10	100	0,4	0	1	10
Item 11	100	0,5	0	0	10
Item 12	100	0,7	0	0	10

Fonte: O autor (2016).

Na TABELA 14 os custos possui valores proporcionais ao tempo de *setup* da troca de item.

E o último dado é o tempo de *setup*, que está na TABELA 15.

Na TABELA 15 é observado que não há troca de cor nem regulagem das máquinas para os 4 primeiros itens, isto acontece pois os 4 primeiros itens usam a mesma regulagem de máquina e a mesma cor. Por exemplo, se trocar do item 2 para o item 3, essa troca não gera nem tempo e nem custo de *setup*, isso acontece em todos os blocos da matriz que tem zeros.

TABELA 14 – CUSTO DO *SETUP* DA EMPRESA

Itens:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Item 1	0	0	0	0	180	180	180	180	180	180	180	180
Item 2	0	0	0	0	180	180	180	180	180	180	180	180
Item 3	0	0	0	0	180	180	180	180	180	180	180	180
Item 4	0	0	0	0	180	180	180	180	180	180	180	180
Item 5	180	180	180	180	0	30	30	30	30	30	30	30
Item 6	180	180	180	180	30	0	0	0	30	30	30	30
Item 7	180	180	180	180	30	0	0	0	30	30	30	30
Item 8	180	180	180	180	30	0	0	0	30	30	30	30
Item 9	180	180	180	180	30	30	30	30	0	0	0	0
item 10	180	180	180	180	30	30	30	30	0	0	0	0
Item 11	180	180	180	180	30	30	30	30	0	0	0	0
Item 12	180	180	180	180	30	30	30	30	0	0	0	0

Fonte: O autor (2016).

TABELA 15 – TEMPO DE *SETUP* DA EMPRESA

Itens:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Item 1	0	0	0	0	18	18	18	18	18	18	18	18
Item 2	0	0	0	0	18	18	18	18	18	18	18	18
Item 3	0	0	0	0	18	18	18	18	18	18	18	18
Item 4	0	0	0	0	18	18	18	18	18	18	18	18
Item 5	18	18	18	18	0	3	3	3	3	3	3	3
Item 6	18	18	18	18	3	0	0	0	3	3	3	3
Item 7	18	18	18	18	3	0	0	0	3	3	3	3
Item 8	18	18	18	18	3	0	0	0	3	3	3	3
Item 9	18	18	18	18	3	3	3	3	0	0	0	0
Item 10	18	18	18	18	3	3	3	3	0	0	0	0
Item 11	18	18	18	18	3	3	3	3	0	0	0	0
Item 12	18	18	18	18	3	3	3	3	0	0	0	0

Fonte: O autor (2016).

Nota-se que se houver a troca do item 2 para o item 12, então é necessário fazer a regulagem nas máquinas e trocar a cor da linha de produção gerando um *setup* de 18 minutos. No entanto, se houver a troca do item 10 para o item 5, então só é preciso trocar a cor da linha de produção, pois a regulagem das máquinas é a mesma para estes dois itens gerando assim um *setup* de 3 minutos.

Primeiramente, foi executado o modelo exato no aplicativo *Lingo* para se obter um resultado como referência. A instância foi processada pelo aplicativo durante 10800 segundos, ou seja 3 horas, após este tempo o valor obtido para a função objetivo é de 170279 unidades monetárias. O tempo de processamento da instância é maior do que o tempo utilizado nos testes a fim de obter uma melhor resposta.

Observando a TABELA 14 de custo de *setup*, é possível notar que se fosse gerado um sequenciamento usando a solução inicial do tipo 1, ou seja, a sequência para o primeiro período

seria 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 - 10 - 11 - 12, essa solução já seria uma boa solução. Pois os itens 1, 2, 3 e 4, que são da cor branca estariam aglomerados, os itens 6, 7 e 8 que são da cor verde também estariam aglomerados e por fim os itens da cor azul 9, 10, 11 e 12. Está seria uma boa solução pois os itens da mesma cor já estariam em sequência para serem produzidos pela linha de produção. Com isso, para este teste foi usado a solução inicial do tipo 1, pois em uma análise preliminar apresentou melhores resultados para este conjunto de dados.

