

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

Estratégias para a Programação da Produção em Ambientes com
Capacidade Flexível Controlados pelo Sistema PBC

FÁBIO MOLINA DA SILVA

SÃO CARLOS

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Estratégias para a Programação da Produção em Ambientes com
Capacidade Flexível Controlados pelo Sistema PBC

FÁBIO MOLINA DA SILVA

Tese apresentada ao programa de Pós-graduação
Graduação em Engenharia de Produção para obtenção
do título de doutor em Engenharia de Produção.

Orientação: Prof. Dr. Roberto F. Tavares Neto

Co-orientação: Prof. Dr. Flávio C. Faria Fernandes

SÃO CARLOS

2014

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária/UFSCar**

S586ep

Silva, Fábio Molina da.

Estratégias para a programação da produção em ambientes com capacidade flexível controlados pelo sistema PBC / Fábio Molina da Silva. -- São Carlos : UFSCar, 2014. 100 f.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2014.

1. Programação da produção. 2. PBC. 3. Planejamento e controle da produção. 4. Programa mestre de produção. 5. Manufatura responsiva. I. Título.

CDD: 658.53 (20^a)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a defesa de tese de Doutor em Engenharia de Produção do candidato Fábio Molina da Silva, realizada em 05/12/2014:

Roberto F. L. Neto

Prof. Dr. Roberto Fernandes Tavares Neto
UFSCar

Marcelo Seido Nagano

Prof. Dr. Marcelo Seido Nagano
USP

Paulo R. P. L.

Prof. Dr. Paulo Rogerio Politano
UFSCar

Silvio Roberto Ignácio Pires

Prof. Dr. Silvio Roberto Ignácio Pires
UNIMEP

Fernando Bernardi de Souza

Prof. Dr. Fernando Bernardi de Souza
UNESP

Dedicatória

Dedico este trabalho, com todo amor
e carinho, aos meus filhos, Mel Prates

Molina e Caio Dias Molina

Agradecimentos

A Deus, por ter permitido, assistido e assegurado a conclusão de mais uma etapa.

Aos meus orientadores e amigos, Prof. Dr. Roberto Fernandes Tavares Neto e Prof. Dr. Flávio César Faria Fernandes, por toda compreensão e dedicação na orientação deste trabalho e pelos ensinamentos que transcendem o escopo deste trabalho.

Aos meus pais, João e Solangela, ao meu irmão Flávio e sua esposa Priscila, e à minha esposa Bia, que com paciência e carinho, me apoiaram nesta etapa.

Aos professores Dr. Fernando Bernardi de Souza, Dr. Silvio Roberto Ignacio Pires, Dr. Marcelo Seido Nagano e Dr. Paulo R. Politano pelas importantes contribuições ao trabalho.

Ao professor e amigo, Dr. Néocles Alves Pereira pelo imprescindível apoio pessoal e contribuição neste trabalho.

Aos docentes do DEP/UFSCar pelo apoio, ensinamentos e companheirismo.

Aos secretários do DEP/UFSCar pela paciência e fundamental ajuda na execução deste trabalho.

A todos os demais que de alguma forma contribuíram para que este projeto se realizasse.

Resumo

O sistema PBC é conhecido como um sistema de controle da produção que sincroniza periodicamente o fluxo de materiais no chão de fábrica. O PBC tem a característica de possuir *lead-time* de produção constante e planejado, política de dimensionamento de lote conforme o mínimo necessário e frequência estável na liberação de ordens. Uma revisão exaustiva da literatura, apresentada neste trabalho, mostrou que não existem relatos do uso do PBC em ambientes onde a capacidade produtiva não é constante, uma realidade que se apresenta às empresas com a adoção de políticas de banco de horas (que permitem a transferência de capacidade produtiva entre diferentes períodos) e funcionários polivalentes (que permitem a transferência de capacidade produtiva entre diferentes centros de trabalho). O presente trabalho define formalmente esse problema, usando técnicas de programação matemática, e propõe um conjunto de heurísticas para resolvê-lo. Após a aplicação dos modelos e heurísticas em um conjunto de casos de teste, mostra-se que as heurísticas propostas são eficazes para a resolução do problema, sendo estratégias viáveis para a implementação do PBC em ambientes de manufatura com capacidade variável.

Palavras-chave: Planejamento e Controle da Produção; *Period Batch Control*; *Iterated Greedy*; Programação da Produção com Capacidade Flexível;

Abstract

The PBC System is a well-known Ordering System that periodically synchronizes the material flow of the shop floor. The PBC has the property of constant and planned production *lead-time*, a policy of minimal lot sizing and a constant frequency on order releasing. An exhaustive literature review presented in this thesis has shown that work uses PBC when the production capacity is not constant. This is a reality presented in companies where compensatory times off allows the capacity be transfer between time stamps and employees that can work on diferente positions, allowing the capacity to be managed from one working center to another. This work formally defines those issues using mathematical programming, and defines a set of heuristics to solve it. After the application of the models and heuristics to a set of instances, one can note that the heuristics are eficiente to solve the problem, and the strategy of using PBC is very successful in the studied environment (production system with variable capacity).

Key words: Production Planning Control; Production Control; Period Batch Control; Iterated Greedy; Manufacturing Environments With Variable Capacity.

Lista de Figuras

FIGURA 1: ESQUEMA DO SISTEMA PBC	6
FIGURA 2: ESQUEMAS DE DECISÕES DE CONTROLE DA PRODUÇÃO	10
FIGURA 3- MÉTODO DE PESQUISA	14
FIGURA 4: FLUXO DE MATERIAIS NO SISTEMA DE PRODUÇÃO	17
FIGURA 5: MODELO ESTRUTURAL DO PCP	20
FIGURA 6: ESTRUTURA LÓGICA DO FUNCIONAMENTO DO PBC NA INDÚSTRIA DE CALÇADOS	33
FIGURA 7: PROCESSO TÍPICO DE UMA FUNDIÇÃO DE MERCADO	47
FIGURA 8: FUNCIONAMENTO DO SISTEMA PBC EM FUNDIÇÕES DE MERCADO	47
FIGURA 9- PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO UTILIZANDO O PBC	60
FIGURA 10- ANÁLISE DA EXECUÇÃO DAS HEURÍSTICAS DO PROBLEMA 1	79
FIGURA 11- COMPARAÇÃO ENTRE OS ALGORITMOS PARA O PROBLEMA 1 EM TERMOS DE ATRASO TOTAL	80
FIGURA 12- COMPARAÇÃO ENTRE OS ALGORÍTMOS H1D E H1F	81
FIGURA 13- ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO ALGORITMO CONFORME OS TAMANHOS DOS CASOS DE TESTE (H1D)	82
FIGURA 14 -ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO ALGORITMO CONFORME OS TAMANHOS DOS CASOS DE TESTE (H1F)	82
FIGURA 15-DESEMPENHO DO ALGORITMO H2F1	83
FIGURA 16- COMPARAÇÃO ENTRE ALGORÍTMOS H1D, H1F E H2F1	84
FIGURA 17- RESULTADO DO ALGORITMO H3F1 COMPARADO AO MODELO MATEMÁTICO	85

Lista de Tabelas

TABELA 1: AGRUPAMENTO DOS TRABALHOS POR DECÊNIO	53
TABELA 2: ESTRATIFICAÇÃO POR CONTEXTO DO ARTIGO	54
TABELA 3- ANÁLISE DAS HEURÍSTICAS PARA O PROBLEMA 1 - MÉDIA E DESVIO PADRÃO.....	78

Lista de Quadros

QUADRO 1: EFEITOS POSITIVOS DE ESCOLHA DE NÚMERO DE ESTÁGIOS E TAMANHO DO PERÍODO	40
QUADRO 2: ESQUEMA DA DISTRIBUIÇÃO DOS TEMPOS DE PROCESSAMENTO NO SPBC	42
QUADRO 3: ESTRATIFICAÇÃO DAS BIBLIOGRAFIAS PBC	51
QUADRO 4- HEURÍSTICAS ITERATED GREEDY PARA O PROBLEMA COM CAPACIDADE CONSTANTE	68
QUADRO 5- PARÂMETROS E ESPECIFICAÇÕES DOS CASOS DE TESTE	76
QUADRO 6- TESTE DOS PARÂMETROS DAS HEURÍSTICAS.....	78

Lista de Siglas, símbolos e abreviaturas

CP	Controle da Produção
GA	<i>Genetic Algorithms</i>
H1A	Heurística A para a alternativa com capacidade constante
H1B	Heurística B para a alternativa com capacidade constante
H1C	Heurística C para a alternativa com capacidade constante
H1D	Heurística D para a alternativa com capacidade constante
H1E	Heurística E para a alternativa com capacidade constante
H1F	Heurística F para a alternativa com capacidade constante
H1G	Heurística G para a alternativa com capacidade constante
H2F1	Heurística para a alternativa com capacidade variável por polivalência de funcionários
H3F1	Heurística para a alternativa com capacidade variável por utilização de banco de horas
MIP1	Modelo de Programação Matemática para a alternativa com capacidade constante
MIP2	Modelo de Programação Matemática para a alternativa com capacidade variável por polivalência de funcionários
MIP3	Modelo de Programação Matemática para a alternativa com capacidade variável por banco-de-horas
MPS	<i>Master Production Planning</i>
MR	Manufatura Responsiva
MRP	<i>Material Requirements Planning</i>
MRP II	<i>Manufacturing Resources Planning</i>
OSs	<i>Ordering Systems</i>
PA	Planejamento Agregado
PBC	<i>Period Batch Control</i>
PCP	Planejamento e Controle da Produção
PMP	Programa Mestre de Produção

PO	Programação de Operações
PP	Planejamento da Produção
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
SBC	<i>Standard Batch Control</i>
SCOs	Sistema de Coordenação de Ordens

SUMÁRIO

RESUMO	I
ABSTRACT	II
LISTA DE FIGURAS	III
LISTA DE TABELAS	IV
LISTA DE QUADROS	V
LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	VI
SUMÁRIO	VIII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. PROBLEMA DE PESQUISA E OBJETIVOS DO TRABALHO	8
1.2. MÉTODO DE PESQUISA	10
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1. CONCEITOS DE PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO.....	16
2.1.1. ESTRUTURA DO PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO.....	16
2.1.2. SISTEMAS DE COORDENAÇÃO DE ORDENS	22
2.1.3. SISTEMA DE COORDENAÇÃO DE ORDENS PBC.....	25
2.1.4. PROPOSTAS DE MELHORIAS	35
2.1.5. APLICAÇÕES E RECOMENDAÇÕES DO SISTEMA PBC.....	43
2.1.6. ANÁLISES E SÍNTESE DOS TRABALHOS SOB PBC	49
2.2. A TÉCNICA <i>ITERATED GREEDY</i>	55
3 PROPOSTA DE MODELOS DE PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO PARA	
AMBIENTES DE MANUFATURA CONTROLADOS PELO SCOS PBC E CAPACIDADE	
VARIÁVEL	59

3.1.	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	59
3.2.	SÍMBOLOS UTILIZADOS.....	60
3.2.1.	<i>Índices</i>	61
3.2.2.	<i>Parâmetros</i>	61
3.2.3.	<i>Variáveis Positivas</i>	61
3.2.4.	<i>Variáveis Binárias</i>	62
3.2.5.	<i>Variáveis inteiras</i>	62
3.3.	O PROBLEMA COM CAPACIDADE CONSTANTE.....	62
3.3.1.	<i>O modelo de programação linear mista MIP1</i>	62
3.3.2.	<i>Heurísticas desenvolvidas para resolver o problema</i>	64
3.3.2.1.	<i>Algoritmo Heurístico EDD Modificado</i>	64
3.4.	O PROBLEMA COM CAPACIDADE FLEXÍVEL	68
3.4.1.	<i>O problema com capacidade considerando polivalência de funcionários</i>	68
3.4.1.1.	<i>O modelo de programação linear mista MIP2</i>	69
3.4.1.2.	<i>A heurística utilizada para resolver o problema considerando mão de obra polivalente</i>	70
3.4.2.	<i>O problema utilizando banco de horas</i>	71
3.4.2.1.	<i>Modelo matemático iterativo: MIP3</i>	72
3.4.2.2.	<i>A heurística utilizada para resolver o problema considerando banco de horas</i>	74
3.5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
4	RESULTADOS OBTIDOS	76
5.1.	INTRODUÇÃO.....	76
5.2.	ANÁLISES PARA O PROBLEMA 1	77
5.3.	ANÁLISES REALIZADAS PARA O PROBLEMA.....	83
5.4.	ANÁLISES REALIZADAS PARA O PROBLEMA 3	84
5.5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	85

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

1. Introdução

Na busca pela satisfação das exigências dos clientes, as empresas estão em constante movimento de reestruturação de seus processos produtivos para se manterem ou se tornarem competitivas no mercado. A satisfação dos clientes é uma tarefa amplamente dinâmica e complexa, composto por vários elementos interconectados, como exemplo, atendimento das necessidades, qualidade, custos, inovação, satisfação pessoal, serviços etc. Em virtude das exigências dos clientes, os sistemas produtivos orientados à produção do início do século XX declinaram aos sistemas orientados ao mercado.

Os sistemas orientados ao mercado priorizam os objetivos estratégicos conforme as expectativas de clientes mais exigentes. A literatura (e.g., Corrêa et al. (2007), Sipper e Bulfin (1998), Fernandes e MacCarthy (1999), Pires (2004), Slack et al. (2009)) indica que um conjunto desses objetivos são apoiados pela manufatura, como por exemplo, atendimento dos prazos de entrega, rapidez nas entregas, custo percebido pelo cliente, qualidade, flexibilidade no *mix* de produção, flexibilidade no volume de produção etc. Por conseguinte, as empresas têm almejado a implementação/adaptação de novos paradigmas estratégicos de produção que comportem seus objetivos estratégicos de manufatura.

Em relação aos paradigmas estratégicos de manufatura, Fernandes e MacCarthy (1999) e Godinho Filho e Fernandes (2005), relatam que os sistemas de manufatura incorporam cada vez mais objetivos estratégicos, como por exemplo: i) paradigma de Produção em Massa (também referenciado como *Produção Repetitiva*), onde o objetivo estratégico da manufatura é custo; ii) Manufatura Enxuta, tem como objetivos estratégicos a qualidade e custo; iii) Manufatura Responsiva (MR), cujos objetivos estratégicos são velocidade, flexibilidade (diversidade), pontualidade,

qualidade e custo; e por fim, iv) Manufatura Ágil, que além dos objetivos incorporados pela MR inclui nível de automação alto e adaptabilidade (personalização). Entre os paradigmas citados, esta tese se contextualiza na MR.

A MR, desdobramento da Estratégica de Competição Baseada no Tempo (STALK; HOUT, 1990), é um paradigma de manufatura que incorpora em suas decisões os objetivos estratégicos relacionados ao tempo (rapidez e pontualidade), variedade (diversificação e distinção) e custos ((KRITCHANCHAI; MACCARTHY, 1998); (FERNANDES; MACCARTHY, 1999)). Blackburn (1991) cita que a MR deve implementar uma série de métodos destinados a reduzir o tempo de resposta aos clientes. Conforme Godinho Filho (2004), um dos capacitadores da MR é a adoção de tecnologia de informação direcionada à integração das etapas produtivas e melhor aproveitamento dos recursos. Em virtude da alta variedade de produtos e, conseqüentemente, elevado volume de informação, a utilização de tecnologia de informação é ponto crucial para o processo decisório e diferencial em relação aos outros paradigmas de manufatura que trabalham com baixa variedade de produtos.

Todos os sistemas de manufatura são formados por diversos componentes/áreas. Entre as áreas que compõem o sistema de manufatura, o presente trabalho concentra-se no Planejamento e Controle da Produção (PCP). Conforme Slack et al. (2009), o PCP é responsável por conciliar a oferta e a demanda dos sistemas produtivos. Para Corrêa et al. (2007), o PCP influencia diretamente os principais objetivos estratégicos da manufatura. Dessa forma, atribui-se ao PCP significativa participação de competência à implementação da MR.

Com o objetivo de esclarecer a extensão do PCP, entende-se que ele pode ser decomposto em atividades sob as decisões hierarquizadas em relação ao horizonte de tempo e detalhamento em: i) Planejamento Agregado (PA); ii) Programa

Mestre de Produção (PMP); iii) Sistema de Coordenação de Ordens (SCOs) e iv) Programação de Operações (PO).

O PA tem o objetivo de realizar decisões de longo/médio prazo respondendo, de forma agregada, as questões: i) quanto produzir; ii) o que produzir; iii) quando produzir e iv) onde produzir. As respostas destas questões subsidiam decisões das funções de finanças, vendas e produção. Além disso, Corrêa et al. (2007) alegam que o PA representa a tradução das expectativas da alta gerência sobre a manufatura e que este colabora com o alinhamento estratégico com as demais funções organizacionais.

O PMP tem tem por objetivo estabelecer quais produtos finais e em quais quantidades serão fabricados em um determinado período de tempo (FERNANDES; GODINHO FILHO, 2010). A elaboração do PMP está relacionada com o tipo de resposta à demanda que o sistema produtivo adota, por exemplo: i) *make-to-stock* (fazer para estoque), ii) *make-to-order* (fazer contra pedido), iii) *assembly-to-order* (montagem contra pedido). No caso do *make-to-stock* o PMP é elaborado a partir de previsões de demanda; para o ambiente *make-to-order* o PMP é predominantemente elaborado sob a carteira de pedidos e para o *assembly-to-order* existe a necessidade de dois PMPs, um para a programação dos componentes para estoque e outro, para a montagem dos itens finais (FERNANDES e GODINHO FILHO, 2010; SLACK et al, 2009). O termo correspondente ao PMP na língua inglesa é *Master Production Scheduling* (MPS) muito utilizado devido a popularização dos sistemas de informações gerenciais da produção. Esta tese adota a sigla MPS como padrão.

Os SCOs destacam-se como processo de transformação das decisões estabelecidas no âmbito do MPS em ordens de produção de componentes e ordens de

compras e liberação/programação das ordens para produção e compra. Na revisão bibliográfica são detalhados os demais objetivos de responsabilidades dos SCOs.

A PO, também conhecida como programação de tarefas ou programação de operações, é o processo de sequenciar, escolher e alocar os recursos para fazer todas as operações necessárias das ordens de produção. Não se pode olvidar que este processo considera a otimização de um ou um conjunto de critérios, sujeito a um conjunto de restrições. Esta tese utilizará a palavra inglesa *scheduling* como sinônimo de PO por ser um termo aceito pela literatura.

Mais detalhes destas atividades de PCP estão apresentadas na revisão bibliográfica. Entretanto, é oportuno enfatizar que entre as atividades/componentes do PCP, os SCOs exercem papel principal, inclusive muitas vezes, os SCOs são chamados de sistemas de controle da produção (e. g. Spearman e Zazanis (1992), Steele et al. (1995), Burbidge (1996), Gestettner e Kuhn (1996), Steele e Malhotra (1997), Huang e Wang (1998), MacCarthy e Fernandes (2000) e Herer e Shalom (2000)).

Os trabalhos de Fernandes e Godinho Filho (2007) e Lage Junior e Godinho Filho (2008) enfatizam a existência de vários SCOs. Fernandes e Godinho Filho (2007) realizaram uma revisão bibliográfica e identificaram 17 SCOs distintos. Entretanto, esse número cresce vertiginosamente quando consideram-se as adaptações feitas sobre esses sistemas. Como exemplo desse fenômeno, pode-se citar o trabalho Lage Junior e Godinho Filho (2008) que identificou 28 variações do sistema Kanban clássico ao realizar uma revisão bibliográfica.

Os SCOs afetam diretamente vários fatores no chão de fábrica, tais como: o fluxo de material, níveis de estoques, cumprimento dos prazos de entrega, produtividade, e, principalmente, tem relação de interdependência com o processo de

elaboração do MPS e *scheduling* (SILVA, 2002). Além da interdependência singular, inerente à própria hierarquia do PCP, alguns SCOs realizam, simultaneamente, mais de uma atividade de PCP. Por exemplo, pode-se citar a evolução do sistema MRP (*Material Requirements Planning*) de Orlicky (1975) para o MRP II (*Manufacturing Resource Planning*) que ocorreu devido ao fato do primeiro (MRP) não considerar as restrições de capacidades dos centros produtivos, porquanto, o segundo faz validação do MPS considerando a capacidade dos centros produtivos, seja no nível de produtos acabados (MPS) ou no nível de programação das ordens de produção dos componentes (SCOs) (LAURINDO; MESQUISTA, 2000).

Um dos SCOs encontrados na literatura é o Controle de Lotes Periódicos (do inglês, *Period Batch Control*- PBC). O controle do SCOs PBC baseia-se na definição de uma demanda de produtos acabados no nível do MPS. Então, é realizado o cálculo das necessidades de materiais para se produzir todos os produtos acabados de um determinado período do MPS e a programação da produção é empurrada (BURBIDGE, 1996).

A Figura 1 apresenta uma estrutura conceitual de programação da produção do SCOs PBC em um ambiente de fabricação de calçados. Os estágios produtivos (Almoxarifado, Corte, Pesponto, Montagem e Expedição) possuem tamanhos de períodos de tempo iguais. Chama-se de ciclo de produção todos os estágios produtivos. Na Figura 1, tem-se um ciclo com 5 períodos de produção. Nesse exemplo, os produtos programados para serem liberados (expedidos) no período 5 têm sua produção iniciada com antecedência de 5 períodos: período 1 no almoxarifado, período 2 no corte, período 3 no pesponto, período 4 a montagem e por fim, período 5 sua expedição.

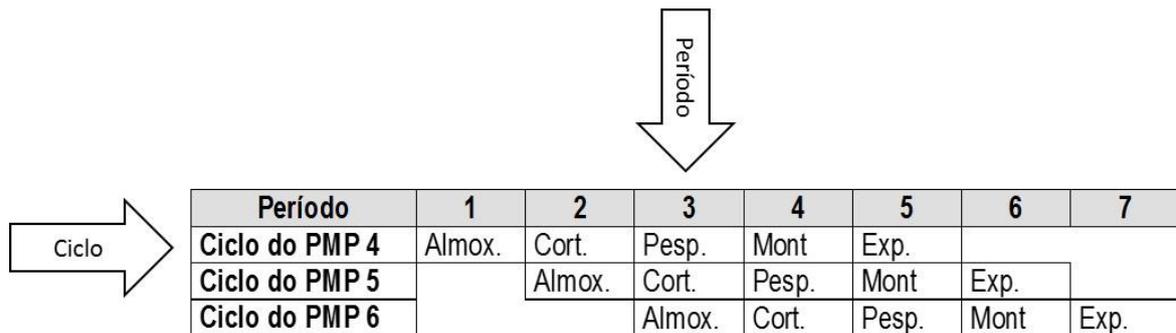


Figura 1: Esquema do sistema PBC

Fonte: Silva (2002)

Benders e Riezebos (2002) relatam que o PBC é um sistema pouco lembrado na literatura, principalmente após a Segunda Guerra Mundial, não por ser obsoleto, pois o consideram um sistema clássico por ser simples de coordenar de forma eficiente o fluxo de matérias, especialmente em ambientes com manufatura celular. Nesse sentido, Riezebos (2010; 2011) utilizou o sistema PBC em propostas para a Manufatura Sincronizada (MS). Conforme Riezebos (2010; 2011), a manufatura sincronizada é conceito fundamental de várias abordagens de gestão do chão de fábrica como manufatura enxuta e MR. A manufatura sincronizada simplifica o fluxo de produção (contínuo ou intermitente) almejando tempos de fluxo curtos e constantes com carregamento previsível dos recursos. Neste contexto, o autor relata que o PBC é o sistema precursor na sincronização dos estágios produtivos para produtos que não são produzidos em linhas de montagens balanceadas.

Fernandes (1991), Severino et al. (2010) e Fernandes et al. (2012) apresentam propostas de implementação da MR utilizando o SCOs PBC. A simplicidade do sistema PBC para sua operacionalização e a característica de possuir *lead-time* de produção constante e planejado o torna atraente à MR.

Entretanto, projetar a implementação do sistema PBC não é uma tarefa fácil em virtude da utilização de períodos de produção com tamanhos idênticos entre os estágios produtivos e conexão rígida entre os estágios (BURBIDGE, 1996).