Na busca tabu o critério de parada foi de 100 iterações. O número de elementos da vizinhança foram 9, pois é múltiplo de 3, já que tem-se 3 maneiras de gerar a vizinhança (seção 4.3.3), então em cada iteração 9 vizinhos são gerados. E por fim, a lista tabu tem valor 10, ou seja, um movimento fica bloqueado por 10 iterações, se não atender o critério de aspiração. Ao executar o ALGORITMO 2, para a função objetivo foi encontrado o valor de 93419 em unidades monetárias. Interpretando os resultados um sequenciamento foi gerado e o dimensionamento foi definido.

A matriz de quantidade está resumida na TABELA 16, onde nota-se que no conjunto de restrições (4.7) a matriz que representa as quantidades produzidas é pertencente aos conjunto dos números reais (Arenales, Armentano e Morabito (2007)), então é previsto ter números decimais.

TABELA 16 – QUANTIDADES PRODUZIDAS

	Período 1	Período 2	Período 3	Período 4
Item 1	535,7	464,3	794,3	205,7
Item 2	300	500	1000	500
Item 3	500	500	1000	500
Item 4	500	500	1000	1000
Item 5	300	300	400	300
Item 6	500	200	300	600
Item 7	500	200	300	600
Item 8	500	200	300	600
Item 9	700	800	300	600
Item 10	700	800	700	1000
Item 11	700	800	700	1000
Item 12	300	897,2	0	302,8

Fonte: O autor (2016).

Na TABELA 17 que representa os estoques, houve estoque do item 1 no primeiro período, do item 12 no segundo período e dos item 1 e 12 no terceiro período. Ao calcular a demanda multiplicada pelo valor correspondente ao tempo de produção, sem contar os tempos de *setup*, é verificado que somente no quarto período não há capacidade disponível para produzir todos os itens no período. Então foi melhor estocar estes itens para atender a demanda, do que usar a capacidade extra para produzi-lo.

As matrizes z e y serão omitidas, pois são muito grandes. A interpretação do resultado

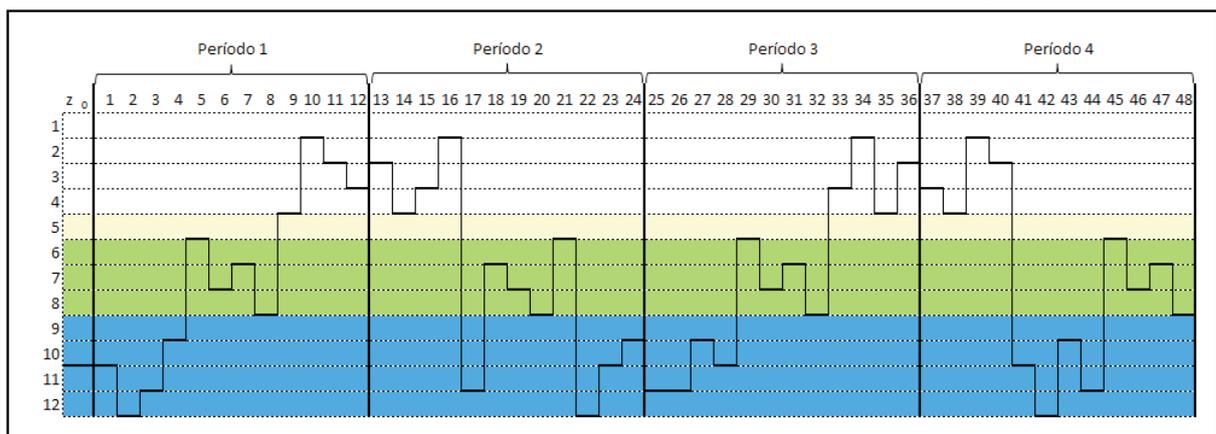
TABELA 17 – ESTOQUES

	Período 1	Período 2	Período 3	Período 4
Item 1	35,7	0	294,3	0
Item 2	0	0	0	0
Item 3	0	0	0	0
Item 4	0	0	0	0
Item 5	0	0	0	0
Item 6	0	0	0	0
Item 7	0	0	0	0
Item 8	0	0	0	0
Item 9	0	0	0	0
Item 10	0	0	0	0
Item 11	0	0	0	0
Item 12	0	397,2	197,2	0

Fonte: O autor (2016).

delas será representado pela FIGURA 11.

FIGURA 11 – SEQUENCIAMENTO DA LINHA DE PRODUÇÃO



Fonte: O autor (2016).

O sequenciamento se inicia com o item 10 que é o estado inicial de preparação da linha de produção, na posição 1 do primeiro período há a produção do item 10. A troca do item 10 para o item 12, não gera tempo de *setup*, e a troca do item 12 para o 11 também não. Então é produzido o item 12 e 11, depois há a troca do item 11 para o item 9 que também não possui tempo de *setup*, assim o item 9 é produzido. Desta maneira o sequenciamento continua a ser interpretado dessa forma.

Ao observar a TABELA 14, é possível notar que há blocos em que a troca de itens não tem tempo de *setup*, por isso que ao comparar com a FIGURA 11 é possível notar que os itens da mesma cor se aglomeram. Por exemplo, no primeiro período a sequência gerada é : 10 - 12 - 11 - 9, que são da mesma cor, depois há a produção do item 5 que é da cor amarela feito de algodão pesado. Os próximos itens da sequência são 7 - 6 - 8 que são da cor verde, e o 4 - 1 - 2 - 3 que são da cor branca. Na passagem do período 1 para o período 2, a preparação do

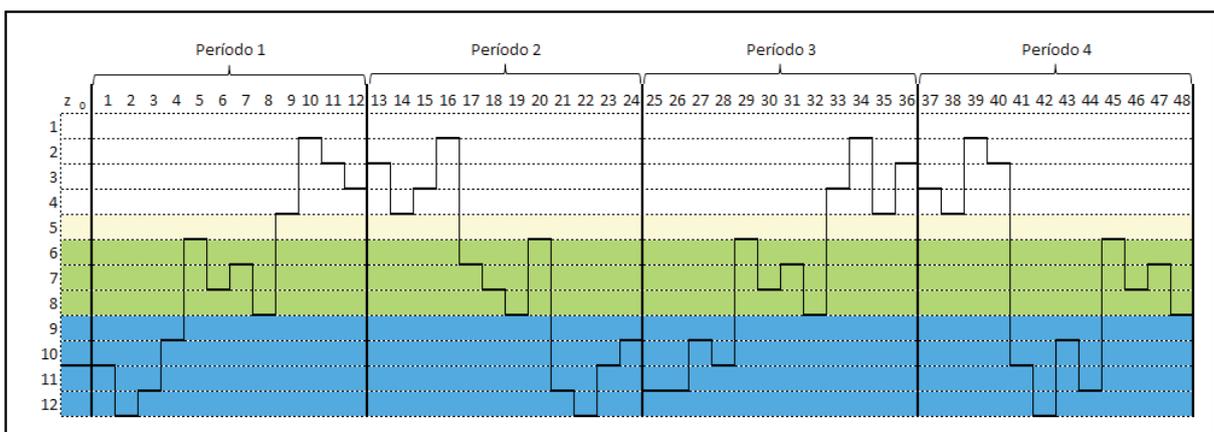
item 3 não é mantida, mas há a troca do item 3 para o item 2 que não há tempo de *setup*, pois são do mesmo material e da mesma cor. Observando o período 3, nota-se que o item 12 não foi produzido, pois há o estoque dele no período 2.

Na troca de períodos, sempre é mantida a mesma cor do período anterior. Por exemplo, no final do período 1 os itens da cor branca estavam sendo produzidos, então o segundo período se inicia com os itens da cor branca. O fim do segundo período tem-se a produção dos itens da cor azul, então o período 3 se inicia com a produção dos itens desta cor. No final do período 3, são produzidos os itens da cor branca, e o período 4 se inicia com a produção dos itens da cor branca.