Determinar um *mix* de produção para o ambiente de manufatura sob pedido (*make-to-order*) e atender os objetivos estratégicos da MR não é uma tarefa trivial devido ao elevado número de variáveis e restrições a serem consideradas. Nessa tese, considera-se que a utilização de um método para elaborar o MPS de forma que atenda as necessidades dos clientes e, simultaneamente, considere as restrições de capacidade, favorece a utilização do sistema PBC tanto no nível de projeto quanto no nível operacional sob alta variedade da demanda. Além da melhor utilização dos recursos produtivos, estratégias de flexibilização da capacidade entre os estágios produtivos (como por exemplo, utilização de funcionários polivalentes e banco de horas) podem contribuir com a implementação do SCOs PBC e melhorar o desempenho dos objetivos de desempenho da MR.

O presente trabalho é inspirado no ambiente produtivo do segmento calçadista, que já foi alvo de pesquisas anteriores do autor. Os fabricantes de calçados que almejem ditar a moda devem ter sistemas produtivos caracterizados pela competição baseada em tempo e alta variedade de produtos, sistema compatível com a MR. Para ditar a moda, as fábricas operam sob alta variedade de produtos; os pedidos dos clientes são diversificados e em pequenos lotes; existe a necessidade de entregas rápidas para repor os varejistas e aproveitar os lançamentos da coleção (estação da moda). O presente trabalho insere-se no contexto de empresas calçadistas que almejam responsividade (variedade, entregas rápidas, pontuais, manutenção dos custos e dos níveis de qualidade). A escolha desse segmento se dá ao fato, além da adequação à estratégia de produção MR,

de muitas operarem sob o SCOs PBC, como descrito em Silva e Fernandes (2008) e Fernandes et al. (2012).

1.1. Problema de Pesquisa e Objetivos do Trabalho

O SCOs PBC é um sistema potencialmente interessante ao controle do fluxo de produção à MR, como menciona a literatura (FERNANDES, 1991; SEVERINO et al., 2010; RIEZEBOS, 2011; FERNANDES et al. 2012). Contudo, alguns trabalhos sugerem que o desempenho do SCOs PBC é prejudicado devido a alta variedade de produtos ((BURBIDGE, 1985); (WEMMERLOV, 1988); (STEELE; MATLHORA, 1997); (MACCARTHY; FERNANDES, 2000) e (FERNANDES E GODINHO FILHO, 2010)) pois, mesmo com a utilização da tecnologia de grupo, com o aumento do número de *setups* e as oscilações de carga nas células/estágios produtivos, é imperativo ao SCOs PBC a ampliação da duração dos períodos/ciclo de produção de forma a acomodar as variações de carga/*setup*.

Em face a supracitada afirmação, com a utilização de células de manufatura em ambiente sob encomenda, pretende-se nesta tese, propor modelos para elaborar um *mix* de produção (variedade e volume) no nível de produto acabado (MPS) para o SCOs PBC que:

- a) Atenda as **variações da demanda** sem prejudicar os prazos de entrega observando um nível de **produtividade** adequado (custos).
- b) Garanta o cumprimento dos **prazos de entrega** no nível de **produtividade adequado**, utilizando estratégias de flexibilização da capacidade: i) trabalhadores polivalentes; e ii) banco de horas.

As afirmações acima remetem esta tese ao objetivo principal de:

À luz da MR, desenvolver modelos matemáticos e métodos heurísticos para elaborar o programa de produção em um ambiente controlado pelo SCOs PBC, considerando e analisando os efeitos das duas estratégias de flexibilização da capacidade.

Como objetivos específicos, tem-se:

- 1- Compreender o funcionamento do SCOs PBC, sua origem, indicações e limitações;
- 2- Identificar e compreender os principais trabalhos que abordam a elaboração do MPS em ambientes controlados pelo SCOs PBC;
- 3- Desenvolver modelos matemáticos para elaboração do MPS utilizando estratégias de flexibilização da capacidade. Entende-se que a adoção de modelos matemáticos para a resolução dos problemas abordados neste trabalho seria proibitiva em aplicações reais devido ao uso intensivo de recursos computacionais. Assim sendo, este trabalho se utiliza da modelagem matemática para definição formal dos problemas e geração de dados para validar as heurísticas.
- 4- Desenvolver métodos heurísticos para os problemas definidos no item anterior.
- 5- Comparar os modelos matemáticos e métodos heurísticos à adequação da MR.

Os modelos matemáticos e métodos heurísticos são desenvolvidos para cada uma das alternativas consideradas na Figura 2. A alternativa 1 tem como medida de desempenho o atendimento dos prazos de entrega e melhor utilização dos estágios produtivos (custo). As alternativas 2 e 3 correspondem a extensões da alternativa 1,

buscando diferentes formas de flexibilização da capacidade nos estágios produtivos: mão-de-obra polivalente e banco de horas.

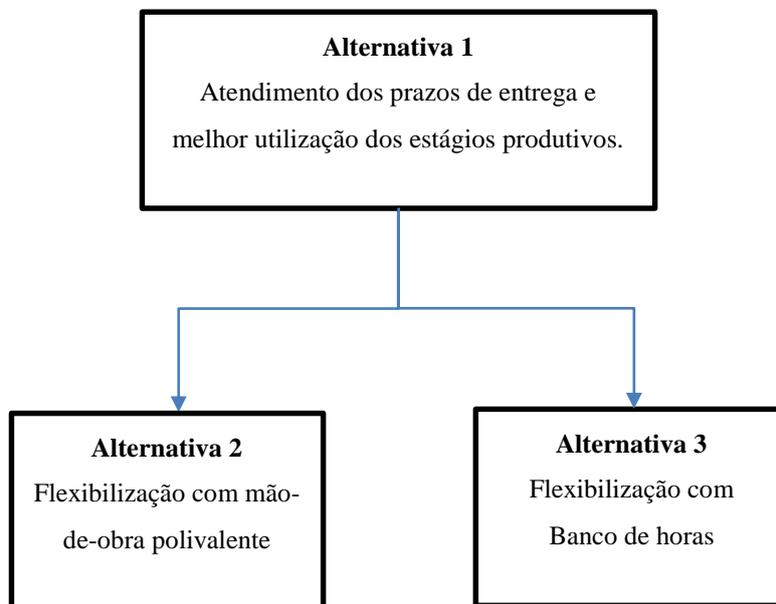


Figura 2: Esquemas de decisões de controle da produção

O objetivo desta tese corresponde à extensão do trabalho de Silva e Fernandes (2008) que desenvolveu modelos de programação matemático e um método heurístico para elaboração de um MPS objetivando atendimento dos prazos de entrega e balanceamento de carga entre os estágios produtivos (no caso, buscou-se apenas balanceamento no ciclo de produção do SCOs PBC). O referido método heurístico foi incorporado na proposta de Fernandes et al. (2012), que elabora uma sistemática para atingir a MR em fábricas de calçados.

1.2. Método de Pesquisa

Uma pesquisa científica surge, a partir da aplicação de um método científico, para solucionar um problema com características contemporâneas, humanas e com relevância operativa (SALOMON, 1991), garantindo uma solução científica com confiabilidade e repetitividade do conhecimento adquirido.

Conforme Salomon (1991), um problema tem relevância científica quando a sua solução gera novos conhecimentos, seja no campo da ciência pura ou da aplicada; relevância humana quando a solução traz benefícios para a humanidade, pois é considerado falso o problema que não busque, diretamente ou indiretamente, benefícios para o homem, e tem característica contemporânea quando se refere à atualidade e à novidade, representando uma necessidade da época.

A pesquisa científica divide-se em dois grupos. O grupo das “ciências puras” onde a atividade científica procura descobrir a teoria dos fatos. As “ciências puras” são dirigidas ao desenvolvimento de novas teorias, leis, modelos para explicação dos fatos e predição do comportamento do fenômeno. Já as “ciências aplicadas” desempenham atividades destinadas a aplicar o conhecimento científico a uma série de problemas da vida humana, individual e coletiva, destinadas à ação, descobrindo teorias e resolvendo problemas de ordem prática.

Ainda segundo Salomon (1991), o tipo de pesquisa científica é determinado pela complexidade do problema a ser resolvido. Ele gradua os tipos de pesquisa científica em: (i) pesquisa exploratória, cujo objetivo é definir melhor o problema, descrevendo comportamento, fatos e variáveis; (ii) pesquisa aplicada destinada a aplicar leis, teorias e modelos em problemas que exigem ação e/ou diagnóstico de uma realidade e (iii) pesquisa pura ou teórica, cujo objetivo é ir além da definição do problema, procurando inferir a interpretação, a explicação e a predição, descobrindo fatos, leis, teorias e modelos.

A presente pesquisa está no estrato da pesquisa aplicada, pois, seu âmago consiste no **desenvolvimento de modelos matemáticos e métodos heurísticos** aplicados ao problema decisório em questão: elaboração do MPS no contexto da MR.

Berto e Nakano (2000) definem **abordagens de pesquisa** como condutas que orientam o processo de investigação; são formas ou maneiras de aproximação e **focalização do problema ou fenômeno** que se pretende estudar, prestando-se à identificação dos métodos e tipos de pesquisa adequados às soluções desejadas. De acordo com esses autores, as abordagens de pesquisa são as abordagens quantitativas e abordagens qualitativas.

Para Godoy (1995), na abordagem quantitativa, o pesquisador conduz o seu trabalho a partir de um plano estabelecido *a priori*, com hipóteses e variáveis operacionalmente definidas. Visando uma generalização estatística, o pesquisador preocupa-se com a medição objetiva e quantificação dos resultados buscando uma certa precisão. Na abordagem qualitativa, o pesquisador está preocupado em obter dados descritivos sobre o objeto de estudo. Para Berto e Nakano (2000), a abordagem qualitativa busca aproximar a teoria e os fatos, através da descrição e interpretação de episódios isolados ou únicos, privilegiando o conhecimento das relações entre contexto e ação (método indutivo).

A abordagem quantitativa é adotada nesta tese em face dos modelos matemáticos e métodos heurísticos desenvolvidos que estabelecem o como elaborar o MPS sob o recorte sobredito. Tem-se como entrada dados mensuráveis e controlados (parâmetros) pelos modelos matemáticos e métodos heurísticos, sequente, a avaliação dos resultados (variáveis) em termos de número de tarefas atrasadas, atrasos e produtividade (aproveitamento dos recursos produtivos). O método de pesquisa mais adequado para esta pesquisa é o método utilizado na Pesquisa Operacional (Modelagem Matemática).

Arenales et al. (2007) descrevem que o processo de modelagem inicia-se com a análise de um problema real, modelagem/formulação do problema, com o modelo é realizado deduções e análises para se obter conclusões, depois são realizadas interpretações e inferências sobre os resultados obtidos para analisar sua aplicabilidade, por fim, a fase de avaliação que analisa quais conclusões serão implementadas.

Diante do exposto, a técnica de pesquisa adotada e dos objetivos específicos, o desenvolvimento desta tese consistiu nos seguintes passos:

Passo 1: Levantamento do estado da arte das pesquisas envolvendo o sistema PBC;

Passo 2: Delineamento dos problemas;

Passo 3: Desenvolvimento dos modelos de otimização;

Passo 4: Desenvolvimento de métodos heurísticos para os problemas;

Passo 5: Análise das soluções;

Passo 6: Elaboração de conclusões e propostas de estudos futuros.

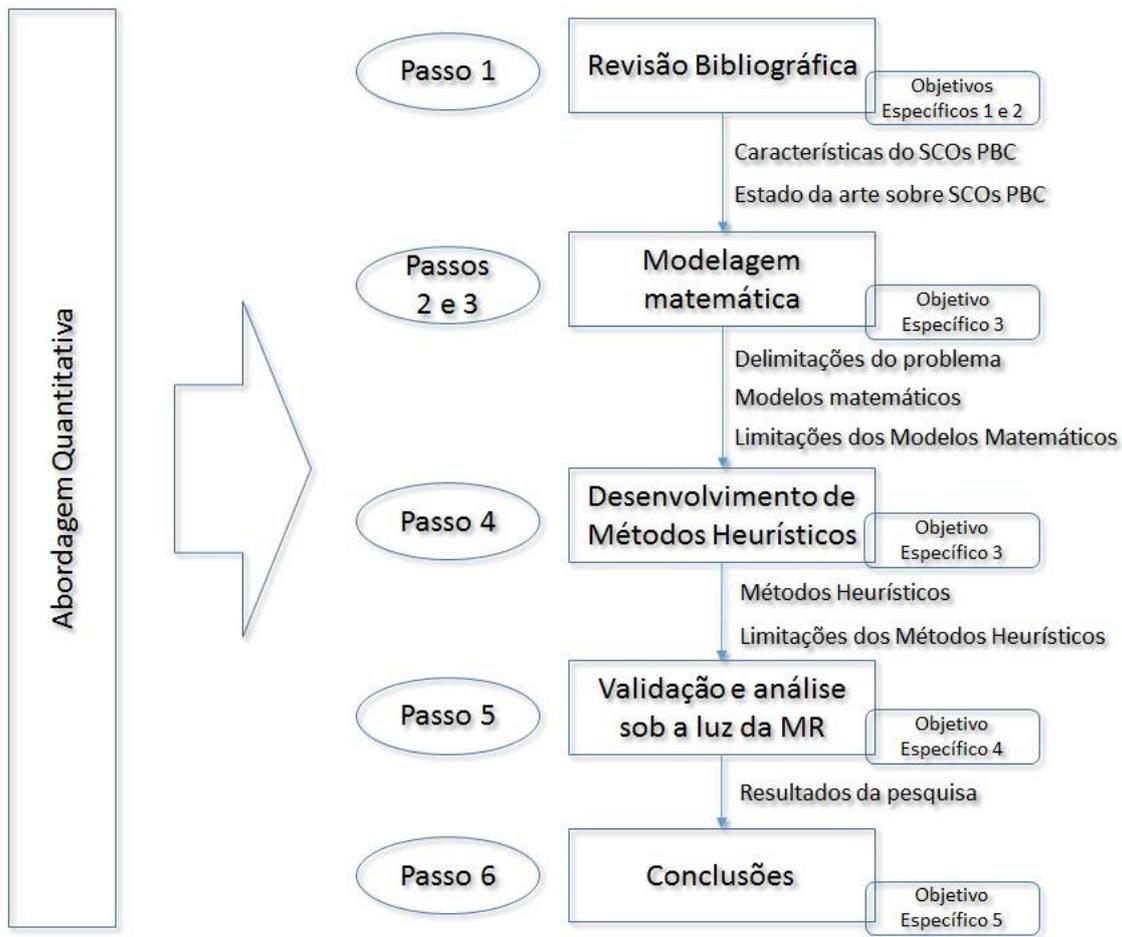


Figura 3- Método de Pesquisa

1.3. Estrutura do Trabalho

O presente trabalho é estruturado 5 capítulos. Na Introdução, capítulo 1, apresenta-se uma breve introdução ao tema, os objetivos do trabalho e o projeto metodológico da pesquisa.

O capítulo 2 apresenta uma contextualização do sistema de PCP e uma revisão bibliográfica exhaustiva sobre o sistema PBC. Também apresenta a técnica *Iterated Greedy*, usada no desenvolvimento das heurísticas no capítulo 3.

No capítulo 3, são descritas as estratégias de resolução dos problemas abordados neste trabalho.

O capítulo 4 apresenta as análises dos resultados obtidos pela execução dos modelos matemáticos e métodos heurísticos para o problema. E por fim, capítulo 5, as condações finais.

2. Revisão bibliográfica

Este capítulo apresenta os conceitos usados para elaboração do trabalho. Para isso, a seção 2.1 apresenta conceitos de PCP, especificamente: subseção 2.1.1 apresenta o detalhamento da estrutura do PCP; a subseção 2.1.2 discute conceitos básicos sobre sistemas de coordenação de ordens, além de definir o PBC, subseção 2.1.3 apresenta as propostas de melhorias ao PBC existentes na literatura; a subseção 2.1.4 discute as aplicações e as recomendações ao uso do PBC; e a subseção 2.1.5 apresenta as considerações finais sobre o sistema PBC. Na seção 2.2 é apresentada a técnica *Iterated Greedy*, que tem apresentado bons resultados para vários problemas de otimização.

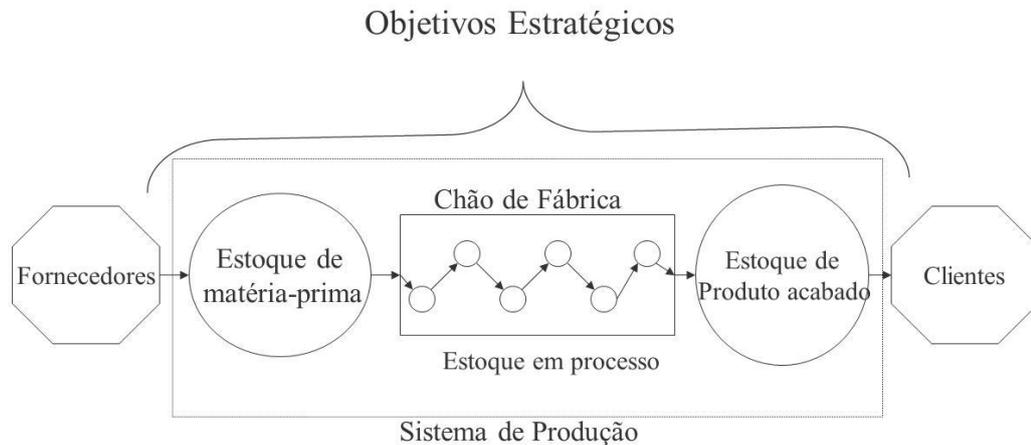
2.1. Conceitos de Planejamento e Controle da Produção

2.1.1. Estrutura do Planejamento e Controle da Produção

A administração da produção, gestão da produção ou gestão de operações é a função gerencial responsável pelos recursos destinados à produção e à disponibilização de bens e serviços (SLACK et al., 2009). Sipper e Bulfin (1998) destacam que a gestão da produção comporta vários aspectos, por exemplo, estratégicos, comportamental, tecnológicos, custos, desenvolvimento de produtos, qualidade e o PCP.

O PCP é uma área organizacional ou um conjunto de fragmentos organizacionais ou um setor de apoio dentro do sistema produtivo que desenvolve a atividade gerencial das operações produtivas responsável por satisfazer continuamente a demanda dos consumidores (TUBINO (2007); SLACK et al. (2009)). Os mesmos autores complementam que o PCP realiza a conciliação entre o que o mercado requer e o que as operações produtivas podem fornecer. Vollmann et al. (1997) e Sipper e Bulfin (1998) destacam que os sistemas de PCP combinam o fluxo de informações e materiais para gerir o sistema de produção. A Figura 4 apresenta um esquema simplificado do fluxo de

materiais do sistema de produção. Por meio do fluxo de informações, o PCP tem a função de regular o fluxo de materiais entre os diversos subsistemas ou componentes do sistema de produção sob a luz dos objetivos estratégicos da produção.



*Figura 4: Fluxo de materiais no sistema de produção
Fonte: Adaptado de Sipper e Bulfin (1998).*

Vários autores (por exemplo, FERNANDES e GODINHO FILHO, 2010; CORRÊA et al., 2007; SLACK et al., 2009; TUBINO, 2007) indicam que as atividades de PCP são orientadas a responder as seguintes questões:

- O que produzir e comprar?
- Quanto produzir e comprar?
- Quando produzir e comprar?
- Onde e quando produzir?

Essas questões requerem do PCP decisões em diferentes horizontes de tempos, normalmente classificadas em: (i) decisões de longo prazo, (ii) decisões de médio prazo e (iii) decisões de curto prazo. Corrêa et al. (2007) explicitam que as decisões tomadas envolvendo sistemas produtivos têm inércias diferentes, ou seja, o tempo

decorrente entre o momento da tomada de decisão e o momento em que a decisão tem efeito é diferente para cada tipo de decisão.

Fernandes e Godinho Filho (2010) salientam que não há consenso entre os autores de PCP sobre a divisão entre os horizontes de planejamento ou de controle e de programação. Entorno da ênfase das atividades de planejamento ou de controle, Fernandes e Santoro (2005) apresentam que, dependendo das características em que o sistema produtivo está inserido, o PCP tem prioridades diferentes entre as atividades de planejamento da produção (PP) e atividades de CP.

No PP as decisões subsidiam aquelas que serão realizadas no nível de execução da produção. Corrêa et al. (2007), Tubino (2007), Sipper e Bulfin (1998) indicam que o PP deve incorporar decisões estratégicas de longo prazo que intensifiquem a integração entre diferentes áreas funcionais da organização.

Para Fernandes e Godinho Filho (2010), as decisões de planejamento são tomadas para reduzir os imprevistos no futuro. Como decisões de planejamento, os autores citam: (i) subsidiar decisões de elaboração de contratos de fornecimento, (ii) planejamento da capacidade de médio prazo, (iii) subcontratação, (iv) terceirização, (v) políticas de horas extras e bancos de horas, (vi) contratações e demissões no médio prazo, (vii) aquisições de novos equipamentos, (viii) desativação de equipamentos, dentre outras.

As decisões de menor inércia, referenciadas como decisões de curto e curtíssimo prazo, estão no âmbito do controle da produção. Fernandes (1991) define o Controle da Produção (CP) como uma atividade gerencial das mais importantes, que visa regular o fluxo de materiais na fábrica por meio do fluxo de informações/decisões/informações no curto prazo. No CP, as funções gerenciais de

planejar e controlar têm um papel muito mais relevante do que o de outras funções, o de organizar e de dirigir.

As definições de Fernandes (1991), Burbidge (1990) e Fernandes e Godinho Filho (2010) conceituam o CP como atividade gerencial responsável por regular (ou seja, planejar, coordenar, dirigir e controlar), no curto prazo (geralmente definido como 3 meses), o fluxo de materiais do sistema de produção por meio de informações e decisões. O CP pode ser efetivado por meio de programação e/ou regras de controle, seguidos de monitoramento e de realimentação (Fernandes e Godinho (2010)).

Em Burbidge (1981, 1990 e 1996), o autor divide em três níveis hierárquicos as atividades de CP: (i) plano de produção, (ii) “emissão” de ordens de fabricação e ordens de compra e (iii) liberação das ordens de operações. Steele e Malhotra (1997) chamam respectivamente essas atividades de (i) programa mestre de produção, (ii) planejamento do inventário e (iii) controle do chão de fábrica. Fernandes e Godinho Filho (2010) hierarquizam as atividades de CP em (i) programar a produção em termos de itens finais (elaboração do MPS); ii) controlar por meio de regras de controle (de estoques) ou programar as necessidades em termos de componentes e materiais; iii) controlar a emissão/liberação das ordens de produção e compra (liberação de ordens) e (iv) programar/sequenciar as tarefas nas máquinas (programação de operações). Esta tese utiliza a seguinte estrutura hierárquica do CP: (i) programa mestre de produção, (ii) sistema de coordenação de ordens e (iii) programação de operações. A Figura 5 apresenta o modelo estrutural de PCP adotado nesta tese.