Nota-se que este sequenciamento não é o ótimo, apesar de ser um bom sequenciamento. Por exemplo, no período 2 o sequenciamento é : 2 - 4 - 3 - 1 - 11 - 6 - 7 - 8 - 5 - 12 - 10 - 9. Nota-se que o primeiro bloco de cor é o branco depois há a troca do item 1 para o item 11, onde a cor é o azul. Há a troca do item 11 para o item 6, que a cor é verde, e no final do período os outros itens da cor azul são produzidos. Esta parte do sequenciamento, foi a única que teve uma divisão dos itens da mesma cor, em todo o resto os itens da mesma cor foram aglomerados para ser produzidos em sequência.

Estes resultados serão utilizados como apoio a decisão e pequenos ajustes podem ser feitos com a ajuda dos coordenadores da linha de produção. Por exemplo, no segundo período uma melhora na solução seria trocar a sequência de 2 - 4 - 3 - 1 - **11** - **6** - **7** - **8** - **5** - 12 - 10 - 9 pela sequência 2 - 4 - 3 - 1 - **6** - **7** - **8** - **5** - **11** - 12 - 10 - 9. Com isso todos os itens da mesma cor estariam aglomerados. Esta melhoria na sequência pode ser observada na FIGURA 12. A pequena alteração na sequência resultaria em uma função objetivo de 92960 unidades monetárias.

FIGURA 12 – SEQUENCIAMENTO DA LINHA DE PRODUÇÃO



Fonte: O autor (2016).

Nesta nova sequência, pode-se observar que todos os itens da mesma cor estão aglomerados, na mudança de períodos a cor do período anterior é mantida na linha de produção.

Para o conjunto de dados que foi gerado a solução, possivelmente deve ter soluções múltiplas, e talvez essa solução não seja ótima. Comparando os resultados obtidos pelo *Lingo* e os encontrados pela matheurística proposta, é possível afirmar que as soluções encontradas foram muito satisfatórias. Pois a matheurística gerou um sequenciamento com a função objetivo de valor menor do que a obtida pelo *Lingo*.

Como as matrizes z e y são grandes foi observado que o *Matlab* começa a apresentar uma certa lentidão para executar a busca tabu. Para quantidade maiores de dados, talvez seja melhor escolher uma outra linguagem de programação.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho iniciou-se com o estudo dos modelos de planejamento de lotes. A grande aplicabilidade dos modelos de planejamento, motivou um estudo sobre uma das aplicações. Devido a familiaridade da autora com as empresas de confecções, foi sugerido um modelo de planejamento que ajudasse nas tomadas de decisões.

O modelo matemático proposto, simulou uma parte do planejamento da empresa de confecções. Porém era preciso um método para encontrar boas soluções. O modelo proposto foi adaptado para ser usado no *Lingo* para encontrar soluções exatas. Alguns testes foram feitos e foi observado que para problemas maiores que 5 itens o *Lingo* demora muito tempo para encontrar soluções exatas, em alguns casos ele ficou processando uma instancia por 24 horas não resultando em um valor ótimo. Por isso, foi usado como referência o melhor resultado obtido em 1800 segundos nos testes realizados.

Para encontrar boas soluções foi proposto um método híbrido conhecido como matheurística, que usa busca tabu e a metodologia exata. A busca tabu é responsável por gerar os valores das variáveis binárias, que representam a preparação e o *setup* da linha de produção, e a metodologia exata encontra os valores das variáveis contínuas, que representam a quantidade produzida, o estoque e a capacidade extra. Alguns testes foram feitos para validar a matheurística proposta.

A matheurística resolveu o problema proposto e em alguns casos encontrou valores menores do que os obtidos pelo *Lingo*. O tempo que a matheurística leva para encontrar boas soluções é satisfatório pois o modelo proposto trata de um planejamento mensal, então considerar o tempo de 1 hora para se ter um planejamento mensal torna-se atrativo.

O modelo proposto foi aplicado em uma empresa de confecções. Para gerar boas soluções para o modelo, foi executado a matheurística, e para comparar os resultados obtidos o modelo foi executado pelo *Lingo*. A matheurística gerou um sequenciamento para a linha de produção que aglomera os itens de mesma cor, com isso reduzindo os custos de *setup*. Esta aplicação foi motivada pelo conhecimento na área, mas a proposta pode ser adaptada para outras empresas, inclusive de outras áreas.

O objetivo geral foi alcançado com a adaptação de um modelo clássico da literatura e a adaptação da busca tabu que usa a metodologia exata para encontrar boas soluções. Um dos objetivos específicos é a revisão da literatura, onde os modelos clássicos são analisados. Há também um estudo sobre as metodologias que são usadas para encontrar as soluções destes modelos. E por fim uma aplicação do modelo foi feita e usou-se a metodologia proposta para encontrar boas soluções.

Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se testar outras formas de busca de

soluções iniciais, bem como ampliar o modelo matemático para gerar o sequenciamento dos lotes nas máquinas. E ainda estudar outros métodos híbridos para gerar soluções.

REFERÊNCIAS

- ABIT. **Agenda de Prioridades Têxtil e Confecção**. [S.l.], 2015. Disponível em: <http://www.abit.org.br/conteudo/links/publicacoes/agenda_site.pdf>. Acesso em: 17.2.2016.
- ABIT. **O Poder da moda: cenários, desafios e perspectivas**. [S.l.], 2015. Disponível em: <<http://www.abit.org.br/adm/Arquivo/Publicacao/120429.pdf>>. Acesso em: 17.2.2016.
- ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R. **Pesquisa operacional: para cursos de engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.
- BAHL, H. C.; RITZMAN, L. P.; GUPTA, J. N. Determining lot sizes and resource requirements: A review. **Operations Research**, INFORMS, v. 35, n. 3, p. 329–345, 1987.
- BAUMGARTNER, L.; SCHMID, V.; BLUM, C. Solving the two-dimensional bin packing problem with a probabilistic multi-start heuristic. **LION**, p. 76–90, 2011.
- BELVAUX, G.; WOLSEY, L. A. Bc—prod: a specialized branch-and-cut system for lot-sizing problems. **Management Science**, INFORMS, v. 46, n. 5, p. 724–738, 2000.
- BLUM, C.; ROLI, A. Hybrid metaheuristics: an introduction. **Hybrid Metaheuristics**, Springer, p. 1–30, 2008.
- BOSCHETTI, M.; MANIEZZO, V. Benders decomposition, lagrangean relaxation and metaheuristic design. **Journal of Heuristics**, Springer, v. 15, n. 3, p. 283–312, 2009.
- BOSCHETTI, M. A. et al. Matheuristics: optimization, simulation and control. **Hybrid metaheuristics**, Springer, p. 171–177, 2009.
- BRAHIMI, N.; DAUZERE-PERES, S.; NAJID, N. Single item lot sizing problems. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 168, n. 1, p. 1–16, 2006.
- DREXL, A.; KIMMS, A. Lot sizing and scheduling—survey and extensions. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 99, n. 2, p. 221–235, 1997.
- GLOVER, F. Tabu search—part i. **ORSA Journal on computing**, INFORMS, v. 1, n. 3, p. 190–206, 1989.
- GLOVER, F. Tabu search—part ii. **ORSA Journal on computing**, INFORMS, v. 2, n. 1, p. 4–32, 1990.
- GU, H. Planning lot sizes and capacity requirements in a single stage production system. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 31, n. 2, p. 223–231, 1987.
- GUPTA, D.; MAGNUSSON, T. The capacitated lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent setup costs and setup times. **Computers & Operations Research**, Elsevier, v. 32, n. 4, p. 727–747, 2005.
- HANSEN, P.; MLADENOVIĆ, N.; PÉREZ, J. A. M. Variable neighbourhood search: methods and applications. **4OR**, Springer, v. 6, n. 4, p. 319–360, 2008.

HINDI, K. S. Solving the single-item, capacitated dynamic lot-sizing problem with startup and reservation costs by tabu search. **Computers & Industrial Engineering**, Elsevier, v. 28, n. 4, p. 701–707, 1995.

JANS, R.; DEGRAEVE, Z. Meta-heuristics for dynamic lot sizing: A review and comparison of solution approaches. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 177, n. 3, p. 1855–1875, 2007.