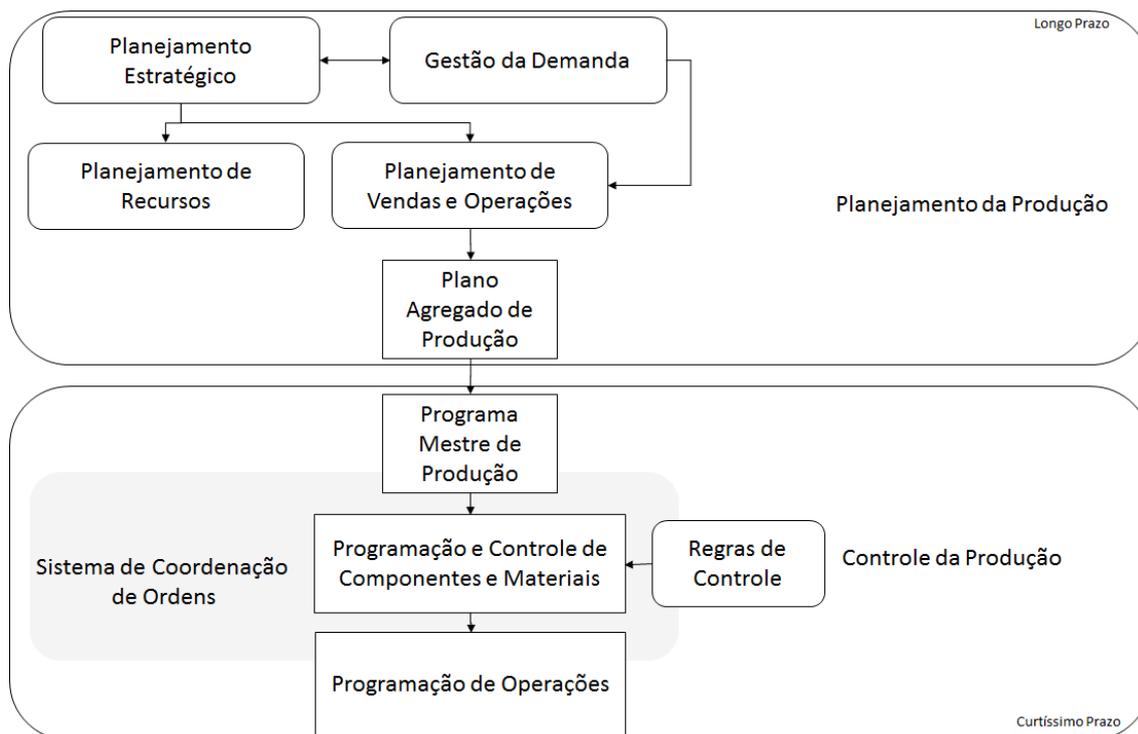


Figura 5: Modelo estrutural do PCP

O PMP, também chamado de MPS (da língua inglesa *Master Production Schedule*), é a primeira das atividades do controle da produção e tem por objetivo estabelecer quais produtos finais e em quais quantidades serão fabricados em um determinado período de tempo (FERNANDES E GODINHO FILHO, 2010). Para ambientes que montam contra pedido, ambientes também denominados de *assembly to order*, há o MPS de componentes para abastecer os níveis de estoque de componentes na fábrica.

Várias pesquisas vêm focando o problema de elaboração do MPS (cf. Lewis et al.(1992), Wall et al.(1992), Campbell (1992), Chu (1995), Sipper e Bulfin (1997), Gundogar (1999), Metters e Vargas (1999), Hill et al.(2000), Vollmann (1997), Corrêa et al. (2007), Tubino (2007), Fernandes e Godinho Filho (2010), Wu et al. (2012), Gahm et al. (2014), Sajjaa e Raob (2014)). De forma geral, a elaboração do MPS está relacionando em definir quais produtos finais serão produzidos em quais períodos de

tempo. Essa decisão influencia diretamente a entrega dos produtos, a qualidade e custos de produção (por exemplo, Gahm et al. (2014)).

Seguindo o nível hierárquico do CP adotado nesta tese, o SCOs é o próximo componente. Fernandes e Godinho Filho (2007) explicitam que os SCOs são responsáveis por ao menos uma das seguintes funções do CP: i) programar ou organizar/explodir as necessidades em termos de componentes e materiais; ii) controlar a emissão/liberação das ordens de produção e compra, determinando se deve liberar as ordens e quando, iii) programar/sequenciar as tarefas nas máquinas e, ainda pode-se acrescentar, iv) controlar o fluxo de materiais por meio de regras de controle.

Silva (2002), Fernandes e Godinho Filho (2007), Silva e Fernandes (2008), Fernandes e Godinho Filho (2010) são alguns trabalhos que destacam a importância do sistema de coordenação de ordens em relação aos demais componentes do CP. Diante do exposto, nota-se que a escolha e configuração do SCOs têm impacto direto em vários fatores no chão de fábrica; tais como: o fluxo de material, níveis de estoques, cumprimento dos prazos de entrega, produtividade do sistema, necessidade ou não de se elaborar um MPS, dispender esforços no sequenciamento da programação das operações, etc.

Como relatado no trabalho de Silva (2002), autores como Burbidge (1996), Steele et al. (1995), Steele e Malthotra (1997), Huang e Wang (1998), Herer e Shalon (2000), MacCarthy e Fernandes (2000), entre outros, referenciavam os sistemas de coordenação de ordens como o MRP (*Material Requirements Planning*), Kanban, PBC (*Period Batch Control*), ConWIP (*Constant Work in Process*) etc. de sistemas de controle da produção - ou até mesmo de sistemas de PCP - como mencionam Fernandes e Godinho (2007).

Os termos programação de operações (*scheduling*) e sequenciamento (*sequencing*) são considerados muitas vezes como sinônimos. A atividade de sequenciamento é a ordenação das tarefas nas máquinas e programação de operações é a ordenação das tarefas nas várias máquinas determinando o momento de início e/ou conclusão das tarefas (ASHOUR, 1972). Para Morton e Pentico (1993), a *scheduling* é o processo de organizar, escolher e alocar os recursos para fazer todas as atividades necessárias para produzir os resultados no momento adequado e satisfazer as restrições existentes nas atividades e nos recursos. Essa definição implica que, se os recursos não são limitados, o problema de programação de operações não existe.

Em resumo, no CP, o MPS controla o nível de produtos acabados e, no caso de ambientes que montam contra pedido, com a produção de componentes para montagem, o SCOs controla a produção e compra de componentes e materiais, e a programação/sequenciamento de operações determina a sequência na qual as operações são executadas.

As funções e as decisões no SCOs mantêm uma forte relação entre as demais atividades do CP, MPS e *scheduling*. Por isso, a próxima seção apresentará um detalhamento dos sistemas de coordenação de ordens e, na seção seguinte, uma revisão bibliográfica do sistema de coordenação de ordens PBC.

2.1.2. Sistemas de coordenação de ordens

O termo SCOs é uma adequação ao termo *Ordering Systems*. Esse termo teve sua primeira tradução para o português para Sistema de Emissão de Ordens por Zaccarelli (1987). Posteriormente, Fernandes e Godinho Filho (2007) destacam que o termo Emissão de Ordens proposto por Zaccarelli (1987) é restrito ao ato de lançar ordens estabelecendo as peças e suas quantidades para serem compradas ou

fabricadas. Atividades como a coordenação das ordens (observada, por exemplo, na operação do sistema Kanban), não seriam cobertas pelo termo “emissão”.

Dessa forma, Fernandes e Godinho Filho (2007) propõem que os Sistemas de Emissão de Ordens sejam denominados de Sistemas de Coordenação de Ordens. Esses autores explicitam que os SCOs são responsáveis por ao menos uma das seguintes funções do CP: i) programar ou organizar/explodir as necessidades do MPS em termos de componentes e de materiais; ii) controlar a emissão/liberação das ordens de produção e de compra, determinando se deve liberar as ordens e quando e iii) programar/sequenciar as tarefas nas máquinas e, iv) controlar a produção por regras de controle.

Entende-se que esse termo representa melhor as atividades desse componente do sistema de controle da produção, nomenclatura que será adotada neste trabalho.

Devido à grande diversidade dos SCOs, alguns autores os estratificaram em grupos, como Burbidge (1981) os classifica em três grupos:

- Sistemas para fazer de acordo com o pedido. Nesse caso, a produção é sob encomenda, a quantidade por lote e o tempo de espera são ambos fixados por contrato e a emissão das ordens corresponde informar à fábrica o que o cliente solicitou, exemplo sistemas de gestão de projetos.
- Sistema de estoque controlado. Nessa classe de sistemas, a emissão das ordens de compra e de fabricação é baseada no nível de estoque existente, novas ordens são emitidas sempre que um determinado nível de estoque é atingido, por exemplo, o sistema de Revisão Contínua.

- Sistema de fluxo controlado. Os sistemas de fluxo controlado emitem as ordens de compra e fabricação diretamente do processo de cálculo de necessidades de componentes para se produzir o MPS determinado, como o MRP II.

Fernandes (1991) faz uma nova sugestão de classificação dos SCOs em 5 categorias:

- Sistema de pedido controlado, por exemplo sistema da programação por contrato; sistema da alocação de carga por encomenda;
- Sistema de estoque controlado que puxa a produção, como exemplo, sistema de estoque mínimo;
- Sistema de estoque controlado que empurra a produção, como exemplo, sistema de estoque base;
- Sistema de fluxo controlado que empurra a produção, exemplo, sistema MRP e sistema PBC;
- Sistema de fluxo controlado que puxa a produção, exemplo sistema Kanban.

Em Fernandes e Godinho Filho (2007), sugerem a seguinte classificação para os SCOs:

- Sistemas de pedido controlado. Estes SCOs são utilizados em ambientes produtivos onde não é possível realizar estoques de produtos finais, por serem geralmente projetos especiais e/ou de difícil previsibilidade da demanda. Geralmente, estes sistemas são baseados em Gestão de Projetos;

- Sistemas controlados pelo nível de estoque. Nessa classe de sistemas, a emissão das ordens de compra e/ou produção é baseada no nível de estoque disponível, por exemplo, sistema de estoque mínimo;
- Sistemas de fluxo programado. Os sistemas de fluxo programado realizam o cálculo de necessidade de materiais a partir de um MPS, nesse caso, o programa de produção determina o fluxo de materiais e o fluxo de informações no chão de fábrica. Por exemplo, MRP e PBC.
- Sistemas Híbridos. São sistemas que possuem dispositivos que regulam o nível de estoque da produção por meio de regras de negócio e, ao mesmo tempo, existe uma programação dos itens pelo sistema de PCP da empresa. Portanto, algumas das ordens de produção e/ou de compra são programadas pelo PCP e controladas por regras baseadas no nível de estoque. Por exemplo, sistema Kanban com programação na última estação de trabalho via previsões de demanda.

2.1.3. Sistema de coordenação de ordens PBC

O criador do sistema PBC foi o consultor inglês R. J. Gigli que adaptou sistemas de produção semelhantes, já existentes e usados na produção em massa (BURBIDGE, 1996). Burbidge (1985) afirma que Gigli introduziu o PBC em trinta fábricas diferentes, mas o sucesso do sistema PBC se deu durante a Segunda Guerra Mundial, na Inglaterra, aplicado à produção dos aviões de guerra chamados Spitfires e depois, aplicado em uma indústria têxtil (BENDERS, 2010).

Burbidge (1985) declara que Gigli dedicou pouco tempo a publicar seus métodos de trabalho. E, com sua morte, a divulgação do sistema PBC ficou atenuada. A escassez de publicações sobre o PBC é mencionada nos trabalhos de Steele e Malhotra

(1997), Steele (1998), Benders (2010), Riezebos (2001) e Benders e Riezebos (2002). Benders e Riezebos (2002) fizeram uma pesquisa pelo termo “period batch control” em duas grandes plataformas de pesquisa científica (*Web of Science* e *Online Contents*) e encontraram somente nove artigos com título contendo o termo *Period Batch Control*.

John Burbidge foi o principal divulgador do sistema PBC (BENDERS, 2010). Burbidge (1985) relata sua relação de amizade com o consultor Gigli, informando que ganhou do amigo a primeira cópia de seu livro “*Standard Batch Control*” (SBC), livro onde Gigli apresenta um SCOs onde todos os produtos e componentes eram feitos em lotes padrões. Burbidge (1985) chama a atenção ao trabalho de Gigli, pois o sistema SBC evidencia a padronização da produção em períodos, por isso, tal sistema é considerado como precursor do PBC. Para explicar as origens do PBC, Benders (2010) realizou entrevistas com funcionários que trabalharam com Gigli nas empresas *Norman Fleming Papers* e da *Associated Industrial Consultants* e pesquisou registros de Burbidge.

Benders (2010) ressalta que a constante pressão por inovação fez os engenheiros de produção ignorarem o sistema PBC, o rotulando como um sistema ultrapassado e irrelevante. Entretanto, o autor destaca que o sistema foi utilizado com sucesso para resolver problemas de coordenação de ordens no passado e, portanto, existe a necessidade de conhecer as soluções implementadas no passado para evitar a duplicidade de esforços. Benders e Riezebos (2002), apesar da pouca divulgação do sistema PBC, o consideram como um sistema clássico que coordena efetivamente os estágios de produção e que suas características resultam na boa utilização dos recursos e materiais com *lead-times* de produção curtos e estáveis.

Burbidge (1989, 1994) define o PBC como um sistema de controle da produção *just-in-time*, de fluxo controlado e de ciclo único. Como regra geral, o PBC visa

produzir produtos somente quando se pode transportá-los para os clientes, e somente aceitar entregas de compras dos fornecedores quando se está precisando dos materiais para o processamento intermediário.

Como apresentado em Silva (2002), o SCOs PBC é um *sistema do tipo fluxo controlado* conforme classificação de Burbidge (1971, 1981, 1989, 1994, 1996) e, conforme classificação de Fernandes (1991) e Fernandes e Godinho Filho (2007, 2010), é um sistema de fluxo programado. As nomenclaturas são compatíveis e podem ser consideradas como equivalentes. Os sistemas de fluxo programado/controlado são baseados diretamente ou indiretamente na transformação das necessidades do MPS em necessidades de itens componentes pelo departamento de PCP.

Conforme Fernandes (1991) e Fernandes e Godinho Filho (2007, 2010, 2011), nos sistemas de fluxo programado, o fluxo de material e de informações seguem juntos. Em outras palavras, o controle da produção é caracterizado como empurrado.

Steele e Malhotra (1997) explicitam que os sistemas MRP e Kanban são utilizados para coordenar o fluxo de produção em células de manufatura. Já o sistema PBC, método recomendado especificamente à manufatura celular, não recebeu mesma atenção na literatura. Nesse trabalho, entende-se como manufatura celular o arranjo produtivo decomposto em células de manufatura, grupo de máquinas e operações, capazes de fabricar famílias de produção (RIEZEBOS, 2001). A manufatura celular tem origens na denominada Tecnologia de Grupo, estratégia que agrupa as máquinas e operações em células para produção de famílias específicas.

Burbidge (1985) destaca a necessidade de sistemas de controle da produção com ciclos curtos para fornecer flexibilidade à produção. Neste trabalho, o autor enfatiza que os sistemas PBC e Kanban são mais adequados para fornecerem capacidade

para a produção lidar com incertezas (por exemplo, quebra de máquina, falta de trabalhadores, falta de material etc.) no chão de fábrica.

Fernandes (1991) declara que o sistema PBC é um SCOs usado em sistemas de produção em massa. Maccarthy e Fernandes (2000) e Fernandes e Godinho Filho (2010) ressaltam que o sistema PBC pode ser usado na produção com maior diversidade de produtos finais, geralmente produção em batelada. Porém, Zelenovic e Tesic (1988) relatam a utilização de tecnologia de grupo e do sistema PBC em 32 empresas de engenharia (alta variedade, baixo volume, multi-ciclos e processamento em lote) na então Yugoslávia. Os trabalhos citados evidenciam a possibilidade de se aplicar o SCOs PBC em uma gama significativa de ambientes produtivos (alto volume de produção com baixa diversidade de produtos até em ambientes com alta diversidade de produtos e baixo volume). Neste sentido, Burbidge (1996) apresenta estratégias e limitações de implementação do SCOs PBC nessa variedade de ambientes.

Hyer e Wemmerlov (1982) relatam que configurar o sistema PBC com ciclos curtos de produção resultaria em um SCOs com desempenho semelhante ao desenvolvidos em ambientes JIT/kanban. Burbidge (1985) comparou o sistema PBC ao sistema Kanban. Nessa comparação ele destaca a simplicidade dos sistemas (PBC e Kanban) e ressalta que na produção em massa esses sistemas apresentam desempenhos equivalentes. Porém, ele afirma que para ambientes que não trabalham com produção em massa, o Kanban não é capaz de competir com o desempenho do PBC.

Nos trabalhos de Steele e Malthotra (1997) e de Wemmerlov (1988) se evidencia a necessidade de alguns pré-requisitos para o funcionamento do PBC, como MPS que permita o equilíbrio de capacidade e carga entre os estágios/células de produção. Steele e Malthotra (1997) consideram que restrições no processo ou no produto podem inviabilizar o uso do sistema PBC mesmo em sistemas de produção em massa.

Steele e Malhotra (1997) afirmam que, ao contrário do que aconteceu com o sistema MRP, o sistema PBC não é muito conhecido nos Estados Unidos. Além disso, existem relatos de sua implementação em muitas empresas industriais na Europa (ZELENOVIC e TESIC, 1988). Este fato pode ser constatado nos trabalhos de Zelenovic e Tesic (1988), Fernandes (1991), Burbidge e Halsall (1994), Towill (1997) e Benders e Riezebos (2002).

Fernandes (1991), Benders e Riezebos (2002) e Silva (2002) fazem referência ao SCOs PBC como um sendo um sistema de controle único devido a suas políticas e técnicas de coordenação da produção. O PBC é um sistema de ciclo único porque todos os itens têm emissão/liberação de ordens no mesmo período referente ao MPS e de fase única, porque todos os itens são consumidos na mesma série de dias (por exemplo, ver Benders e Riezebos (2002)).

Em relação à utilização de período único, para todos os estágios de produção pelo sistema PBC, Steele e Malhotra (1997) declaram que a política de período único estabelece o dimensionamento do lote de produção em unidades de tempo. Ao estabelecer o tamanho do período, fatores como: a variedade; volume de produção; custos de *setup*; e os custos de manter estoque são considerados, criando naturalmente um tamanho de período economicamente viável. Ressaltam ainda, que este sistema possui uma vantagem em relação aos sistemas de múltiplos ciclos (ordens com tempos de emissão diferentes), pois a variação da carga entre os estágios produtivos é menor, uma vez que todas as ordens são liberadas no mesmo período de tempo, para posterior programação nos respectivos recursos produtivos.

Como em qualquer outro sistema de coordenação de ordens, existe no PBC um *trade off* entre o tamanho do lote (período) e os tempos de *setup*. Ciclos de produção mais curtos resultam em mais frequentes tempos de *setup*, aumentando o total

dos tempos de *setup* e carga. Steele e Malhotra (1997) declaram que o custo adicional da carga exigido pelo *setup* pode ser compensado pela diminuição da variação da carga e das filas.

Burbidge (1975) destaca que ciclos curtos tornam o sistema produtivo mais sensível às alterações do mercado. Entretanto, para reduzir os ciclos é imprescindível planejar e definir todos os *lead-times* envolvidos no processo produtivo, de modo a acomodar todas as variações reais de *lead-time* tanto de componentes como de produtos. Steele e Malhotra (1997) explicitam que o aumento de carga gerado por mais *setup*, resultante da redução do tempo de ciclo, pode reduzir a confiabilidade das entregas e, por isso, a redução do tamanho do tempo de ciclo deve ser compensada pelo aumento da capacidade ou pela redução dos tempos de *setup*.

A indicação do PBC para operar junto com tecnologia de grupo é muito destacada na literatura. Por exemplo, pode-se citar os trabalhos de Pels (1985), Burbidge (1988, 1996), Fernandes (1991), Cho et al. (1994) e Steele e Malhotra (1997).

Burbidge (1988) e Steele e Malhotra (1997) enfatizam que a simplificação do fluxo de materiais por meio da tecnologia de grupo ou de células de manufatura favorece o agrupamento das ordens de produção em famílias de itens com *setup* semelhante.

Pels (1985), Burbidge et al.(1987), Burbidge et al. (1989) e Burbidge (1989), ao estudarem a integração funcional em organizações de manufatura, ressaltam a necessidade de simplificação do fluxo de materiais no chão de fábrica com a utilização de tecnologia de grupo e o sistema PBC.

Quanto à característica de fase única do sistema PBC, todos os itens são consumidos dentro do ciclo de produção; tal característica reduz os níveis de estoques

“residuais”, os estoques de ciclo, pois o que é produzido em um período anterior é usado no próximo período pelo estágio sucessor (STEELE E MALHORA, 1997). No sistema PBC o programa de produção é dividido em períodos, por exemplo, semanas. A necessidade de componentes ou produtos para cada parte do processo de produção é calculado e solicitado na quantidade necessária por período (BENDERS, 2002).

As características de ciclo único e fase única permitem que o sistema PBC tenha o *lead-time* planejado constante; uma vez que todas as variações de carga são absorvidas dentro dos estágios/períodos produtivos.

Em relação à programação da produção, o PBC realiza o cálculo da necessidade de materiais e componentes, como os períodos de produção são idênticos no PBC e se produz sempre na quantidade necessária para atender o MPS, o fluxo de produção é empurrado ao primeiro estágio produtivo e seguirão, no próximo período, para o estágio seguinte de produção sem a necessidade de novas ordens. (BURBIDGE, 1975).

Steele e Malhotra (1994, 1997) enfatizam que a seleção do tamanho do período é a decisão principal do projeto de implantação do sistema PBC. Isso se deve ao fato de que o tamanho do período determina a quantidade de itens ou produtos produzidos por estágio/período, conseqüentemente dimensionando o tamanho dos lotes de produção, o nível de estoque em processo e estabelecendo o tamanho do *lead-time*.

Riezebos (2000) avaliou alternativas de projetos do sistema PBC variando o tamanho do período e o número de estágios produtivos; quanto menor o tamanho do período mais estágios produtivos são necessários, e identificou que a quantidade de horas extras, estoques, custos de *setup* e custos de transferência de lote diferem significativamente para as configurações do sistema PBC. Mesmo mantendo o

tempo de processamento das atividades e o mesmo tamanho de ciclo, os resultados mais satisfatórios foram com configurações do PBC com menores tamanhos de períodos.

Fernandes (1991) e Fernandes e Godinho Filho (2010) apresentam o funcionamento básico do PBC em 3 etapas:

Etapa 0: o MPS é definido para vários ciclos de igual tamanho;

Etapa 1: é feito o cálculo da necessidade de componentes para fabricação de cada produto contido no MPS;

Etapa 2: atribuem-se tempos para:

- a) Produção das ordens ou entrega dos itens compradas;
- b) Processamento ou recebimento de componentes;
- c) A montagem;
- d) A distribuição das vendas.

Silva e Fernandes (2008) apresentam uma estrutura lógica do funcionamento do sistema PBC para uma fábrica de calçados infantis. A Figura 6 ilustra esse esquema de funcionamento. Observe que no período 6 a fábrica está expedindo os produtos pedidos no MPS do ciclo 1, montando os produtos dos pedidos alocados ao MPS do ciclo 2, pespontando os produtos dos pedidos alocados ao MPS do ciclo 3, cortando os materiais dos produtos de pedidos alocados ao MPS do ciclo 4, adquirindo os materiais do MPS do ciclo 5 e, acumulando pedidos que serão alocados ao MPS do ciclo 6 ou de algum ciclo posterior.

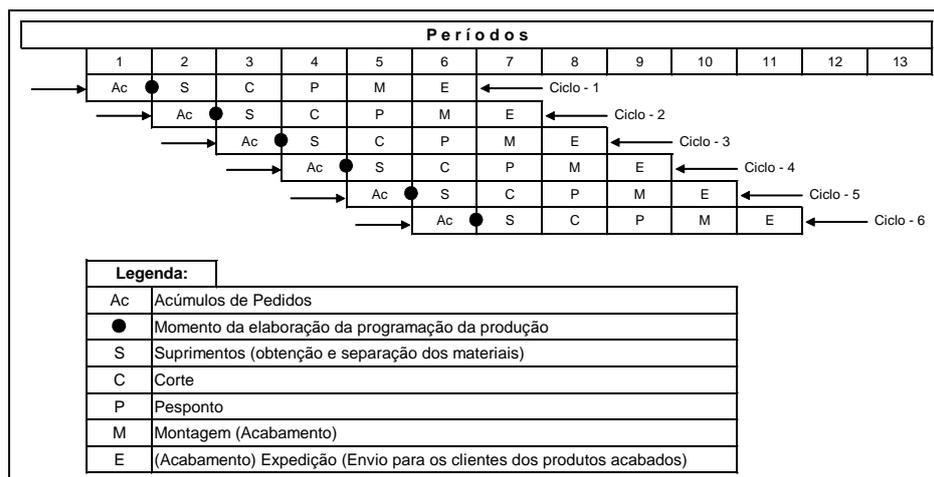


Figura 6: Estrutura lógica do funcionamento do PBC na indústria de calçados
 Fonte: Silva e Fernandes (2008)

A estrutura lógica apresentada na Figura 6 é compatível com as estruturas apresentadas em Steele et al. (1995) e Steele e Malthotra (1997), que mostram um processo de produção com tempo de ciclo igual a 5 períodos. Nesse caso, a “carga” de produção tem que ser compatível com a capacidade de cada período de produção, ou seja, a carga necessária para produção de um lote em qualquer unidade de trabalho deve ser menor ou igual a sua capacidade para que a tarefa termine dentro do período.

Conforme Burbidge (1994), o sucesso da implementação do sistema PBC requer:

- (1) o tempo de processamento de todos os produtos deve ser menor que um período. Fernandes (1991) sugere que, itens com *lead-time* de produção muito longo, que não podem ser reduzidos, devem ser controlados por outro sistema que não o PBC;
- (2) o tempo de *setup* deve ser reduzido de modo que períodos mais curtos não prejudiquem a capacidade da fábrica. Steele e Malthotra (1997) e Fernandes (1991) sugerem aumento da capacidade ao reduzir o tamanho

dos períodos quando o tempo de *setup* não for reduzido de modo que não prejudique confiabilidade das entregas;

(3) Os *lead-times* de compras devem ser menores que um período. Fernandes (1991) sugere a utilização de contratos de longo prazo que preveem a entrega de material no início de cada ciclo.

Para os itens que por alguma limitação não respeitam as restrições para o funcionamento do PBC, Fernandes (1991) sugere a utilização de outro SCO para controle desses itens “especiais”.

Steele e Malhotra (1997) informam que as distribuições de capacidade entre células, junto com a suavização da demanda externa, são pré-requisitos para obtenção de bons desempenhos com períodos curtos. Eles também sugerem que a duração dos períodos deve ser aumentada quando existir falhas no controle da variação da demanda externa e/ou desbalanceamento interno das células.

Vários autores recomendam o PBC para a manufatura celular, como por exemplo, New (1977), Burbidge (1988), Wemmerlov (1988), Steele et al. (1995), Steele e Malhotra (1997), Zelenovic e Tesic (1988), Kahu e Krajewski (1995), Rachamadugu e Tu (1996), Hameri (2011). A recomendação do sistema PBC é tão forte para a manufatura celular que alguns autores, ao proporem análise do fluxo de produção para manufatura celular, citam somente o PBC como sistema de SCOs (c. f. Rajesham et al. (1982) e Hameri (2011)).

Na seção seguinte, são apresentadas algumas propostas de melhorias ao sistema PBC encontrados na literatura.

2.1.4. Propostas de melhorias

Antes de relatar os trabalhos encontrados na literatura que apresentam melhorias e adaptações para o sistema PBC, é importante esclarecer a terminologia adotada nesta tese para o conceito de melhoria. Entende-se como *melhorias ao sistema PBC* aqueles trabalhos que propõem métodos/instrumentos que interferem no desempenho do sistema PBC, podendo atuar na atividade de elaboração do MPS ou na atividade de *scheduling*. Outro tipo de melhoria considerada nesta tese são as adaptações estruturais sugeridas ao funcionamento do PBC para adaptar/melhorar o desempenho do sistema às situações não adequadas ao modelo original do sistema PBC. Não serão incluídas neste trabalho propostas de melhorias gerais, como aplicação da análise do fluxo de produção, tecnologia de grupo e técnicas de redução de *setup* (c.f. SMED - *Single Minute Exchange of Die*), pois entende-se que tais melhorias são aplicadas sobre as características intrínsecas dos sistemas produtivos, independente do SCOs adotado.

O sistema PBC tem forte interdependência com os componentes MPS e PO (*scheduling*). Melhorias na elaboração do MPS ou da PO em ambientes controlados pelo PBC refletem em melhores resultados no chão de fábrica, por exemplo, a redução do estoque em processo, a redução do *lead-time*, melhor utilização dos recursos produtivos, a redução dos custos, o aumento da qualidade etc. Nesta seção são apresentadas as melhorias e as adaptações, respeitando o nível hierárquico do CP, respectivamente, as melhorias no nível de MPS e no nível de programação de operações, as melhorias integradas entre MPS e programação de operações e, por fim, as melhorias de projeto do sistema PBC. Melhorias integradas com aplicações serão apresentadas na próxima seção.

Burbidge (1988) demonstra como a programação de operações pode ser simplificada utilizando tecnologia de grupo e o sistema PBC. O autor demonstra que a

combinação dessas tecnologias pode aumentar a autonomia dos operadores de chão de fábrica e, por meio disso, evitar o uso de sistemas computacionais para a programação de operações. Em sua proposta, Burbidge utiliza organizações simples de dados de produção como, por exemplo, a lista de ordens de produtos por período do PBC e uma lista de capacidade/carga de trabalho por célula e período. Para analisar as listas, Burbidge apresenta diretrizes para a programação de operações como a identificação das máquinas que têm capacidade crítica nas células (máquinas que compõem o gargalo da célula) e a sugestão de atuar para aumentar a capacidade dessas máquinas, por meio de uma melhor programação das operações, sequenciando/agrupando as ordens de produção por semelhança de configuração da máquina gargalo e priorização de itens que tenha tempo de processamento (*lead-time* de produção) maiores na célula. Burbidge defende a identificação e o incentivo à mão-de-obra polivalente para aumentar a flexibilidade das células em responder aos imprevistos.

Lee (1985) investigou por meio de simulações computacionais os efeitos do tamanho do lote, do tempo de processo da tarefa, da capacidade alocada às células de manufatura, das variações no tempo *setup*, do tempo de transição de matérias entre as células, do tamanho das células e da utilização de regras de programação de operações sobre os seguintes indicadores: utilização de máquinas, redução do *setup*, tempo médio de *lead-time* de produção, tempo médio de espera em fila, tempo médio de antecipação e quantidade de trabalho remanescente. As principais conclusões desse trabalho foram que o tamanho do lote influencia no desempenho do sistema devido aos tempos de preparação acumulados. Lee (1985) apresenta um algoritmo de sequenciamento hierárquico utilizando a seguinte regra: (i) programar primeiro trabalhos que não têm folga; (ii) sequenciar, após isso, os trabalhos que aproveitam a configuração das máquinas e, em caso de empate, utilizar a que contém o menor tempo de

processamento e, por fim, quando não houver aproveitamento da preparação, (iii) sequenciar as tarefas que ainda não foram processadas e que tenha o menor tempo de processamento. Essa regra segue as diretrizes apresentadas por Burbidge (1988), exceto por alterar a prioridade do passo (i), pois Burbidge (1988) sugere o agrupamento das ordens de produção por *setup* como primeira prioridade, e Lee (1985) sugere como primeira prioridade as atividades que são críticas. O trabalho de Lee (1985) indicou que células de manufatura maiores aproveitam melhor a capacidade instalada. Porém, com a necessidade de maior investimento em ferramental.

Baseado em ideias obtidas em pesquisa de campo sobre sequenciamento de linhas de montagem e de balanceamento de capacidade, Riezebos (2010) elaborou três algoritmos heurísticos e um modelo matemático para sequenciamento das ordens de produção dentro das células de manufatura. Tais propostas consideram o funcionamento do sistema PBC e têm como objetivo principal a redução do número de horas extras necessárias por período de tempo sobre todos os estágios produtivos. Riezebos (2010) considera que o MPS já está previamente estabelecido, e que a cada período/estágio produtivo do sistema PBC é possível alocar somente uma ordem de produção e que os trabalhadores são capacitados para trabalharem em estágios diferentes estágios de produção. Em Riezebos (2011), o autor apresenta a análise detalhada do desempenho das heurísticas e do modelo, concluindo que se existirem flutuações de capacidade oriundas do *mix* de produção entre os estágios produtivos, as soluções mais sofisticadas não são robustas, e portanto, a utilização da heurística mais simples seria uma solução mais adequada.

Fernandes et al. (2012) apresentam uma proposta simples para sequenciar as ordens de produção em uma fábrica de calçados que opera sob a lógica do PBC. Como todas as ordens são liberadas no início do período, os autores propõem que

para cada setor/estágio produtivo tenha uma sequência das ordens de modo a reduzir ao máximo o tempo gasto com preparação das máquinas iniciando sempre a produção pelos modelos mais difíceis.

Baseado no trabalho de Jamshidi e Brow (1993), Rachamadugu e Tu (1997) apresentam um algoritmo para determinar a duração do tempo de ciclo do sistema PBC, visando a redução do custo total composto pela soma dos custos de manter estoque de produtos em cada período e os custos de preparação. Em resumo, o algoritmo proposto aumenta o tamanho do lote de produção baseado na demanda até que os custos de manter estoque estejam equitativos com os custos de preparação. O algoritmo considera as características do PBC de ciclo único (todos os itens têm emissão no mesmo período) e de fase única (todos os itens são consumidos no mesmo período). Entretanto, após a aplicação desses algoritmos, o tamanho dos ciclos não estará mais padronizado, pois cada ciclo terá um tamanho diferente. Os autores não mencionam, mas a alteração do tamanho do ciclo de produção tem a premissa de alterar a duração dos períodos em cada estágio produtivo ou alterar a capacidade instalada. A proposta de Rachamadugu e Tu (1997) tem a premissa de que o MPS foi elaborado previamente e que a programação elaborada será absorvida pela capacidade produtiva instalada. Os custos de preparação (*setup*) e os custos de estoque em processo são custos geralmente estimados e subjetivos. Se a produção focar na redução do tempo de preparação almejando a redução do tamanho dos lotes e, conseqüentemente, dos períodos, esta seria uma alternativa melhor do que estimar o tamanho sugerido no trabalho de Lee (1985).

Kaku e Krajewski (1995) elaboraram modelos para escolher o tamanho do ciclo do sistema PBC objetivando a redução dos custos de produção, definidos como a soma dos custos de estoque e de custo de horas extras. Os modelos desenvolvidos consideram a demanda com o comportamento estocástico. Os autores evidenciaram a

relação entre o tamanho do ciclo, o tipo de fluxo de materiais das células de manufatura e o grau de incerteza da demanda.

Sobre a perspectiva de projeto do sistema PBC, Riezebos (1997) estudou a relação entre o tamanho do período (P) e o número de estágios produtivos (N). O autor manteve constante o tempo de ciclo (*lead-time*) do sistema. Esse autor destaca que o sistema PBC não coordena as ordens de produção dentro das células de manufatura e a interconexão entre as células de manufatura o que pode causar deterioramento no desempenho do sistema produtivo. Resumidamente, Riezebos (1997) apresenta os efeitos positivos para cada caso:

- Caso 1: número pequeno de estágios e tamanho longo para os períodos;
- Caso 2: número de maior de estágios produtivos e tamanho de períodos menores, conforme apresentado no Quadro 1.

Fernandes (1991) desenvolveu um sistema de controle da produção para manufatura celular em um ambiente semi-repetitivo. O sistema proposto apresenta melhorias no nível de projeto do PBC, na elaboração do MPS e no *scheduling*. A adaptação sugerida por Fernandes (1991) ao sistema PBC foi denominada de Sistema de Controle de Lotes Semiperiódicos (SPBC). O SPBC é uma adaptação do sistema PBC para propiciar maior flexibilidade do sistema em relação à conexão rígida que estabelece a capacidade produtiva devido ao tamanho uniforme dos períodos estabelecido para o sistema PBC nos estágios produtivos. Os procedimentos para o funcionamento do SPBC são os mesmos do PBC, com exceção da utilização de um período duplo de fabricação e um esquema de atribuição de prioridade às ordens de fabricação.

do período

Quadro 1: Efeitos positivos de escolha de número de estágios e tamanho

Fonte: Riezebos (1997)

Fator	Caso 1 (N pequeno e P grande)	Caso 2 (N grande e P pequeno)
Entrada	Aumento da flexibilidade do mix	Menos material em processo e entregas <i>just-in-time</i>
Processo	<ul style="list-style-type: none"> - Poucos problemas com longos tempos de processamento; - Menos desperdícios no início e no fim dos estágios; - Tempos de <i>setup</i> menores; - Maior atratividade do trabalho no processo; 	<ul style="list-style-type: none"> - Menor necessidade tecnológica ou polivalência dos funcionários; - Maior utilização do gargalo; - Menor variedade no número de operações por estágio; - Redução dos lotes de transporte;
Controle	- Menor esforço com programação (nível de produto acabado)	<ul style="list-style-type: none"> - Facilidade na subcontratação; - Facilidade na coordenação de recursos compartilhados - Coordenação sequencial mais fácil entre células - Melhor controle do processo - Melhor sincronização
Resultados	<ul style="list-style-type: none"> - Menor esforço com previsão - Maior nivelamento da variação da demanda por período 	- Menos produtos em estoque

Essa proposta foi desenvolvida para a manufatura celular com alta diversidade de produtos finais. Sua implementação computacional na linguagem de programação FoxPro pode ser encontrada em Fernandes e Pacheco (1996) ou Pacheco (1995).

Com essas modificações no sistema PBC, Fernandes (1991) considera imprescindível o suporte de tecnologia de informação, devido ao número elevado de ordens de produção de diversos produtos que, geralmente, necessitam de roteiros distintos de produção. Com isso, devido ao volume e à complexidade do fluxo de materiais do sistema produtivo semi-repetitivo, é impossível de ser realizado a gestão das atribuições de prioridades às ordens de produção sem a ajuda de um sistema computadorizado.

O objetivo do sistema SPBC é realizar a programação da produção, determinando os itens a serem produzidos em cada célula para cada período determinado. Para isso, o SPBC classifica os itens em três listas conforme sua prioridade, a saber:

Lista Expressa (E): lista de itens que deveriam ter sido fabricados no período anterior, mas que, por algum motivo, não foram concluídos. Entre esses motivos estariam quebras de máquina, greves, absenteísmo, atraso no fornecimento de matéria-prima etc.

Lista Gargalo (G): lista dos itens que devem ser fabricados nesse período de produção que se inicia e cujo *lead-time* de produção é maior que um período. Dessa forma, sua fabricação deve começar nesse período para terminar dentro do ciclo determinado.

Lista Normal (N): lista de ordens de produção que contém as demais peças, isto é, as peças que deverão ser fabricadas no ciclo que se inicia, mas cujo *lead-time* não é maior que um período.

O funcionamento do sistema SPBC começa com a tradução de um período do MPS em necessidades de materiais e de componentes (também chamado de “explosão da programação”) para serem fabricados ou comprados. Na sequência, as ordens de fabricação são classificadas conforme as listas G e N descritas acima, e os itens que não foram produzidos no período anterior, devido a algum imprevisto, são incluídos na lista E.

Num mesmo período de fabricação, pode-se encontrar sobreposição de ordens de produção referente até três períodos de MPS (geralmente 2) em processamento. Isto é acomodado exatamente pelo esquema de atribuição de prioridades proposto. O Quadro 2 mostra a distribuição da duração dos períodos de produção do sistema SPBC

para uma empresa de calçadista, com período duplo em um dos estágios produtivos considerado como gargalo. Nesse quadro, a duração do período nos estágios produtivos Corte, Montagem, Expedição é igual a meia unidade de tempo cada e para o estágio produtivo Pesponto, gargalo do processo, a duração do período é dobrada. Dessa forma, percebe-se que o Pesponto tem o dobro de horas disponíveis quando comparado com os demais estágios produtivos individualmente.

Quadro 2: Esquema da distribuição dos tempos de processamento no SPBC

Fonte: Silva (2002)

Setores	Corte	Pesponto	Montagem	Expedição	Tempo de Ciclo
Tamanho dos períodos (dias)	0,5	1	0,5	0,5	2,5

Com a utilização deste sistema, é possível trabalhar com um tempo de ciclo de dois dias e meio ($0,5+1+0,5+0,5$). Esse esquema possibilita um resultado mais significativo em termos de estoque em processo, utilização dos centros produtivos e *lead-time* de produção comparado com a utilização do PBC convencional. Os períodos para todos os centros de trabalho seriam iguais gerando um tempo de ciclo igual quatro dias ($1+1+1+1$).

Nesse caso, o SPBC em um ambiente de manufatura com alta diversidade de produtos consegue obter vantagens sobre o PBC em termos de: redução do tempo de resposta ao cliente e redução dos estoques tanto em processo como de produtos acabados. Devido à organização em listas, consegue-se comparar facilmente as informações dos resultados realizados da produção com os objetivos esperados pela fábrica para tomar as decisões de controle e melhoria da produção e do planejamento da produção.

Além da mudança estrutural apresentada acima, no nível de MPS, Fernandes (1991) utiliza um modelo iterativo e interativo para sua elaboração, em que, no primeiro momento, a alocação de produtos finais (pedidos) aos períodos do PBC tem como objetivo melhorar o fluxo de caixa da empresa. Na segunda etapa, realiza-se um refinamento do MPS verificando/alocando a carga de trabalho das células de manufatura e seus respectivos períodos. A implementação computacional desse sistema pode ser encontrada em Fernandes e Tahara (1996) ou em Tahara (1995).

Ao considerar uma maior complexidade do ambiente, Fernandes (1991) adaptou métodos já estabelecidos de *scheduling* para seu sistema utilizando como critérios de otimização: a) minimizar o tempo médio de permanência ou b) minimizar o tempo total de conclusão de todo o conjunto de peças. Detalhes da implementação computacional desses algoritmos podem ser obtidas nos trabalhos de Pacheco (1995) e de Fernandes e Pacheco (1996).

2.1.5. Aplicações e recomendações do sistema PBC

Trabalhos como Burbidge (1996), Burbidge (1985) e Benders (2010) fazem breve relato de aplicações e recomendações do PBC como, por exemplo, a clássica referência à produção de aviões *Spifire*. Porém, não há detalhamentos da aplicação e por isso, tais trabalhos são considerados nesta estratificação como trabalhos de citações ao sistema PBC. Por exemplo, Rajeshamet et al. (1982) apresentam que a Índia realizou investimentos na área de educação para alavancarem o crescimento do país através da tecnologia de grupo e do sistema PBC. No trabalho, os autores, relatam sucintamente melhorias em uma empresa automobilística na cidade de Chennai, antiga cidade de Madras. Os autores explicitam que a tecnologia de grupo com o PBC resultou na simplificação do planejamento da produção, simplificação do fluxo de materiais, redução do estoque em processo e aumento da satisfação dos operadores do chão de fábrica.

Borgen (1996) apresenta a implantação do sistema PBC em uma gráfica de jornais na Escandinávia. O autor destaca que esse sistema tem características muito interessantes como a facilidade de uso, facilidade para entendê-lo e implementá-lo computacionalmente utilizando planilhas eletrônicas. O autor foca sua pesquisa na coordenação das etapas do processo de produção de jornais precedentes a fase de impressão do jornal, como a venda de propagandas, produção do material editorial, esboço das propagandas, seleção e revisão editorial, inclusão das páginas de propaganda, impressão mestre e montagem na prensa. No trabalho, o autor estabelece que uma quantidade de texto seja estabelecida como o tamanho do lote e o sistema PBC sincroniza a transferência do lote entre os estágios produtivos em intervalos de tempos pré-determinados. Incertezas durante os estágios produtivos são absorvidas aumentando o tamanho do período de tempo do sistema PBC. O autor sugere para pequenas e médias empresas a implementação computacional por meio de planilhas eletrônicas. Porém, o autor sutilmente cita que muitos benefícios aconteceram com a implementação do sistema PBC na gráfica.

Zelenovic e Tesic (1988) trabalharam com uma amostra de 32 fábricas do segmento de engenharia (alta variedade, baixo volume, multi-ciclos e processamento em lote) na então Yugoslávia. O trabalho desses autores compara os resultados da utilização da tecnologia de grupo com sistema PBC ao desempenho das empresas Japonesas em termos de redução de estoque, produtividade, flexibilidade e redução do *lead-time*. Os autores relatam que, apesar do processo de implementação ser inicial nas empresas observadas, os resultados comparados aos valores inicialmente levantados antes da implementação indicam que os sistemas produtivos apresentaram significantes melhorias em seus resultados:

- a) Redução dos tempos de *setup* de 3 a 10 vezes;

- b) Redução do nível de estoque em processo de 2 a 4 vezes;
- c) Redução do tempo de atravessamento, de 2 a 5 vezes.

Yang e Jacobs (1992) compararam os sistemas PBC e MRP em ambientes *jobshop* com leiaute por processo e celular operando sob encomenda (*make-to-order*). Os pesquisadores concluíram que o sistema MRP é mais adequado para este ambiente (*job shop*) conflitando com os resultados apresentados no trabalho de Zelenovic e Tesic (1988) e corroborando os resultados do trabalho de New (1977). Porém, para ambientes mais repetitivos, os autores Yang e Jacobs recomendam o sistema PBC devido a sua simplicidade e, conseqüentemente, facilidade de uso.

Burbidge e Halsall (1994) apresentam os benefícios obtidos pela aplicação da Tecnologia de Grupo com o PBC em uma fábrica de produtos tubular automotivo. Os autores relatam que em dezoito meses houve aumento das vendas em 33%, a taxa de retorno sobre o investimento aumentou em 24%, houve uma redução de 86% do tempo de processamento, redução de 75% do tempo de *setup*, aumento da qualidade dos produtos, redução do estoque em 60% e um aumento de 12% no número de funcionários. O investimento inicial desembolsado para a implementação da Tecnologia de Grupo e implementação do sistema PBC teve retorno superior a três vezes apenas pelo investimento em estoques. Porém, os autores, não apresentam detalhamento da implementação do PBC e também não segmentam os resultados pela aplicação do PBC ou pela Tecnologia de Grupo.

Süer et al. (2009) focaram no carregamento e na programação de células de manufatura em uma empresa fabricante de sapatos através do uso do PBC. O trabalho foi desenvolvido em três fases: (i) cálculo do número de células necessárias para produção; (ii) desenvolvimento de procedimentos heurísticos para carregamento das células de manufatura e (iii) uma heurística simples e um modelo matemático para

programação das operações. No trabalho de Süer et al. (2009), os autores agruparam os produtos em família pela similaridade dos produtos conforme a célula gargalo (a injeção da sola) a qual tem maior complexidade de carregamento e de programação de operações. No final do trabalho, esses autores comparam os procedimentos heurísticos e matemáticos de carregamento e programação com o critério de desempenho *makespan* e exploram a inter-relação entre as decisões de carregamento e programação.

Silva e Fernandes (2008) apresentam uma proposta de sistema de controle da produção para regular o fluxo de materiais de pequenas e médias empresas fabricantes de calçados que adotam a política de atendimento à demanda RTO (*Resources-To-Order*) ou MTO (*Make-To-Order*), trabalhando com uma ampla variedade de produtos finais. Para entender a problemática do PCP nesse segmento, foram pesquisadas sete fábricas de calçados localizadas na cidade de Birigui-SP. A proposta concluiu que o sistema de coordenação de ordens mais adequado para tais empresas foi o sistema PBC e no mesmo trabalho os autores desenvolveram 3 modelos matemáticos para elaboração MPS e um método heurístico. Por fim, os autores recomendam um procedimento para sequenciar as ordens de produção. Detalhes da implementação computacional desse trabalho podem ser encontrados em Silva (2002).

Teixeira Jr. et al. (2006) desenvolveram um sistema de apoio à tomada de decisão para a programação da produção em fundições de mercado. Cabe ressaltar que estas empresas possuem alta variedade de produtos finais e possuem um ambiente produtivo por processo com características muito peculiares que influenciam o processo de programação da produção. A Figura 7 apresenta de forma simplificada o processo produtivo de uma fundição de mercado.