KARIMI, B.; GHOMI, S. F.; WILSON, J. The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms. **Omega**, Elsevier, v. 31, n. 5, p. 365–378, 2003.

KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D. et al. Optimization by simulated annealing. **science**, World Scientific, v. 220, n. 4598, p. 671–680, 1983.

KUIK, R.; SALOMON, M. Multi-level lot-sizing problem: Evaluation of a simulated-annealing heuristic. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 45, n. 1, p. 25–37, 1990.

KUIK, R.; SALOMON, M.; WASSENHOVE, L. N. V. Batching decisions: structure and models. **European journal of operational research**, Elsevier, v. 75, n. 2, p. 243–263, 1994.

LAND, A. H.; DOIG, A. G. An automatic method of solving discrete programming problems. **Econometrica: Journal of the Econometric Society**, JSTOR, p. 497–520, 1960.

MAES, J.; WASSENHOVE, L. V. Multi-item single-level capacitated dynamic lot-sizing heuristics: A general review. **Journal of the Operational Research Society**, JSTOR, p. 991–1004, 1988.

MEYR, H. Simultaneous lotsizing and scheduling by combining local search with dual reoptimization. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 120, n. 2, p. 311–326, 2000.

MICHALEWICZ, Z.; FOGEL, D. B. **How to solve it: modern heuristics**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2013.

OBAL, T. M. Desenvolvimento e avaliação de matheurísticas para o combinado problema do posicionamento dos feixes e distribuição de dose no planejamento de radioterapia. PPGMNE, UFPR, 2016.

PATTLOCH, M.; SCHMIDT, G.; KOVALYOV, M. Y. Heuristic algorithms for lotsize scheduling with application in the tobacco industry. **Computers & industrial engineering**, Elsevier, v. 39, n. 3, p. 235–253, 2001.

POCHET, Y.; WOLSEY, L. A. **Production planning by mixed integer programming**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2006.

PONNAMBALAM, S.; REDDY, M. A ga-sa multiobjective hybrid search algorithm for integrating lot sizing and sequencing in flow-line scheduling. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, v. 21, n. 2, p. 126–137, 2003.

SEBRAE/SP. **O desempenho das MPEs no setor têxtil-confecção**. [S.l.], 2001. Disponível em: <http://www.sebraesp.com.br/arquivos_site/biblioteca/EstudosPesquisas/estudos_setoriais/textil_confeccao.pdf>. Acesso em: 27.2.2016.

- SIKORA, R. A genetic algorithm for integrating lot-sizing and sequencing in scheduling a capacitated flow line. **Computers & Industrial Engineering**, Elsevier, v. 30, n. 4, p. 969–981, 1996.
- SILVA, C.; MAGALHAES, J. M. Heuristic lot size scheduling on unrelated parallel machines with applications in the textile industry. **Computers & Industrial Engineering**, Elsevier, v. 50, n. 1, p. 76–89, 2006.
- SILVA, J. R.; VOLPI, N. M. P. Busca tabu com greedy-mod aplicado ao problema geral de dimensionamento e programação de lotes. **Simpósio de Engenharia de Produção, SIMPEP, XXII**, 2015.
- SOLNON, C.; FENET, S. A study of aco capabilities for solving the maximum clique problem. **Journal of Heuristics**, Springer, v. 12, n. 3, p. 155–180, 2006.
- TANG, O. Simulated annealing in lot sizing problems. **International Journal of Production Economics**, Elsevier, v. 88, n. 2, p. 173–181, 2004.
- TONI, A. D.; MENEGHETTI, A. The production planning process for a network of firms in the textile-apparel industry. **International Journal of Production Economics**, Elsevier, v. 65, n. 1, p. 17–32, 2000.
- TRIGEIRO, W. W. A simple heuristic for lot sizing with setup times. **Decision Sciences**, Wiley Online Library, v. 20, n. 2, p. 294–303, 1989.
- ULBRICHT, G. Um modelo de planejamento da produção multiestágio com estoque intermediários limitados. PPGMNE, UFPR, 2015.
- WOLSEY, L. A. Progress with single-item lot-sizing. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 86, n. 3, p. 395–401, 1995.