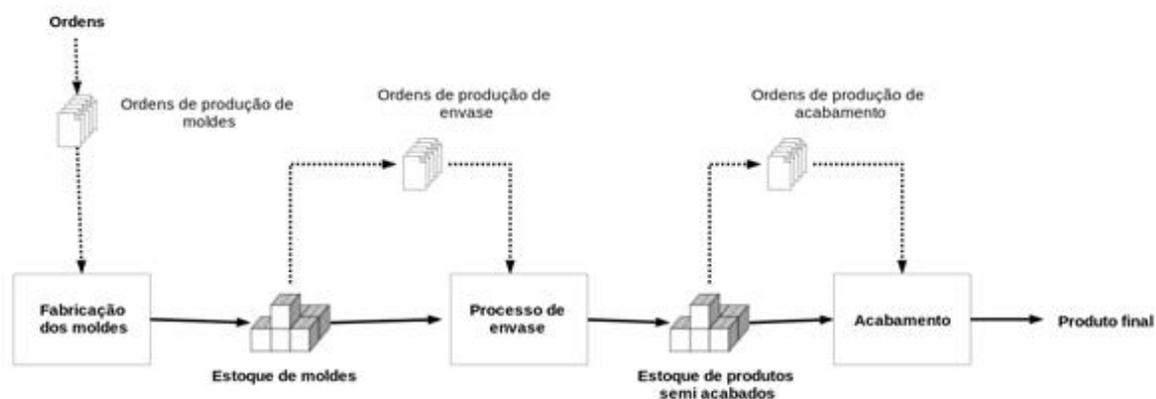


Figura 7: Processo típico de uma fundição de mercado
 Fonte: Adaptado de Teixeira Jr. et al. (2010).

O esquema da utilização do SCOs PBC em fundições de mercado de Teixeira Jr. et al. (2006) está ilustrado na Figura 8.

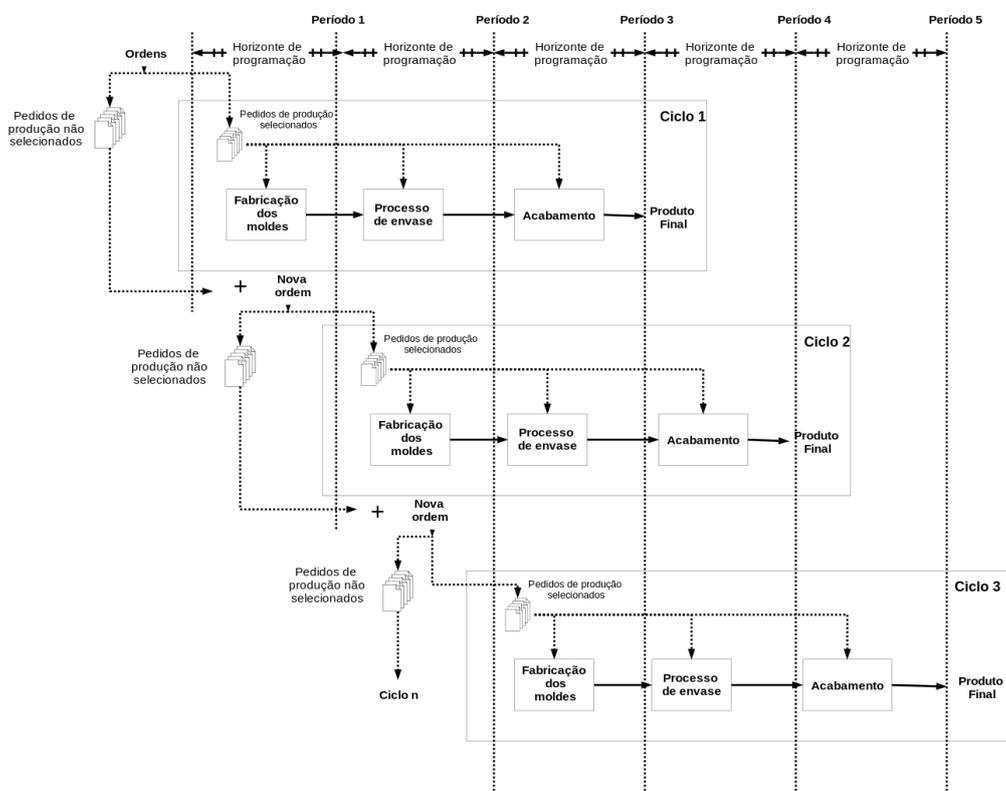


Figura 8: Funcionamento do sistema PBC em fundições de mercado
 Fonte: Adaptado de Teixeira Jr. et al. (2006).

O sistema de apoio à tomada de decisão de Teixeira Jr. et al. (2006) considera uma carteira de pedidos em aberto para elaborar o MPS e a programação de operações de forma integrada. Para isso, os autores criaram um modelo matemático utilizando programação inteira e fizeram três adaptações nesse modelo visando melhorias no desempenho do tempo computacional. Os autores também criaram dois métodos heurísticos, respectivamente, baseados nas metas-heurísticas *beam search* e algoritmo genético para incorporarem o sistema. Teixeira Jr. et al. (2010) compararam o modelo de programação inteira com um modelo simplificado/relaxado, reduzindo o número de variáveis e equações. O resultado encontrado pelo modelo relaxado pode ser utilizado de forma iterativa para encontrar uma solução que mais se aproxima da ótima do modelo matemático de programação inteira considerando um tempo computacional viável. Os modelos demonstraram-se robustos e viáveis para situações análogas às situações reais do setor analisado.

Severino et al. (2010) apresentam uma proposta de utilização do sistema PBC para reduzir o *lead-time* de produção em uma empresa de bens de capital. Para adaptar o arranjo físico funcional da fábrica ao sistema PBC, em especial, adequar a variabilidade do sistema produtivo ao sistema PBC, os autores criaram células virtuais compartilhando/dedicando os recursos entre os produtos. Com a implementação dessa proposta, os autores estimaram uma redução de 46,42% no *lead-time* do produto estudado, com redução de 208 dias, e redução do estoque em processo em 50%.

Fernandes et al. (2012) apresentam uma proposta de um método para atingir a manufatura responsiva na indústria de calçados. No contexto da alta variedade de produtos feitos sob encomenda e tendo como fator crítico de sucesso o tempo de resposta ao cliente. Os autores desse trabalho apresentam uma proposta detalhada

considerando oito procedimentos. Fernandes et al. (2012), no procedimento cinco, sugerem a escolha do SCOs PBC como adequado para as empresas calçadistas do estudo, no procedimento 6, a elaboração de um MPS compatível com o SCOs adotado.

2.1.6. Análises e síntese dos trabalhos sob PBC

Nesta tese foram encontrados 48 trabalhos científicos que faziam referência ao sistema PBC. Os trabalhos foram estratificados da seguinte forma:

- Citações: No decorrer do texto o(s) autor(es) citaram o sistema PBC mas não utilizaram o sistema no trabalho. Nesses casos, há uma referência ao sistema PBC, como por exemplo, o trabalho de Hameri (2011) que foca a pesquisa na aplicação da técnica de análise de fluxo de produção ao segmento de serviços.
- Conceitual: A essa categoria foram atribuídos os trabalhos que se dedicam a comparar ou a explicar conceitualmente o sistema PBC. Como é o caso do trabalho de Yang e Jacobs (1992) que compararam, por simulação, o comportamento de sistemas de produção intermitentes com coordenação realizadas pelo PBC e pelo MRP.
- Aplicação: Classificou-se como trabalho de aplicação aqueles que trouxeram relatos detalhados da implementação do sistema PBC em um ambiente produtivo. Por exemplo, o trabalho de Silva e Fernandes (2002), que apresentam detalhadamente a aplicação do sistema PBC em empresas fabricantes de calçados.
- Melhorias: Os trabalhos de melhorias foram classificados em três subgrupos:

- Melhorias no Projeto do PBC: São trabalhos que propõem alteração na estrutura clássica do PBC, como por exemplo, Fernandes (1991) com a adaptação do PBC para ambientes semi-repetitivos ou estudos que propõem formas mais sofisticadas para determinar os parâmetros da estrutura original do PBC, por exemplo, Riezebos (1997), que elaborou um método para determinar o tamanho dos períodos do sistema PBC que resulte no menor custo de produção.

- Programação de Operações: São trabalhos que elaboraram um método de programação de operações para ambientes controlados pelo PBC, por exemplo Burbidge (1988), que apresenta regras simples para programação das operações em ambientes controlados pelo PBC.

- MPS: Trabalhos que consideram detalhes do funcionamento do sistema PBC e as restrições do sistema produtivo para elaborar o MPS, como exemplo o trabalho de Silva e Fernandes (2002), que desenvolveram modelos matemáticos e um método heurístico para elaborar o MPS objetivando o balanceamento da capacidade produtiva entre os estágios de produtivos.

Conforme classificação apresentada acima, o

Quadro 3 apresenta um resumo detalhado da estratificação conceitual de todos os trabalhos encontrados envolvendo o sistema PBC.

Quadro 3: Estratificação das bibliografias PBC

Trabalho	Citações	Conceitual	Aplicação	Melhorias		
				Projeto	Programa Operações	MPS
Burbidge(1975)	-	X	-	-	-	-
New (1977)	-	X	-	-	-	-
Burbidge (1981)	-	X	-	-	-	-
Hyer e Wemmerlov (1982)	-	X	-	-	-	-
Rajesham et al. (1982)	X	-	-	-	-	-
Dale e Russel (1983)	X	-	-	-	-	-
Burbidge (1985)	X	-	-	-	-	-
Lee (1985)	-	X	-	X	X	-
Pels (1985)	X	-	-	-	-	-
Burbidge et al. (1987)	X	-	-	-	-	-
Burbidge (1988)	-	X	-	-	X	-
Zelenovic e Tesic (1988)	-	X	Empresas de Engenharia	-	-	-
Burbidge (1989)	X	-	-	-	-	-
Burbidge et al.(1989)	X	-	-	-	-	-
Burbidge(1990)		X	-	-	-	-
Fernandes (1991)	-	X	-	X	X	X
Yang e Jacobs (1992)	-	X	-	-	-	-
Burbidge e Halsall (1994)	X	-	Metalúrgica	-	-	-
Burbidge(1994)	-	X	-	-	-	-
Cho et al. (1994)	X	-	-	-	-	-
Steele e Malhotra (1994)	-	X	-	X	-	-
Kaku e Krajewski (1995)	-	X	-	X	-	-
Pacheco (1995)	-	X	-	X	X	
Tahara (1995)	-	X	-	-	-	X
Borgen (1996)	-	X	Produção de jornais	-	-	-
Burbidge (1996)	-	X	-	-	-	-
Fernandes e Pacheco (1996)	-	X	-	X	X	-
Fernandes e Tahara (1996)	-	X	-	-	-	X
Rachamadugu e Tu (1997)	-	X	-	-	-	-
Riezebos (1997)	-	X	-	X	-	-

Trabalho	Citações	Conceitual	Aplicação	Melhorias		
				Projeto	Programa Operações	MPS
Steele e Malhotra (1997)	-	X	-	X	-	-
Towill (1997)	-	X	-	-	-	-
Steele (1998)	-	X	-	-	-	-
MacCarthy e Fernandes (2000)	X	-	-	-	-	-
Riezebos (2000)	-	X	-	X	-	-
Benders e Riezebos (2002)	-	X	-	-	-	-
Teixeira Jr. et al. (2006)	-	X	Fundições de Mercado	-	X	X
Fernandes e Godinho Filho (2007)	X	-	-	-	-	-
Silva e Fernandes (2008)	-	-	Calçados	-	X	X
Süer et al. (2009)	-	-	Calçados	-	X	-
Benders (2010)	-	X	-	-	-	-
Fernandes e Godinho Filho (2010)	-	X	-	-	-	-
Riezebos (2010)	-	X	-	-	X	-
Severino et al.(2010)	-	-	Bens de Capital	X	-	-
Teixeira Jr. et al. (2010)	-	-	Fundições de Mercado	-	X	X
Hameri (2011)	X	-	-	-	-	-
Riezebos (2011)	-	X	-	-	X	-
Fernandes et al. (2012)	-	-	Calçados	X	-	-

Agrupando os trabalhos publicados por decênio (Tabela 1) pode-se observar que da década de 1970 até os dias atuais existem poucas publicações sobre o sistema PBC (48 publicações) quando comparado a outros sistemas como o MRP ou o Kanban. Essa constatação corrobora com a afirmação de Burbidge (1985) que seu inventor, Gigli, dedicou se pouco à divulgação do sistema PBC. Analisando os autores, apesar de não ser o inventor do PBC, Burbidge é a principal referência sobre o sistema PBC. Esta tese citou 11 trabalhos desse autor, desconsiderando as edições de seus livros e publicações de divulgação. Os trabalhos de Burbidge foram publicados entre as décadas

de 1970 até o final de 1990. Cabe ressaltar que os trabalhos de Burbidge são os mais referenciados na literatura. O segundo principal autor sobre o tema é Fernandes, que publicou 9 artigos envolvendo o sistema PBC, publicados entre 1991 até 2013.

Decênio	Publicações
1970	2
1980	12
1990	19
2000	7
2010	8
Total	48

Tabela 1: Agrupamento dos trabalhos por decênio

Realizando uma análise entre o

Quadro 3 (Estratificação das Bibliografias do PBC) e a Tabela 1 (Agrupamento dos trabalhos por decênio), nota-se que na década de 1970 apenas dois trabalhos conceituais foram publicados. Entretanto, na década de 1980 houve um crescimento significativo no interesse de acadêmicos sobre o sistema PBC, sendo que a maioria dos trabalhos fizeram apenas citação (7 trabalhos) ao sistema PBC. Tal situação sugere que nessa década o sistema estava sendo apresentado à comunidade científica. Percebe-se facilmente uma concentração do número absoluto de publicações do tema na década de 1990, com 19 trabalhos publicados. Nesse período, os trabalhos estavam focados na apresentação dos conceitos originais do PBC (16 trabalhos) e em melhorias no projeto (7 trabalhos), sugerindo que o conhecimento sobre o sistema estava “amadurecendo” na comunidade acadêmica. No próximo decênio (2000 e 2010) percebe-se que o número absoluto de trabalhos reduziu. Porém, considerando que, no momento em que essa revisão foi realizada, apenas 3 anos se passaram da década de 2010, entende-se que existe grande possibilidade de que este número de publicações aumente no restante

da década. A Tabela 2 apresenta resumidamente essa estratificação sobre os decênios e contextos das publicações.

Decênio	Citações	Conceitual	Aplicação	Projeto	Programa Operações	MPS
1970	0	2	0	0	0	0
1980	7	5	1	1	2	0
1990	2	16	2	7	3	3
2000	2	3	3	1	3	2
2010	1	1	3	2	3	1
Total	12	27	9	11	11	6

Tabela 2: Estratificação por contexto do artigo

Na estratificação, nota-se que os estudos dirigidos à melhoria do MPS no sistema PBC surgiram na década de 1990 (3 trabalhos) e o tema vem sendo pouco explorado pelos acadêmicos. Ao comparar os números de trabalhos que realizam melhorias ao PBC, nota-se que os trabalhos que envolvem o MPS são minoria (6 trabalhos de 25). Importante destacar que somente dois trabalhos realizam o MPS de forma integrada com a programação da produção dentro do sistema PBC: Teixeira Jr. et al. (2006) e Teixeira Jr. et al. (2010).

O trabalho de Kaku e Krajewski (1995) é o único trabalho que utiliza os dados de forma estocástica para definição dos períodos do PBC e Fernandes (1991) único trabalho que propõe alterações significativas no funcionamento clássico do PBC.

Além da indicação do sistema PBC para a Tecnologia de Grupo, notou-se crescimento na utilização do PBC em empresas que buscam a implementação da Manufatura Responsiva conforme por ser visto em Severino et al. (2010) e Fernandes et al. (2012).

Os autores que mais publicaram sobre o tema estão John L. Burbidge, Flávio C. F. Fernandes e Jan Riezebos.

Após as análises realizadas, percebe-se que o sistema PBC ainda é alvo de estudos acadêmicos. Os dados obtidos sugerem que existe um amadurecimento no tema, que permite trabalhos voltados à aplicação dos conceitos (por exemplo, ver em Fernandes et al. (2003, Severino, 2010)). Nesse sentido, entende-se que o presente trabalho se insere nesse movimento da pesquisa de PBC, ao propor melhorias da elaboração do MPS para o PBC, integrando flexibilidade da capacidade produtiva e programação de operações.

2.2. A Técnica *Iterated Greedy*

Quando se trata de algoritmos para a resolução de problemas combinatórios, a literatura aborda dois conjuntos distintos de heurísticas que, embora não garantam soluções ótimas, trazem resultados bons em um tempo computacional aceitável: algoritmos construtivos, que geram uma nova solução baseada em regras pré-estabelecidas e algoritmos de melhoria, que melhoram iterativamente um conjunto resposta de um problema.

Adicionalmente, meta-heurísticas se apresentam como uma alternativa de desenvolvimento de técnicas de resolução de problemas combinatórios. As meta-heurísticas agem como padrões de implementação, que são adaptadas para a resolução de diversos problemas. Como exemplos de meta-heurísticas, temos o Algoritmos Genético (*Genetic Algorithms* - GA - ver, por exemplo, Goldberg (1989) e Kimms (1999)), a Otimização por Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization* - PSO - ver por exemplo: Clerc (2006) e Kennedy (2010)), Otimização por Colônia de Formigas (Ant

Colony Optimization - ACO - ver por exemplo: Dorigo et al. (1996) e Tavares Neto (2010)).

Nesse sentido, uma meta-heurística que vêm se mostrando eficaz, simples e rápida para a resolução de problemas combinatórios é o *Iterated Greedy* (IG). O *IGreedy* vem sendo aplicado em diversos problemas como o problema de mochila múltipla (*Multiple Knapsacks* - Garcia-Martinez et al. (2014)), minimização de atraso total e atraso total ponderado em máquina única com *setup* dependente de sequência (YING et al., 2009), problemas de sequenciamento da produção em ambientes *flowshop* como visto nos trabalhos de Ruiz e Stutzle (2007), Ruiz e Stutzle (2008), Pan et al. (2008) entre outros e minimização do *makespan* em ambiente de máquinas paralelas não relacionadas (FANJUL-PEYRO; RUIZ, 2010)

Essa técnica se baseia fortemente na execução de algoritmos construtivos, normalmente de implementação simples e execução rápida, e é composta de 3 fases principais: inicialização, destruição e reconstrução.

Na fase de inicialização, uma solução inicial é gerada usando alguma técnica específica para o problema (normalmente uma heurística construtiva). Por exemplo, Ruiz e Stutzle (2007) se utilizam do algoritmo NEH (NAWAZ et al., 1983) para obter a solução inicial do problema de minimização do *makespan* em um ambiente de *flowshop* permutacional.

A fase de destruição consiste da remoção de um sub-conjunto dos elementos presentes na solução atual. A literatura traz um conjunto de estratégias para a desconstrução da solução (como por exemplo, RODRIGUEZ et al. (2013)). Porém, percebe-se que a estratégia de se remover de forma aleatória alguns elementos da solução é muito utilizada pela literatura (por exemplo, ver Ruiz e Stutzle (2007) e Ruiz e Stutzle

(2008)). Nesse sentido, é interessante perceber que Rodriguez et al. (2013) relatam que as heurísticas propostas para a destruição não conseguiram, em todos os casos de teste, superar a estratégia aleatória simples.

A fase de reconstrução é, em grande maioria, uma heurística construtiva simples. Por exemplo, Pan et al. (2008), Ruiz e Stutzle (2007) e Ruiz e Stutzle (2008) se basearam na heurística NEH; Fanjul-Peyro e Ruiz (2010), Ying et al. (2009) e outros derivaram algoritmos baseados em inserção.

Adicionalmente, três etapas também são relatadas na literatura: a busca local, o critério de aceitação e o critério de parada.

A busca local consiste na aplicação de um algoritmo para melhorar uma solução já existente. Trabalhos publicados usando a técnica *Iterated Greedy* apontam o uso de algoritmos de busca local baseada em técnicas de inserção (por exemplo, ver Ruiz e Stutzle (2007), Pan et al. (2008) e Ruiz e Stutzle (2008)) e permutação (GARCIA-MARTINEZ et al., 2014). Embora seja sempre citado como um estágio opcional, todos os artigos analisados possuíam um estágio de busca local.

O critério de aceitação é responsável pela substituição da solução ótima encontrada. A estratégia mais direta para implementação desse estágio é um algoritmo guloso, que substitui a solução apenas em caso de melhoria. Essa estratégia, segundo Ruiz e Stutzle (2007), pode levar à estagnação prematura da solução. Em consequência disso, vários autores (por exemplo, Ruiz e Stutzle (2007), Ruiz e Stutzle (2008), Rodriguez et al. (2013), Pan et al. (2008)) se utilizam de uma abordagem onde uma função com componente aleatório ponderado permite que algumas soluções que não trazem melhoria sejam aceitas.

O critério de parada indica quantas iterações serão realizadas. São comuns na literatura que: (i) o algoritmo seja executado um número pré-determinado de vezes, ou (ii) o algoritmo seja executado até que uma quantidade pré-determinada de tempo computacional seja utilizado (YING et al., 2009).

O algoritmo pode ser então descrito da seguinte forma:

- Passo 1: Gere uma solução inicial usando, por exemplo, uma heurística construtiva e a estabeleça como solução atual.
- Passo 2: Desconstrua a solução atual, criando uma solução parcial com um conjunto de elementos removidos.
- Passo 3: Usando uma heurística construtiva, crie uma nova solução adicionando novos elementos na solução parcial. Essa será a nova solução.
- Passo 4 (opcional): Aplique um algoritmo de busca local para melhorar a nova solução.
- Passo 5: Respeitando o critério de aceitação, substitua a solução atual pela nova solução.
- Passo 6: Respeitando o critério de parada, termine o algoritmo ou volte ao Passo 2.

3 Proposta de modelos de programação da produção para ambientes de manufatura controlados pelo SCOs PBC e capacidade variável

3.1. Definição do problema

O desenvolvimento desta proposta é inspirado em trabalhos desenvolvidos do autor na elaboração do MPS como Silva e Fernandes (2008) e Fernandes et al. (2012) e em trabalhos da área de *scheduling* Fernandes et al. (2012) e Tavares Neto et al. (2013).

O problema consiste em determinar um MPS de um ambiente *make-to-order* operando com o SCOs PBC com N estágios produtivos. Esse MPS tem como objetivo minimizar o atraso total dos pedidos em carteira. Existe uma restrição de capacidade produtiva de cada estágio produtivo, em cada período, que deve ser respeitada. Cada pedido possui tempos de processamento relacionados a cada estágio produtivo. Quando um pedido é alocado em um centro de trabalho em um período, a capacidade produtiva em uso desse centro é subtraída conforme o tempo necessário de processamento do pedido/estágio produtivo. Seguindo a lógica do PBC, a alocação de um pedido em um período do MPS faz com o que os estágios produtivos anteriores do período sejam carregados. A Figura 9 exemplifica essa lógica. O período circulado representa o período no qual um conjunto de pedidos foi programado para estar disponível para entrega aos clientes.

Nesta tese, são abordadas três situações referentes à definição da capacidade produtiva: no primeiro caso, apresentado na seção 4.3, a capacidade é fixa e conhecida *a priori*. No segundo caso, apresentado na seção 4.4.1, parte da capacidade entre os estágios produtivos pode ser realocada em um mesmo período, devido à

realocação de funcionários polivalentes. No terceiro caso, apresentado na seção 4.4.2, supõe-se o uso de banco de horas, onde parte da capacidade de um estágio produtivo de um período pode ser migrada para outros períodos.

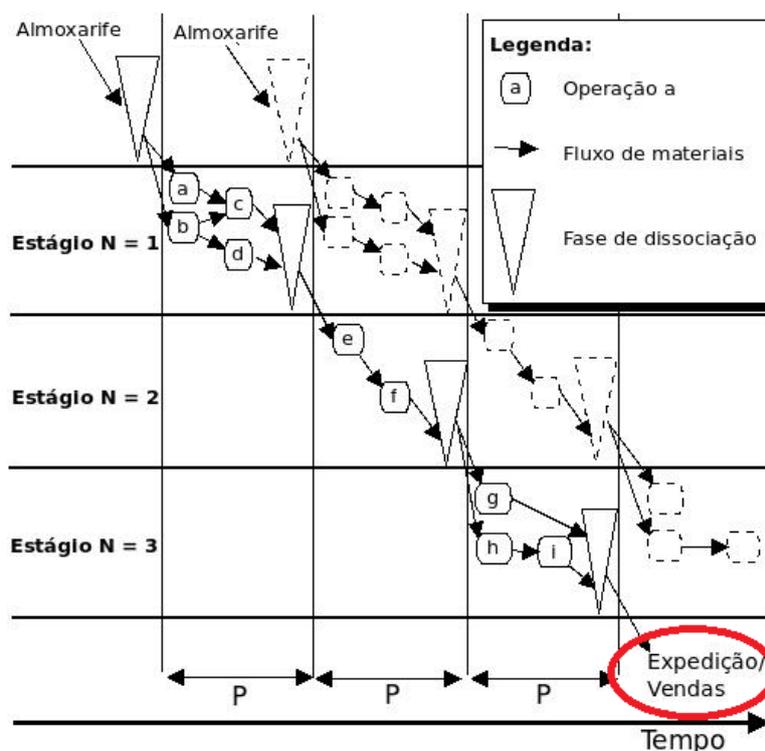


Figura 9- Programação da Produção utilizando o PBC
Adaptado de Benders e Riezebos (2002)

O restante do presente capítulo está dividido da seguinte forma: a seção 4.2 apresenta os símbolos utilizados no restante do capítulo; as seções 4.3 a 4.4 trazem o modelo MIP usado para definir o problema matematicamente e a(s) heurística(s) usada(s) para resolver os problemas.

3.2. Símbolos utilizados

Durante apresentação dos modelos e heurísticas são utilizados índices, parâmetros e variáveis. Esta seção apresenta todos os símbolos que são usados nesse capítulo para definir os problemas estudados:

3.2.1. Índices

c : número efetivo de ciclos da programação (não inclui o ciclo denominado de *buffer* de capacidade infinita)

P : número de pedidos;

N : número de estágios produtivos;

HP : tamanho do horizonte de programação em períodos;

$HP = N+c$;

T = Número total de trabalhadores polivalentes;

TC = Tempo Contratual permitido para compensação de banco de horas;

M : Número muito grande;

j : índice dos períodos de programação, $j = 1, 2, 3, \dots, HP$;

i : índice dos pedidos, $i = 1, 2, \dots, P$;

w : índice dos estágios produtivos, $w = 1, \dots, N$;

3.2.2. Parâmetros

TP_{iw} : Tempo de processamento do pedido i no setor produtivo w ;

CP_{wj} : Capacidade produtiva do setor w no período j ;

d_i : Data de entrega do pedido i ;

Inc_w : Aumento de capacidade para cada trabalhador alocado ao setor w ;

3.2.3. Variáveis Positivas

A_i : atraso do pedido i ;

CO_{wj} : Capacidade Ociosa do setor w no período j ;¹

COR_{wj} : Capacidade Ociosa Real do setor w no período j ;

CR_{wj} : Crédito de tempo do banco de horas do setor w no período j ;

CRR_{wj} : Crédito de tempo real do banco de horas;

¹ Para o modelo MIP3, a variável CO_{wj} tem o contexto diferente dos outros modelos. Ela representa a quantidade de tempo compensados pelo sistema de banco de horas.

3.2.4. Variáveis Binárias

$$y_j = \begin{cases} 1 & \text{se há pedido alocado ao período } j \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$k_{wj} = \begin{cases} 1 & \text{se houve crédito de tempo no banco de horas} \\ & \text{do setor produtivo } w \text{ no período } j \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se pedido } i \text{ for alocado ao MPS no período } j \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

3.2.5. Variáveis inteiras

Ntp_{wj} : Número de trabalhadores polivalentes alocados ao setor produtivo w no período j ;

3.3. O problema com capacidade constante

3.3.1. O modelo de programação linear mista MIP1

O modelo MIP1 é um modelo matemático que minimiza a capacidade ociosa dos setores produtivos controlados pelo sistema PBC, garantindo mínimo atraso total dos pedidos em carteira. Para isso são realizadas duas etapas: na primeira etapa, o modelo realiza a programação do MPS com a função objetivo de minimizar o atraso total dos pedidos. Na segunda etapa, três equações são adicionadas, sendo uma delas que o atraso total dos pedidos não seja superior ao valor encontrado na iteração anterior. O modelo MIP1 é composto pelas seguintes inequações:

$$(1) \quad \text{Min } \sum_i (A_i) = z1$$

Sujeito a:

$$(2) \quad \sum_j (x_{ij}) = 1, \forall i;$$

$$(3) \quad \sum_{j|j \leq N-1} (x_{ij}) = 0, \forall i;$$

$$(4) \quad \sum_i (TP_{iw} \cdot x_{ij}) + CO_{wj-(N-w)} = CP_{w,j-(N-w)}, \forall wj \mid N \leq j < HP;$$

$$(5) \quad A_i \geq j \cdot x_{ij} - d_i, \forall ij;$$

A equação 1 é a função objetivo da primeira etapa, a qual minimiza o total de atraso dos pedidos programados. A equação 2 garante que todo pedido será alocado a um e somente um período do PBC. A equação 3 garante que nenhum pedido será alocado em período menor do que a antecedência necessária para produção dos pedidos. A equação 4 garante a restrição de capacidade/carga de cada setor w em cada período j . Nessa equação a variável de folga $CO_{w,j}$ armazena a capacidade ociosa do setor produtivo w no período j em unidades de tempo. A inequação 5 determina o atraso de cada pedido i .

Na segunda etapa, a função objetivo da etapa 1, mostrada na equação 1, é substituída pela equação 6, a qual minimiza a somatória da capacidade ociosa real (COR). Essa variável foi incluída ao modelo para não penalizar a função objetivo quando a capacidade produtiva for superior a carteira de pedido. Nesse caso, a ociosidade não seria oriunda da qualidade da programação da produção, mas da falta de demanda. Ao modelo da primeira etapa, também são adicionadas as equações 7, 8 e 9. As equações 7 e 8 garantem que, se houver pedido alocado ao período (y_j), a variável correspondente a capacidade ociosa real (COR) será igual a capacidade ociosa (CO), caso contrário, a variável COR será zero. A equação 9 representa a inclusão do limitante superior à somatória de atraso dos pedidos. Desse modo, a segunda etapa otimiza a utilização da capacidade garantindo mínimo atraso total.

$$(6) \quad \text{Min } \sum_i (COR_{wj}) = z2$$

$$(7) \quad y_j * M \geq \sum_i x_{ij}, \forall j$$

$$(8) \quad COR_{wj-N-w} \geq CO_{wj-N-w} - M * (1 - y_j), \forall wj | N \leq j < \\ HP$$

$$(9) \quad \sum_i (A_i) \leq z1$$

Em suma, a primeira etapa tem como função objetivo a equação 1, sujeito as restrições das equações 2, 3, 4 e 5. A segunda etapa tem como função objetivo a equação 6, sujeito as restrições 2, 3, 4, 5, 7, 8 e 9. Com isso, o modelo analítico indicará a melhor solução de alocação dos pedidos em carteira aos períodos do MPS que garante o mínimo atraso total e maximiza a utilização da capacidade.

3.3.2. Heurísticas desenvolvidas para resolver o problema

3.3.2.1. Algoritmo Heurístico EDD Modificado

Como heurística construtiva para resolver o problema mencionado na seção anterior, utilizou-se de duas regras clássicas de *scheduling* denominada *EDD* (*Earliest Due Date*) e *LTP* (*Longest Processing Time*) para iniciar a ordenação dos pedidos em carteira. Essa regra de ordenação foi denominada nesta tese de EDD Modificado. Nessa regra, os pedidos são ordenados de forma crescente pela data de entrega e, no caso de empate, utiliza-se a regra LPT. A seguir, de forma simplificada, apresenta-se o algoritmo.

- (1) *Ordene os Pedidos pela regra EDD Modificada*
- (2) *Para cada Pedido não alocado faça*
- (3) *Período = Tempo de Ciclo*
- (4) *Enquanto Pedido não alocado e Período menor que Horizonte de Programação*
- (5) *Alocar pedido ao período*
- (6) *Se pedido não alocado*
- (7) *Período = Período + 1*
- (8) *Fim do enquanto*
- (9) *Fim do para*

Nesse algoritmo, a instrução da linha de número 5 – Alocar pedido ao período – realiza a operação de verificar a disponibilidade de cada setor produtivo, considerando sua antecipação em relação ao período de programação, para acolher a carga de trabalho do pedido atual e, em caso positivo, o pedido é alocado ao período atualizando o nível de capacidade de cada setor produtivo. O conjunto de comandos contidos entre as linhas de número 2 e 9 do algoritmo acima será encapsulada em um procedimento denominado de **Alocar Pedidos**.

O algoritmo construtivo apresentado, EDD modificado, é adotado na fase de inicialização dos algoritmos heurísticos baseados na meta-heurística *Iterated Greedy*, apresentados a seguir.

Como explicado na revisão bibliográfica, a meta-heurística *Iterated Greedy* é composta em 3 principais fases: i) inicialização, ii) destruição e iii) reconstrução. A fase inicialização fornece uma solução inicial ao problema, geralmente, baseado em um algoritmo construtivo específico para o problema. A fase de destruição consiste em destruir parte da solução inicial por meio da remoção de um subconjunto de

decisões da solução atual. A fase de reconstrução corresponde à inclusão de um novo subconjunto de decisões. O pseudo código *do Iterated Greedy* adotado nesse trabalho é mostrado a seguir:

- (1) *Inicialização: Solução Atual igual a alocação com o Algoritmo EDD modificado*
- (2) *Repita enquanto não alcançar a condição de parada*
- (3) *Destruir parte da Solução Atual utilizando método indicado*
- (4) *Reconstruir Nova Solução utilizando método indicado*
- (5) *Alocar Pedidos*
- (6) *Atualizar Soluções se houver melhorias*
- (7) *Fim do Repita*

No presente trabalho adotou-se como condição de parada para execução do algoritmo heurístico o número de iterações. Detalhes são apresentados no Capítulo 4. O critério de aceitação à nova solução é menor atraso total ou apresentar um menor atraso total igual ao da solução anterior com melhor aproveitamento da capacidade produtiva. Para as fases de destruição foram utilizados os seguintes métodos:

- Destruição **aleatória (D1)**: Do conjunto de Pedidos Programados, escolhe-se aleatoriamente, com chances iguais, um subconjunto de pedidos que será retirado da programação do MPS;

- Destruição **por maior tempo de processamento (D2)**: Entre os Pedidos Programados, remove o subconjunto de pedidos que mais utilizam capacidade produtiva.

Para a fase de Reconstrução foram elaborados os seguintes métodos:

- Reconstrução **aleatória (R1)**: Do conjunto de Pedidos Não Programados é escolhido, aleatoriamente com chances iguais de escolha, um pedido para ser programado ao período mais recente possível (*Batch First Fit*).

- Reconstrução **pelo menor tempo processamento (R2)**: Do conjunto de Pedidos Não Programados é escolhido o pedido com o menor tempo de processamento total para ser programado ao período mais recente possível.

- Reconstrução usando a regra **Batch First Fit (R3)**: Do conjunto de Pedidos Removidos, ordenados decrescente pelo tempo total de processamento, cada pedido é alocado ao período mais recente possível.

- Reconstrução usando a regra **Batch First Fit modificada (R4)**: Para cada pedido do conjunto de Pedidos Removidos, ordenados decrescentemente pelo tempo total de processamento, é alocado ao melhor período possível para reduzir o atraso: primeiramente, tenta-se uma programação para trás, tentando alocar o pedido no período mais tarde possível de forma que não ocorra atraso. Em caso de insucesso da programação para trás do pedido, é realizada a programação para frente, alocando o pedido no momento em que ocorre o menor atraso.

- Reconstrução priorizando **pedidos com maior carga no setor com maior capacidade remanescente (R5)**: Enquanto houver capacidade, busca-se entre os Pedidos Não Programados aquele que possui maior utilização de capacidade no setor de maior capacidade ociosa.

Com esses métodos elaborados, foram montados os seguintes procedimentos apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4- Heurísticas Iterated Greedy para o problema com capacidade constante

Nome	Inicialização	Destruição	Reconstrução
H1A	EDD Modificada	D1	R5
H1B	EDD Modificada	D1	R1
H1C	EDD Modificada	D2	R5
H1D	EDD Modificada	D2	R2
H1E	EDD Modificada	D1	R3
H1F	EDD Modificada	D1	R4
H1G	EDD Modificada	D1	R2

D1= Aleatória; D2 = Maior tempo de processamento; R1= Aleatório; R2 = menor tempo de processamento; R3= Batch First Fit; R4 = Batch First Fit Modificada; R5 = Pedidos com maior carga no setor com maior capacidade remanescente

Conforme testes computacionais apresentados no Capítulo 4, a heurística H1F demonstrou desempenho superior às demais com o conjunto de casos de testes realizado. Por isso, os métodos de destruição aleatório e de reconstrução de solução fechada *Batch First Fit* Modificada foram usadas como base para os casos com flexibilidade de capacidade por funcionários polivalentes e flexibilidade de capacidade por banco de horas.

3.4. O problema com capacidade flexível

3.4.1. O problema com capacidade considerando polivalência de funcionários

No contexto da MR apresentado no Capítulo 1, a flexibilização da capacidade é fator importante para lidar com alta diversidade de produtos. Uma das estratégias de flexibilização da capacidade é a inclusão de funcionários polivalentes, funcionários que são capazes de executar várias atividades distintas. Nesta estratégia, o presente trabalho supõe que existe um limite máximo de trabalhadores polivalentes, capazes de executar funções/operações em todos os estágios produtivos do PBC e assim flexibilizando a capacidade.

A utilização de funcionários polivalentes possibilita que a produção tenha flexibilidade de parte de sua capacidade entre os estágios produtivos dentro do mesmo período do SCOs PBC (como demonstra a veja Figura 1).

3.4.1.1. O modelo de programação linear mista MIP2

Para que o modelo MIP1 contemple a polivalência de funcionários, é necessário alterar a equação 4 do modelo MIP1 para a equação 10 e adicionar a equação 11. A equação 10 possibilita incremento da capacidade produtiva do setor w em j dependendo do número de funcionários polivalentes alocados ao setor w no período j . A equação 11 garante que todo funcionário polivalente será alocado a um setor w em cada período j .

$$(10) \quad \sum_i (TP_{iw} \cdot x_{ij}) + CO_{wj-(N-w)} = CP_{w,j-(N-w)} + \\ Inc_w \cdot Ntp_{wj-N-w}, \forall wj \mid N \leq j < HP;$$

$$(11) \quad \sum_w Ntp_{wj-N-w} = T, \forall j \mid j < HP$$

O parâmetro Inc_w indica quanto de capacidade é acrescida à capacidade nominal do setor para cada funcionário polivalente alocado. A variável Ntp_{wj} indica a alocação dos funcionários aos setores produtivos em cada período de produção. Os funcionários polivalentes não são alocados aos setores de períodos que não recebem carga de trabalho. Para situações em estado de regime, com produção vigente, é necessário atualizar os parâmetros do modelo indicando a quantidade de funcionário polivalente que poderá ser remanejado em cada período.

A iteração no modelo MIP2 ocorre da seguinte forma: i) na primeira iteração, o modelo é executado para reduzir o número total de pedidos atrasados com a

equação 1 como função objetivo sujeita às restrições impostas pelas equações: 2, 3, 5, 10 e 11; ii) na segunda iteração, a função objetivo é a equação 6, sujeito às restrições representadas pelas equações 2, 3, 5, 9, 10 e 11.

3.4.1.2. A heurística utilizada para resolver o problema considerando mão de obra polivalente

Utilizando a meta-heurística *Iterated Greedy*, em especial a heurística H1F, com fase de inicialização gerada pela EDD Modificada, fase de destruição de forma aleatória (D1) e reconstrução pela *Batch First Fit* Modificada, o presente algoritmo heurístico realiza a redução do atraso total de pedidos. Para cada período é realizada a alocação de todos os funcionários polivalentes aos estágios produtivos. Para cada funcionário alocado há um aumento da capacidade no setor produtivo o qual foi alocado e, nesse momento, é feita a elaboração do novo MPS utilizando a heurística H1F. O MPS com o menor atraso total de pedidos é utilizado como solução atual até a alocação do último funcionário no último período de programação. Nesse momento, o critério para atualização da solução atual é o mesmo da heurística H1F: menor atraso total ou menor atraso total igual ao da solução atual com a melhor utilização da capacidade, restrito ao conjunto de casos de testes utilizados no capítulo 4. Para alocação de funcionários aos setores produtivos é sempre escolhido aquele que tem a menor capacidade remanescente. A heurística que resolve o problema de otimização do atraso total utilizando polivalência é denominada de H2F1. Uma descrição da heurística H2F1 é apresentada a seguir:

- (1) *Para cada período*
- (2) *Para cada funcionário polivalente*
- (3) *Inicialização: Solução Atual igual a alocação com o Algoritmo EDD modificado*
- (4) *Repita enquanto não alcançar a condição de parada*
- (5) *Destruir parte da Solução Atual utilizando D1*
- (6) *Reconstruir Nova Solução utilizando R4*
- (7) *Alocar Pedidos*
- (8) *Atualizar Soluções se houver melhorias*
- (9) *Fim do Repita*
- (10) *Identificar setor com menor capacidade ociosa no período atual e alocar funcionário polivalente*
- (11) *Fim do para*
- (12) *Fim do para*

3.4.2. O problema utilizando banco de horas

Geralmente, por meio de acordo coletivo ou sindical é instituído o regime de banco de horas. O banco de horas permite a flexibilização da jornada de trabalho na qual, em um momento de baixa demanda, é possível reduzir a jornada de trabalho e conseqüentemente a capacidade produtiva para em momento futuro ser compensado conforme acordo prévio. Em outras palavras, a estratégia de banco de horas propicia que parte da capacidade do setor produtivo seja transferida entre períodos do PBC dentro do mesmo setor produtivo. Cabe ressaltar que essa estratégia é mais adequada quando o processo produtivo requer a utilização de mão-de-obra intensivo.

O regime de banco de horas tem limitações legais sobre a jornada de trabalho e tempo para liquidação/compensação do banco de horas. Para demandas que possuem flutuações essa estratégia é muito atraente.

3.4.2.1. Modelo matemático iterativo: MIP3

O modelo MIP1, para contemplar a utilização de banco de horas, precisa de ajustes na equação 4 para a equação 12. Essa alteração inclui variáveis de folga na equação de balanceamento de capacidade, ou seja, quando a carga de trabalho do setor w no período j for menor que a capacidade produtiva, haverá entrada de um crédito de horas de produção e quando a carga de trabalho do setor w no período j for maior que a capacidade produtiva, haverá uma compensação do banco de horas.

$$(12) \quad \sum_i (TP_{iw} \cdot x_{ij}) - \\ CR_{wj-(N-w)} + CO_{wj-(N-w)} = CP_{w,j-(N-w)}, \forall wj \mid N \leq \\ j < HP$$

A inclusão de duas variáveis de folga CR e CO , respectivamente, crédito e compensação do banco de horas exige para funcionamento do modelo a inclusão de novas restrições, necessidade de inclusão da equação 13, complementar a equação 7, para garantir que somente quando houver programação para o período j a variável binária y_j será 1.

$$(13) \quad y_j * M \leq \sum_i x_{ij}, \forall j$$

Também devido à inclusão de novas variáveis, é necessário substituir a equação 8 pelas equações 14 e 15 para garantir que o crédito do banco de horas será oriundo de períodos com demanda.

$$(14) \quad CRR_{wj-N-w} \geq CR_{wj-N-w} - M * (1 - y_j), \forall wj | N \leq j < HP$$

$$(15) \quad CRR_{wj-N-w} \leq CR_{wj-N-w} + M * (1 - y_j), \forall wj | N \leq j < HP$$

As inequações 16 e 17, disjuntivas, garantem que ocorrerá em um setor w no período j crédito no banco de horas ou compensação de horas.

$$(16) \quad CO_{wj-N-w} \leq M * (1 - k_{wj}), \forall wj | j < HP$$

$$(17) \quad CR_{wj-N-w} \leq M * k_{wj}, \forall wj | j < HP$$

A inequação 18 garante que o total de horas compensadas não ultrapassará o limite legal ou contratual, ou seja, há restrição de compensação máxima de horas, representada na equação pelo símbolo TC .

$$(18) \quad CO_{wj-N-w} \leq TC, \forall wj | N \leq j < HP$$

Para não haver pagamento de horas extras, neste trabalho foi incluída a restrição 19, que garante que as horas compensadas serão menores que o crédito de horas acumulado.

$$(19) \quad \sum_J CRR_{wj-N-w} \geq \sum_J CO_{wj-N-w}, \forall w$$

As inequações apresentadas acima compõem o modelo de programação inteira para minimizar o atraso total dos pedidos. Após a primeira iteração, minimização

do atraso total, a inequação 9 deve ser considerada e a equação 1 substituída pela equação 20, a qual minimiza a somatória das horas creditadas e das horas compensadas de cada setor produtivo.

$$(20) \quad \text{Min } \sum_{wj} (CRR_{wj-N-w} - CO_{wj-N-w}) = z2$$

Em resumo, o MIP3 é composto na primeira iteração da equação 1 como função objetivo sujeita às restrições impostas pelas equações: 2, 3, 5, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 e 19. A segunda iteração é composta pela a função objetivo representada na equação 20, sujeita às restrições: 2, 3, 5, 9, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 e 19.

3.4.2.2. A heurística utilizada para resolver o problema considerando banco de horas

Seguindo o desenvolvimento das outras heurísticas, a heurística que resolve o problema de minimização do atraso total com utilização de banco de horas (H3F1) utiliza a heurística H1F para realizar a alocação dos pedidos aos períodos. No final, passo 8, é realizada a compactação das horas remanescentes aos períodos iniciais da programação como compensação de horas. Em casos reais, caso seja necessária a utilização de mais horas de trabalho nos períodos finais, o decisor da programação da produção poderá optar por trabalhar com horas extras. Cabe ainda destacar que pequenas modificações são necessárias para adaptar o presente modelo para trabalhar sob o regime de horas extras. A descrição do algoritmo H3F1 é apresentada a seguir:

- (1) *Inicialização: Solução Atual igual a alocação com o Algoritmo EDD modificado*
- (2) *Repita enquanto não alcançar a condição de parada*
- (3) *Destruir parte da Solução Atual utilizando **DI***
- (4) *Reconstruir Nova Solução utilizando método **R4***
- (5) *Alocar Pedidos*
- (6) *Atualizar Soluções se houver melhorias*
- (7) *Fim do Repita*
- (8) *Ajustar Banco de Horas para Compensação em períodos mais cedo*
- (9) *Iniciar passo (1) até condição de parada*

3.5. Considerações finais

Este capítulo apresentou 3 modelos e 9 heurísticas para auxiliar o projeto de um sistema de apoio a tomada de decisão para ambientes que operam sob o SCOs PBC utilizando três políticas de capacidade fabril: (i) capacidade constante; (ii) capacidade com funcionários polivalentes e (iii) capacidade utilizando banco de horas.

Um modelo matemático e 7 heurísticas para programação da produção com capacidade produtiva constante. Um modelo matemático e uma heurística para programação da produção com capacidade produtiva variável por funcionários polivalentes e, por fim, um modelo matemático e uma heurística para programação da produção com capacidade produtiva variável por utilização de banco-de-horas.

A seguir, são mostrados os resultados obtidos após a implementação e execução dos modelos e heurísticas descritas.

4 Resultados obtidos

4.1. Introdução

Infelizmente, a revisão bibliográfica realizada não revelou nenhum conjunto de casos de teste que pudesse ser utilizado neste trabalho. Assim sendo, para analisar o comportamento dos modelos de programação matemática e das heurísticas propostas, foram gerados casos de teste com $n = 30, 50, 100, 200$ ou 300 pedidos em carteira e $w = 3, 5$ ou 7 (estágios produtivos). Os períodos de programação para os casos de teste foram 2 e 4 períodos a frente. Para cada combinação desses parâmetros gerou-se 10 casos de testes, totalizando um conjunto 300 casos de teste.

Para esse conjunto, as características de cada ordem de serviço foram geradas conforme especificado no Quadro 5. Nessa tabela, o termo $\text{RandInt}(a,b)$ se refere a uma função que escolhe, através de uma distribuição uniforme, um número inteiro entre os valores a e b . A capacidade produtiva de cada estágio foi estabelecida como 8 horas/período.

Quadro 5- Parâmetros e Especificações dos casos de teste

Parâmetro	Especificação
Tempo de processamento em cada estágio produtivo em minutos	$\text{RandInt}(5, 20)$
Data de entrega	$\text{RandInt}(w,j)$

Todas os 300 casos de teste tiveram seus respectivos modelos implementados no software GAMS usando o *solver* CPLEX 12.5.0.1. Foram usadas as configurações padrão do GAMS/CPLEX com um limitante de 90 minutos para cada execução do *solver*. O *solver* foi executado em um microcomputador com processador

Pentium i7 com 8 gigabytes de memória RAM utilizando o sistema operacional Windows 8.

As heurísticas foram executadas em um microcomputador com processador i3 com 4 gigabytes de memória RAM utilizando o sistema operacional Windows 7. O tempo de execução das heurísticas foram menores de um minuto.

Neste trabalho tomou-se o cuidado de utilizar a mesma base de dados em todos os modelos (carteira de pedidos, número de estágios produtivos, número de períodos de programação e capacidade produtiva). Para utilização em todos os modelos matemáticos e heurísticas foram realizados pequenos ajustes. Para o problema com capacidade flexível por polivalência, foi considerado que haveria um funcionário polivalente para cada setor produtivo com capacidade produtiva igual a 10% da capacidade produtiva do setor, ou seja, neste caso, a capacidade produtiva de cada setor produtivo pode ser remanejada em 10% entre os demais setores produtivos.

Do mesmo modo, para o problema com capacidade flexível com banco de horas, foi estipulado que cada setor produtivo teria o limite de 10% de aumento da capacidade por compensação de horas e que não seriam pagas horas extras no final do planejamento, ou seja, a quantidade de horas em crédito seria sempre igual ou superior as horas compensadas.

4.2. Análises para o problema 1

Conforme mencionado no capítulo 3, as 7 heurísticas foram implementadas utilizando a linguagem de programação C++. As heurísticas que possuem comportamentos estocásticos foram executadas 30 vezes, e as melhores soluções foram obtidas. Foram testados os conjuntos de parâmetros mostrados no Quadro 6 em um

conjunto de 5 casos de teste de tamanho médio (100 ordens de serviço) e o conjunto de parâmetros que trouxeram os melhores resultados foram escolhidos. O Quadro 6 também mostra os parâmetros usados.

Quadro 6- Teste dos Parâmetros das heurísticas

Parâmetros	Valores testados	Valor escolhido
Número de iterações	100, 1000, 10000 e 100000	10000
% Destruição da solução atual	10%, 20%, 40% e 50%	20%

Os casos de teste foram executadas, e dois parâmetros foram obtidos:

(i) o *gap* do atraso, definido como (atraso obtido pela heurística – atraso obtido pelo GAMS/CPLEX) / (atraso obtido pelo GAMS/CPLEX + 1); e (ii) o *gap* do total de capacidade remanescente de cada período, definido como (capacidade remanescente obtida pela heurística – capacidade remanescente obtida pelo GAMS/CPLEX) / (capacidade remanescente obtida pelo GAMS/CPLEX + 1). Os resultados apresentados na Tabela 3 referem-se a média do *gap* de atraso e do desvio padrão do *gap* em percentuais.

	Atraso		Capacidade Ociosa	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
EDD	0,058	0,079	123,21	2022,02
H1A	0,058	0,079	123,18	2022,12
H1B	0,058	0,079	122,61	2017,71
H1C	0,055	0,076	114,69	1909,18
H1D	0,046	0,075	119,06	1972,08
H1E	0,055	0,077	94,53	1635,08
H1F	0,041	0,058	62,21	1042,89
H1G	0,058	0,078	120,40	2005,86

Tabela 3- Análise das heurísticas para o problema 1 - Média e Desvio Padrão

Conforme Figura 10 e Tabela 12, de todas as estratégias propostas para a resolução desse problema, a heurística H1F se mostrou mais eficiente tanto em termos de redução do atraso total quanto ao melhor aproveitamento da capacidade produtiva. Os dados apresentados refletem o desvio em percentuais do resultado obtido pelo modelo exato.

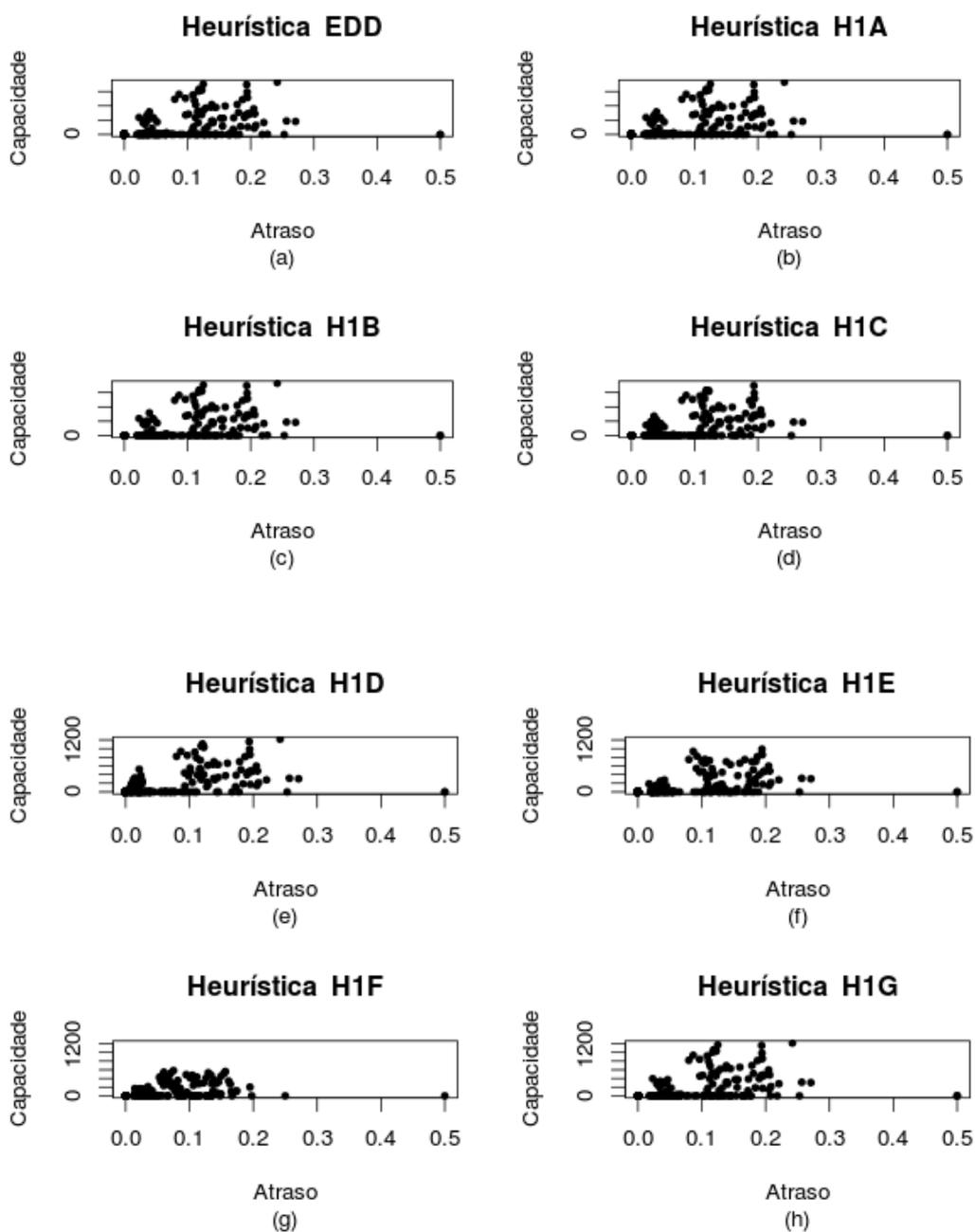


Figura 10- Análise da execução das heurísticas do problema 1

Nota-se, ao comparar o desempenho da heurística EDD com as heurísticas H1A, H1B, H1C, H1E e H1G em termos de atraso total e utilização da capacidade, que a regra EDD mostrou-se bastante robusta: considerando o número de iterações realizados pelas heurísticas H1A, H1B, H1C, H1E e H1G, percebe-se que ocorreu uma melhora muito pequena na solução inicial. Entende-se isso como um indicativo de que a heurística construtiva EDD modificada está adequada ao processo de inicialização dos métodos heurísticos.

As análises dos atrasos encontrados por cada heurística são mostradas na Figura 11. Em tal figura, percebe-se claramente que as heurísticas H1D e H1F possibilitaram uma maior redução de atraso.

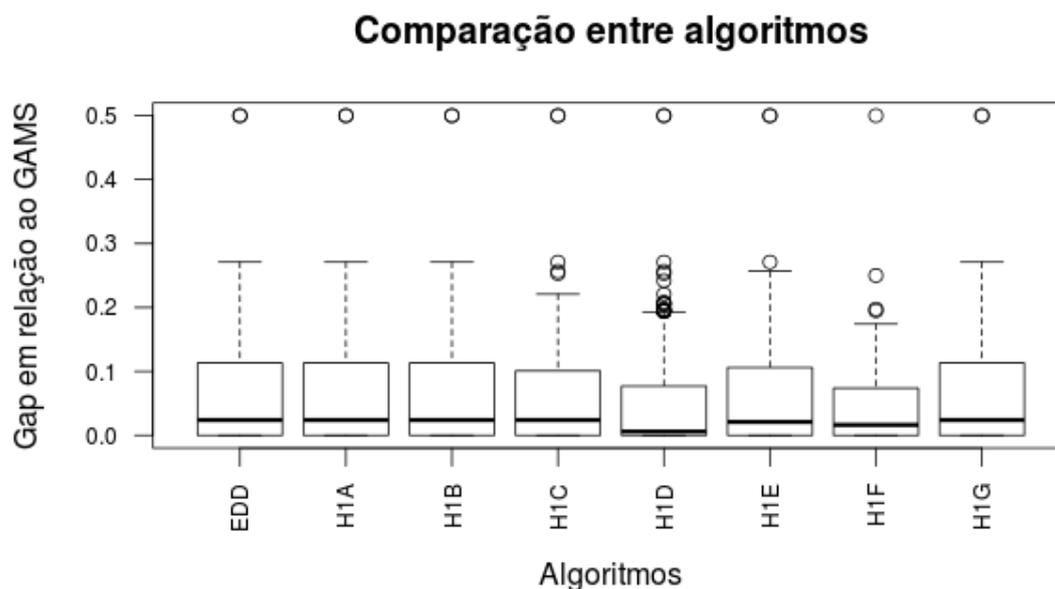


Figura 11- Comparação entre os algoritmos para o problema 1 em termos de atraso total

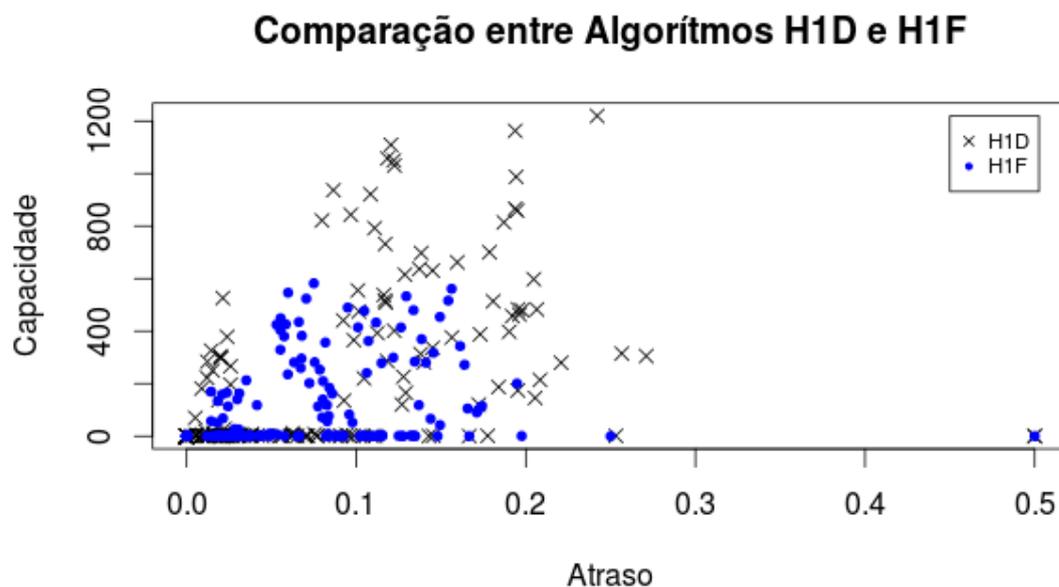


Figura 12- Comparação entre os Algoritmos H1D E H1F

Na Figura 12, percebe-se que a heurística H1D apresentou uma maior dificuldade com o uso da capacidade instalada quando comparado com a heurística H1F. Ao comparar a utilização da capacidade da heurística H1D com a heurística de inicialização (EDD), evidencia-se que a melhora desta heurística foi significativa em termos do atraso total (Figura 10).

Para as heurísticas H1D e H1F, foram também traçados gráficos mostrando o atraso/uso da capacidade conforme o tamanho da instância (Figura 13 e Figura 14). Analisando esses gráficos, percebe-se que, para problemas maiores, os dois algoritmos obtiveram uma maior ociosidade (ou seja, maior quantidade de capacidade ociosa).

Análise do comportamento do algoritmo conforme os tamanhos das instâncias (H1D)

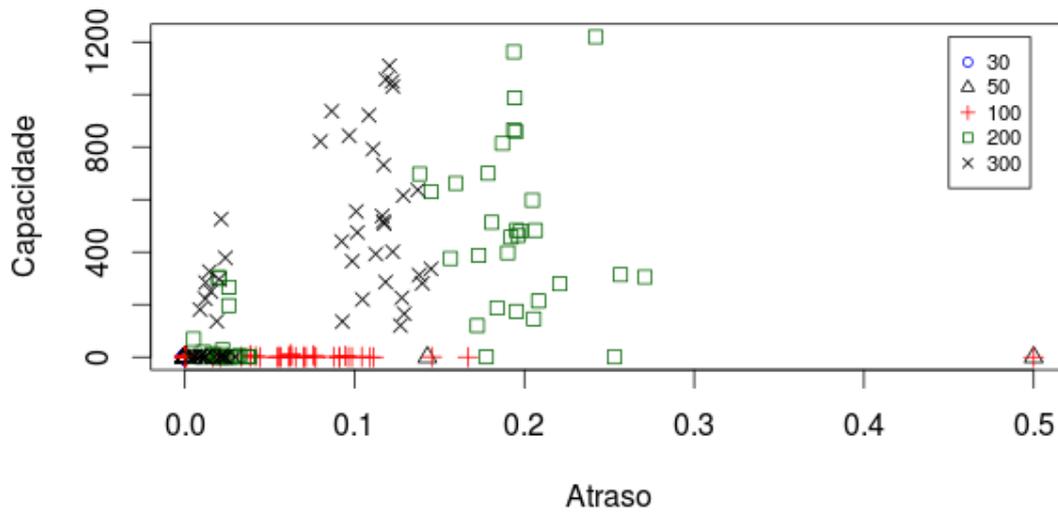


Figura 13- Análise do comportamento do algoritmo conforme os tamanhos dos casos de teste (H1D)

Análise do comportamento do algoritmo conforme os tamanhos das instâncias (H1F)

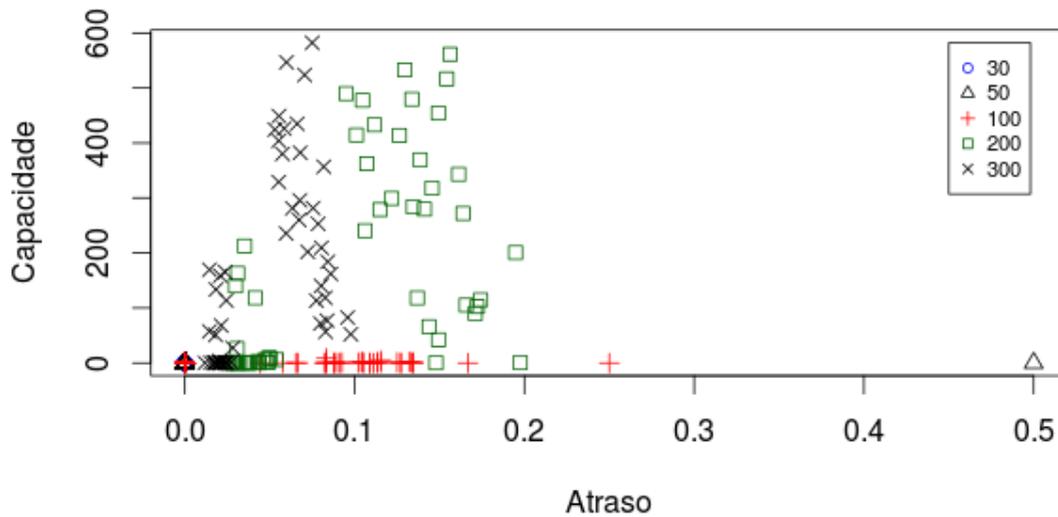


Figura 14 -Análise do comportamento do algoritmo conforme os tamanhos dos casos de teste (H1F)

Ao analisar as Figura 13 e Figura 14, nota-se que o atraso total para os casos de teste com 300 pedidos foi menor ao comparar com o atraso total dos casos de teste com 200 pedidos.

4.3. Análises realizadas para o problema

Para esse problema, aplicou-se a heurística H2F1 descrita na seção 4.4.1.2. Inicialmente, seus valores foram normalizados de acordo com os resultados obtidos pelo modelo de programação matemática descrito na seção 4.4.1.1. Os resultados são mostrados na Figura 15, que identifica o tamanho dos casos de teste. Nesse gráfico, percebe-se que o algoritmo teve mais dificuldade em usar o total da capacidade nas programações referentes aos casos de teste com 200 e 300 pedidos.

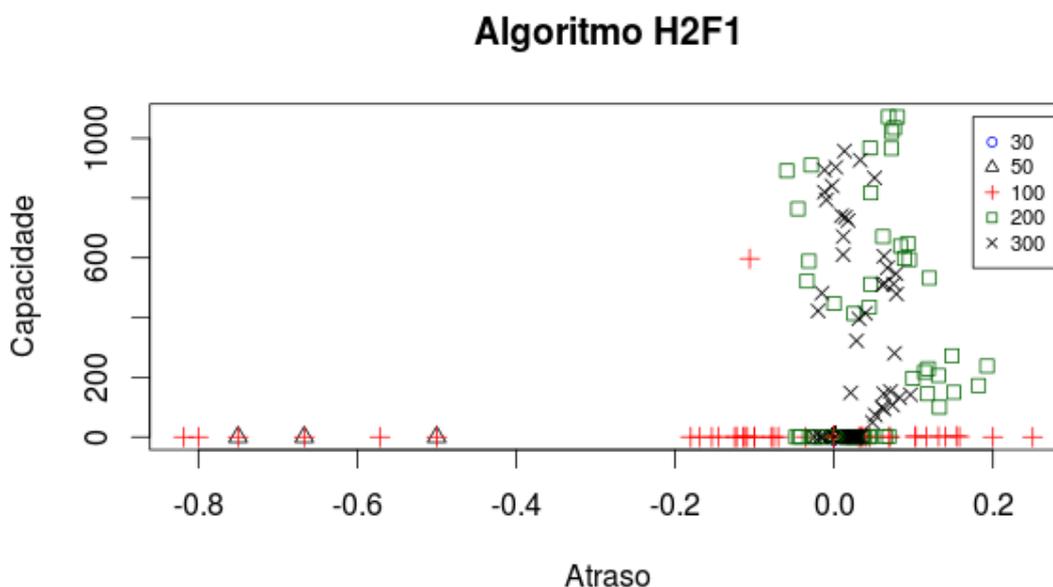


Figura 15-Desempenho do algoritmo H2F1

Comparando todos os valores de GAP das heurísticas H1D, H1F e H2F1 encontrados até o momento, conforme apresentados na Figura 16, percebe-se que o algoritmo H2F1 conseguiu encontrar atrasos menores que os demais. O GAP em tal

caso foi calculado em relação aos resultados encontrados pelos respectivos modelos matemáticos.

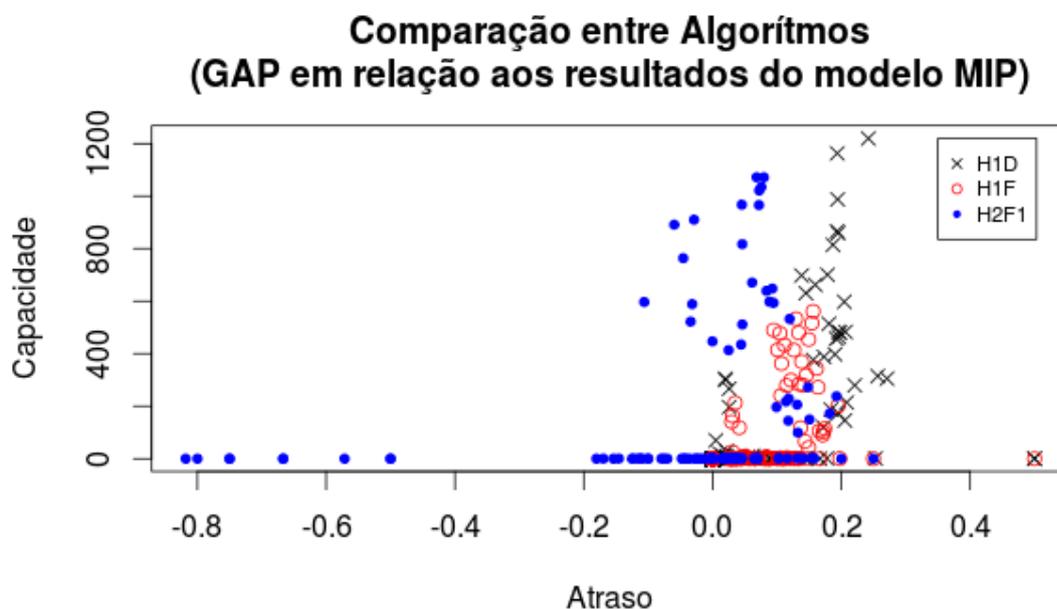


Figura 16- Comparação entre Algoritmos H1D, H1F e H2F1

4.4. Análises realizadas para o problema 3

De forma similar ao que foi realizado com o problema 2, a Figura 17 mostra os *gaps* de atraso e capacidade resultantes da execução do algoritmo H3F1 em relação ao modelo MIP3. Assim como os demais modelos, como houve uma limitação do tempo de execução do modelo MIP3, os resultados por ele obtidos não são ótimos, o que explica a existência de *gaps* negativos (são os casos onde a heurística H3F1 obteve melhores resultados que o modelo MIP3). Percebe-se que, para problemas de tamanho 30, 50 e 100, o uso da capacidade da heurística é muito próximo ao obtido pelo GAMS. O atraso médio é muito próximo de zero. A dispersão do atraso de casos de teste de

tamanho 200 é menor que os demais, e a grande maioria dos atrasos está entre -85% e pouco menos de 50% do valor obtido pelo GAMS.

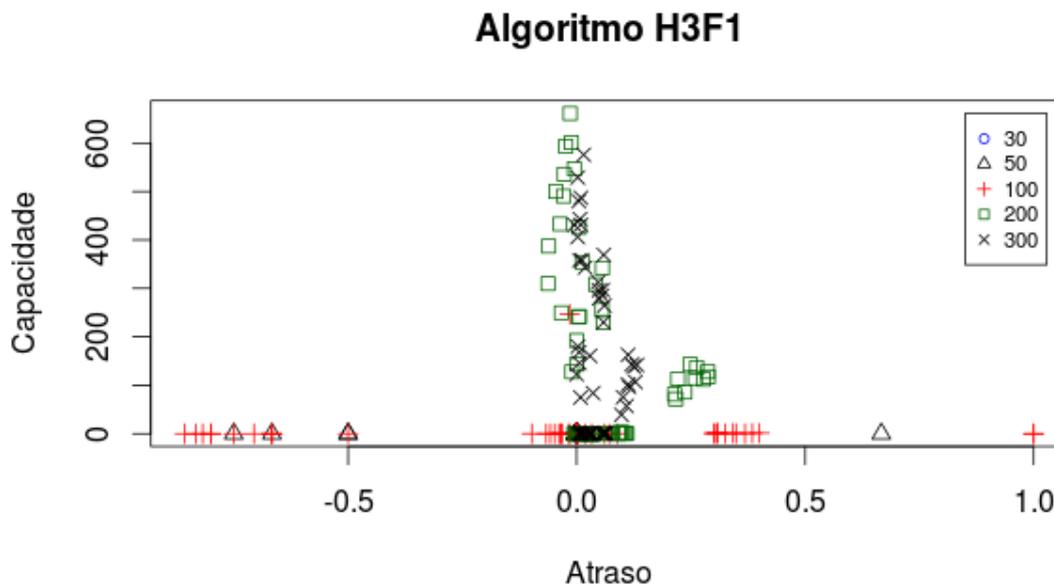


Figura 17- Resultado do Algoritmo H3F1 comparado ao modelo matemático

4.5. Considerações Finais do Capítulo

Este capítulo apresentou os resultados e análises obtidos com a execução dos modelos matemáticos e das heurísticas para os três problemas abordados nesta pesquisa. Percebeu-se que os algoritmos desenvolvidos conseguiram resultados próximos aos resultados obtidos com a programação matemática. Em alguns casos, a solução da heurística foi superior à solução do GAMS, fato esse explicado quando se observa que foi estabelecido um limitante no tempo máximo de processamento do modelo matemático.

5 Considerações finais

Este trabalho apresentou três cenários de alocação de pedidos aos períodos do MPS para ambientes de manufatura controlados pelo sistema PBC. Em um primeiro cenário, mais próximo da literatura existente, as capacidades dos setores produtivos são consideradas constantes. No segundo cenário, considera-se que um subconjunto de trabalhadores é polivalente. Em termos de PCP, isso significa que parte da capacidade produtiva de um estágio produtivo pode ser remanejada entre os centros produtivos dentro do mesmo período de programação. No terceiro cenário abordado por esta pesquisa, considera-se a existência de banco de horas, que permite a transferência de capacidade produtiva entre períodos do mesmo estágio produtivo.

Para abordar estes três problemas, foi realizada uma revisão exaustiva da literatura, conforme apresentada no capítulo 2. Em tal revisão, não foi encontrada nenhuma referência aos problemas com capacidade produtiva variável propostos nesta tese. Mais ainda, não detectou-se nenhuma abordagem baseada em modelos matemáticos ou heurísticas utilizando a técnica *Iterated Greedy*. Tais abordagens, propostas nesta tese, são mostradas no capítulo 3.

A revisão bibliográfica evidencia que o PBC possui características desejáveis ao contexto das novas estratégias de manufatura mencionadas anteriormente, como a simplicidade, baixo custo de implementação, *lead-time* de produção constante e planejado e facilidade de sincronia do fluxo de materiais entre estágios produtivos na manufatura celular. Percebe-se também que há escassez de referências na literatura sobre o tema (48 referências encontradas). A maior parte das referências são citações ou são de trabalhos conceituais. Há poucos relatos de aplicações do PBC (9 trabalhos).

Com relação às heurísticas, o primeiro problema foi alvo de um conjunto de algoritmos de comportamento determinístico e estocástico. Percebeu-se que a combinação de elementos estocásticos e determinísticos, baseado na técnica *Iterated Greedy* (destruição aleatória da solução atual e uso de diferentes heurísticas construtivas), em alguns casos trouxe melhoras nos resultados (principalmente no caso da heurística H1F). É interessante frisar que tais algoritmos tinham como função objetivo apenas minimizar o atraso total das ordens: porém, devido à estrutura das heurísticas construtivas, conseguiu melhor aproveitamento da capacidade. Adicionalmente, percebeu-se que o EDD conseguiu gerar soluções iniciais apropriadas para a otimização do atraso total.

Durante a execução dos melhores algoritmos com comportamento estocástico referentes ao primeiro problema, percebeu-se que o tamanho dos casos de teste aumentou a variação da capacidade ociosa. Entretanto, pelos dados obtidos, não se pode estabelecer uma relação linear entre o *gap* do atraso e o tamanho do problema. Isso indica que existem outros fatores, além do tamanho do problema, que influenciam no comportamento do algoritmo.

Quando se trata do segundo problema, o algoritmo H2F1, criado com base no algoritmo H1F, mostrou um comportamento semelhante ao algoritmo H1D no que diz respeito à capacidade. Porém, quando comparamos os *gaps* das heurísticas H1F e H2F1, percebemos que a heurística H2F1 reduziu o atraso total dos pedidos, embora para isso penalize os indicadores de uso de capacidade. Isto ocorreu porque os trabalhadores polivalentes são sempre alocados/remanejados aos centros produtivos com carga de trabalho. Como o presente trabalho não parte de uma situação em regime de produção, considerando a lógica do PBC, os primeiros estágios produtivos dos primeiros períodos e os últimos estágios produtivos dos últimos períodos estão recebendo mais

funcionários polivalentes e portanto, aumentando a sua capacidade ociosa. Esse problema em situação de regime de produção é resolvido pelo motivo de partes dos funcionários polivalentes já estarem alocados em outros centros de produção.

Ao se implementar a política de banco de horas (terceiro problema), a heurística respectiva foi capaz de, em geral, obter menores valores de atraso e um melhor uso da capacidade, quando comparamos com as demais políticas.

Como principais contribuições deste trabalho, temos: (i) Elaboração de uma revisão exaustiva de literatura no tema “PBC”; (ii) Definição, implementação e execução de 3 modelos de programação linear – cada um relacionado a um problema específico – usando como entrada um *benchmark* com 300 casos de teste; (iii) Definição, implementação e execução de um conjunto de algoritmos construtivos – e seu posterior uso em algoritmos do tipo *Iterated Greedy* – para tratar do problema de alocação de pedidos aos períodos de MPS no ambiente PBC considerando capacidade produtiva fixa; (iv) Definição, implementação e execução de um conjunto de algoritmos construtivos – e seu posterior uso em algoritmos do tipo *Iterated Greedy* – para tratar do problema de alocação de pedidos aos períodos do MPS considerando capacidade produtiva variável baseada no uso de mão-de-obra polivalente; (v) Definição, implementação e execução de um conjunto de algoritmos construtivos – e seu posterior uso em algoritmos do tipo *Iterated Greedy* – para tratar do problema de alocação pedidos aos períodos do MPS considerando capacidade produtiva variável baseada no uso de banco de horas.

Embora os resultados sejam promissores, entende-se que a presente tese abre um conjunto de frentes de trabalho: inicialmente, percebe-se que existe espaço para pesquisas em campo que identifiquem e analisem sistemas de manufatura semelhantes ao PBC. Do ponto de vista dos modelos matemáticos, entende-se que existem possibilidades de melhorar os modelos, tornando-os híbridos e assim aproveitando as melhores

características de cada um. Ainda nessa frente, entende-se que os problemas apresentados nesta tese podem ser alvo de soluções baseadas em *MIP-Heuristics* e *math-heuristics*. Um resultado interessante obtido durante as análises de dados pelos modelos e heurísticas é a indicação que alguns casos de teste são mais difíceis de ser resolvidas por ambos os métodos. Tal dificuldade não diz respeito ao tamanho, e sim a outras características que podem ser analisadas e assim, melhorar as estratégias de resolução deste problema.

Assim sendo, espera-se que, além das contribuições à literatura já relatadas, o presente trabalho possa ser usado como base para um conjunto de pesquisas que tratem do SCOs PBC.

6. Referências Bibliográficas

- ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. **Pesquisa Operacional**. Editora: ELSEVIER, 2007.
- ASHOUR, S. **Sequencing Theory**, Springer-Verlag, New York, 1972.
- BENDERS, J. E RIEZEBOS, J.; Period Batch control: classic, not outdated. **Production Planning & Control**, v. 13, n. 6, p. 497-506, 2002.
- BENDERS, J. The origin of Period Batch Control (PBC). **International Journal of Production Research**, v. 40, n. 1, p. 1-6, 2010.
- BERTO, R. M. V.; NAKANO, D. N. A Produção Científica nos Anais do Encontro Nacional de Engenharia de Produção: Um Levantamento de Métodos e Tipos de Pesquisa. **Produção**, v. 9, n. 2. p. 65-76, 2000.
- BLACKBURN, J. The time factor. In: BLACKBURN, J. (editor): **Time-based Competition - The next Battleground in Manufacturing**. Business One Irwin, Homewood, IL, 1991.
- BORGEN, E. Production management principles in newspaper pre-press production. **Production Planning & Control**, v. 7, n. 1, 96-98, 1996.
- BOWER, J.L. & HOUT, T.M.: Fast Cycle capability for competitive power. **Harvard Business Review**, p. 110-118, November-December,1988.
- BURBIDGE, J. L. Operation Scheduling with GT and PBC. **International Journal of Production Research**, v. 26, n. 3, p. 429-442, mar, 1988.
- BURBIDGE, J. L. **Planejamento e Controle da Produção**, São Paulo: Atlas, 1981.
- BURBIDGE, J. L. **Production Planning**. William Heinemann ltd, 1971.
- BURBIDGE, J. L. **The introduction of group technology**, London: Heinemann, 1975.
- BURBIDGE, J. L. The use of period batch control (PBC) in the implosive industries. **Production Planning & Control**, v. 5, n.1, p. 97-102, 1994.

- BURBIDGE, J. L.; FALSTER, P.; RIIS, J. O. Integration audit: A systematic method for studying a manufacturing enterprise to determine the possibilities for integration. **Computer-Integrated Manufacturing Systems**, v. 2, n. 3, p. 148-161, August, 1989.
- BURBIDGE, J. L.; FALSTER, P.; RIIS, J. O.; SVENDSEN, O; M.; Integration in Manufacturing. **IFIP WG 5.7: Information flow in automated Manufacturing Systems. Computers in Industry**, v. 9, p. 297-305, 1987.
- BURBIDGE, J. L.; HALSALL, J. Group Technology and growth at Shalibane. **Production Planning & Control**, v. 5, n. 2, p. 213-218, 1994.
- BURBIGDE, J. L. A synthesis for success, **Manufacturing engineer**, nov, p. 99-102, 1989.
- BURBIGDE, J. L. **Period Batch Control**, Oxford: Clarendon Press, 1996.
- BURBIGDE, J. L. Production control: a universal conceptual framework, **Production Planning and Control**, v. 1, no. 1, p. 3-16, 1990.
- BURBIGDE, J. L. Production Planning and Control: A Personal Philosophy. North-Holland, **Computers in Industry**, n. 6, p. 477-487, 1985.
- CAMPBELL, G. M. Master production scheduling under rolling planning-horizons with fixed order intervals, **Decisions Sciences**, v. 23, n. 2, p. 312-331, 1992.
- CHO, K. K, KIM, K. H.; KIM, C. S.; A heuristic lot sizing algorithm for a gt cell. **Computers Industrial Engineering**, v. 26, n. 1, p. 1-9, 1994.
- CHU, S. C. K. A mathematical-programming approach towards optimized master production scheduling, **International Journal of Production Economics**, v. 38, n. (2-3), p. 269-279, 1995.
- CLERC, M. **Particle Swarm Optimization**. ISTE, London, UK, 2006.
- CONWAY, R. W., MAXWELL, W. L.; MILLER L. W. **Theory of scheduling**, Addison-Wesley, 1967.

- CORRÊA, H. L.; GIANESI, I. G. N.; CAON, M. **Planejamento, Programação e Controle da Produção MRP II/ERP**, 5ª. ed., São Paulo:Atlas, 2007.
- DALE, B. G.; RUSSEL, D.; Production Control Systems for Small Group Production. **Omega**, v. 11, n. 2, p.175-185, 1983.
- DORIGO, M.; MANIEZZO, V.; COLORNI, A. The ant system: Optimization by a colony of cooperating agentes. **IEEE Transactions on Systemas, Man, and Cybernetics-Part B**, v. 26, p. 29-41, 1996.
- FANJUL-PEYRO, L.; RUIZ, R. Iterated greedy local search methods for unrelated parallel machine scheduling. *European Journal of Operational Research*, v. 207, n. 1, p. 55 – 69, 2010.
- FERNANDES, F. C. F. **Concepção de um sistema de controle da produção para a manufatura celular**. 1991. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção), Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1991.
- FERNANDES, F. C. F.; GODINHO FILHO, M. Sistemas de Coordenação de Ordens: revisão, classificação, funcionamento e aplicação. **Gestão & Produção**, v. 14, n. 2, p. 337-352, 2007.
- FERNANDES, F. C. F.; GRACIA, E.; SILVA, F. M.; GODINHO FILHO, M. Proposta de um método para atingir a manufatura responsiva na indústria de calçados: implantação e avaliação por meio de uma pesquisa-ação, **Gestão & Produção**, v. 19, n. 3, p. 509-529, 2012
- FERNANDES, F. C. F.; PACHECO, R. F. Um sistema de controle da produção para a manufatura celular. parte ii: um sistema de emissão de ordens e programação de operações, **Gestão & Produção**, v. 3, p. 228-248, dez, 1996.
- FERNANDES, F. C. F.; SANTORO, M. C. Avaliação do grau de prioridade e do foco do planejamento e controle da produção (PCP): modelos e estudos de casos, **Gestão & Produção**, v. 12, n. 1, p. 25-38, jan-abr, 2005.

- FERNANDES, F. C. F.; TAHARA, C. S. Um sistema de controle da produção para a manufatura celular: Parte I: Sistema de Apoio à Decisão para a Elaboração do Programa Mestre de Produção. **Gestão & Produção**, v. 3, p. 135-155, ago, 1996.
- FERNANDES, F. C.; GODINHO FILHO, M. Production control systems: Literature review, classification, and insights regarding practical application, **African Journal of Business Management**, v. 5, n14, p. 5573-5582, 18 July, 2011.
- FERNANDES, F.C.F.; MACCARTHY, B.L. Production Planning and Control: the gap between theory and practice in the light of modern manufacturing concepts”. **Proceedings of the 15th International Conference on CAD/CAM, Robotics & Factories of the Future (CARS&FOF’99)**, Águas de Lindóia-Brasil, v.1, pages from MF2-1 to MF2-6, August 1999.
- FERNANDES, F.C.F; GODINHO FILHO, M. **Planejamento e Controle da Produção: dos fundamentos ao essencial**, São Paulo: Atlas, 2010.
- GAHM, S.; DÜNNWALD, B.; SAHAMIE, R. A multi-criteria master production scheduling approach for special purpose machinery, **International Journal of Production Economics**, v. 149, p. 89-101, march 2014.
- GARCIA-MARTINEZ, C.; RODRIGUEZ, F.; LOZANO, M. Tabu-enhanced iterated greedy algorithm: A case study in the quadratic multiple knapsack problem. **European Journal of Operational Research**, v. 232, n. 3, p. 454 – 463, 2014.
- GESTETTNER. S.; KUHN, H. Analysis of production control systems kanban and CONWIP. *International Journal of Production Research*, v. 34, n 11, p. 3253-3273, 1996.
- GODINHO FILHO, M. **Paradigmas Estratégicos de Gestão da Manufatura: configuração, relações com o Planejamento e Controle da Produção e estudo exploratório na indústria de calçados**, Tese de Doutorado, Departamento de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos, 2004.

- GODINHO FILHO, M.; FERNANDES, F. C. F. Paradigmas estratégicos de gestão da manufatura (PEGEMs): Elementos-chave e modelo conceitual, **Gestão & Produção**, v. 12, n. 13, p. 333-345, set-dez, 2005.
- GODOY, AS., Introdução à Pesquisa Qualitativa e suas possibilidades, **Revista de Administração de Empresas**, v. 35, n. 2, mar-abr, p.57-63,1995.
- GOLDBERG, M. C. **Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning**. Addison Wesley Longman Inc., 1989.
- GOLDRATT, E.M.; COX, J. *The Goal: Excellence in Manufacturing*, North River Press, New York, 1984.
- GOOSSENS, M.; MITTLEBACH, F.; SAMARIN, A. *The Latex Companion*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1993.
- GUNDOGAR, E. A rule-based master production scheduling system for an electro-mechanical manufacturing company, **Production Planning & Control**, v. 10, n. 5, p. 486-492, 1999.
- HAMERI, A. Production flow analysis – Cases from manufacturing and service industry. **International Journal Production Economics**, v. 129, p. 233-241, 2011.
- HILL, J. A.; BERRY, W. L.; LEONG, G. K.; SCHILLING, D. A. Master production scheduling in capacitated sequence-dependent process industries, **International Journal of Production Research**, v. 38, n. 18, p. 4743-4761, 2000.
- HYER, N.; WEMMERLOV, U. MRP/GT: A framework for production planning and control of cellular manufacturing. **Decision Sciences**, v. 13, p. 681-701, 1982.
- JAMSHIDI, H. & BROW, R. A. Development of production cycles for group technology environment with the Wagner-Whitin Algorithm. **Computers Industrial Engineering**, v. 24, p. 199-207, 1993.
- KAKU, B. K; KRAJEWSKI, L. J. Period batch control in group technology. **International Journal of Production Research**, v. 33, n.1, p. 79-99, 1995.

- KENNEDY, J. Particle Swarm Optimization, **Encyclopedia of Machine Learning**, Springer US, p. 760-766, 2010.
- KIMMS, A. A genetic algorithm for multi-level, multi-machine lot sizing and scheduling. **Computers and Operations Research** – PERGAMON, n. 26, p. 829-848, 1999.
- KRITCHANCHAI, D.; MACCARTHY, B.L.: Responsiveness and strategy in manufacturing. **Proceedings of the workshop Responsiveness in manufacturing**, digest nº 98/213, IEE, London, 1998.
- LAURINDO, F. J. B.; MESQUITA, M. A. Material Requirements Planning: 25 Anos de história – uma revisão do passado e prospecção do futuro. **Gestão & Produção**, v. 7, n. 3, p. 320-337, dez, 2000.
- LEE, L. C. A study of system characteristics in a manufacturing cell. **International Journal Production Research**, v. 23, n. 6, p. 1101-114, 1985.
- LEWIS, H. S.; SWEUGART, J. R.; MARKLAND, R. E. Master scheduling in assemble-to-order environments – A capacitated multiobjective lot-sizing model, **Decision Sciences**, v. 23, n. 1, p. 21-43, 1992.
- MACCARTHY, B. L.; FERNANDES, F. C. F. A multi-dimensional classification of production systems for the design and selection of production planning and control system. **Production Planning & Control**, v. 11, n. 5, p. 481-496, 2000.
- METTERS, R.; VARGAS, V. A comparison of production scheduling policies on costs, service level, and schedule changes, **Production and Operations Management**, v. 8, n. 1, p. 76-91, 1999.
- MOCCELLIN, J. V. **Técnicas de sequenciamento e programação de operações em máquinas**, Escola de Engenharia de São Carlos, Publicação 013/94, São Carlos, Fevereiro, 1994.
- MORTON, T. E.; PENTICO, D. W. **Heuristic scheduling systems**, John Wiley & Sons, New York, 1993.

- NAWAZ, M.; ENSCORE, E.; HAM, I. A heuristic algorithm for the m-machine, n-job flow-shop sequencing problem. *Omega*, v. 11, p. 91–95, 1983.
- NEW, C. MRP and GT, a New Strategy for Component Production. **Production and Inventory Management Journal**, n. 18, v. 3, p. 50-62, 1977.
- ORLICKY, J. *Material Requirements Planning*, New York: McGraw-Hill, 1975.
- PACHECO, R. F. **UM SISTEMA DE EMISSÃO DE ORDENS E PROGRAMAÇÃO DE OPERAÇÕES PARA A MANUFATURA CELULAR**, Dissertação de mestrado em engenharia de produção, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal de São Carlos, 1995.
- PAN, Q.-K.; WANG, L.; ZHAO, B.-H. An improved iterated greedy algorithm for the no-wait flow shop scheduling problem with makespan criterion. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 38, n. 7-8, p. 778 – 786, 2008.
- PELS, H. L. Modelling Production Management Systems. **Conference Reports. Computers in Industry**, v. 6, p. 279-307, 1985.
- PIRES, S. R. I. **Gestão da Cadeia de Suprimentos (Supply Chain Management): Conceitos, Estratégias, Práticas e Casos**. Editora Atlas, São Paulo, 2004.
- RACHAMADUGU, R. & TU, Q.: Period batch control for group technology – An improved procedure, **Computers Ind. Eng.**, Vol. 32, n. 1, pp. 1-7, 1997.
- RAJESHAM, S.; MAHESH, K. V; VENKATESH, V. C. Group Technology Based Production System – Important Strategy for Developing Nations. **Annals of the CIRP**, v. 3, n. 1, p. 341-345, 1982.
- RAJGOPAL, J. Chapter 11.2 Principles and Applications of Operations Research in: ZANDIN, K. B. **Maynard's Industrial Engineering Handbook**, Fifth Edition, McGraw-Hill Standard Handbooks, McGraw-Hill Professional, p. 11.27-11.43, 2001.

- RIEZEBOS, J. **Design of a Period Batch control Planning System for Cellular Manufacturing**, Thesis University of Groningen, Groningen, the Netherlands, 2001.
- RIEZEBOS, J. Evaluating PBC system design choices, in: **Hernández, W., Süer, G.A., (eds), Proceedings Group Technology/Cellular manufacturing world symposium**. Year 2000, March 27-29 2000, San Juan, Puerto Rico, p. 137-142, 2000.
- RIEZEBOS, J. On the determination of the period length in a period batch control system, **Proceedings of the 32 international MATADOR conference**. Macmillan Press, p. 10-11, 1997.
- RIEZEBOS, J. Order release in synchronous manufacturing. **Production Planning & Control**. v. 21, n. 4, june 2010, p. 247-258, 2010.
- RIEZEBOS, J. Order sequencing and capacity balancing in synchronous manufacturing. **International Journal of Production Research**. v. 49, n. 2, p. 531-552, 2011.
- RODRIGUEZ, F. J.; LOZANO, M.; BLUM, C.; GARCÍA-MARTÍNEZ, C. An iterated greedy algorithm for the large-scale unrelated parallel machines scheduling problem. **Computers & Operations Research**, v. 40, n. 7, p. 1829 – 1841, 2013.
- RUIZ, R.; STUTZLE, T. A simple and effective iterated greedy algorithm for the permutation flowshop scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v. 177, n. 3, p. 2033 – 2049, 2007.
- RUIZ, R.; STUTZLE, T. An iterated greedy heuristic for the sequence dependent setup times flowshop problem with makespan and weighted tardiness objectives. **European Journal of Operational Research**, v. 187, n. 3, p. 1143 – 1159, 2008.
- SAJJAA, R.; RAO, C. S. A New Multi-Objective Optimization of Master Production Scheduling Problems Using Differential Evolution, **International Journal of Applied Science and Engineering**, v. 12, n. 1, p. 75-86, 2014.

- SALOMON, D. V. **Como fazer uma monografia**, Livraria Martins Fontes, São Paulo, 1991.
- SEVERINO, M. R.; LAGE JUNIOR, M.; CAMPANINI, L.; GUIMARÃES, A. A.; GODINHO FILHO, M.; AGUILERA, M. Proposta de utilização do sistema Period Batch Control para redução de *lead time* em uma empresa de bens de capital, **Produção**, v. 20, n. 4, out./dez., p. 612-625, 2010.
- SILVA, F. M. Um **Sistema de Planejamento e Controle da Produção para Fabricantes de Calçados Infantis Pertencentes a um Industrial Cluster**, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia de Produção UFSCar, São Carlos, 2002.
- SILVA, F. M.; FERNANDES, F. C. F. Proposta de um sistema de controle da produção para fabricantes de calçados que operam sob encomenda, **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 15, n. 3, p. 523-538, set.-dez. 2008.
- SIPPER, D.; BULFIN, L. Jr. **Production: planning, control, and integration**, McGraw-Hill series in industrial engineering and management Science, International Editions, 1998.
- SLACK, N; CHAMBERS, S; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**, 3ª. ed., São Paulo: Atlas, 2009.
- SPEARMAN, M. L.; ZAZANIS, M. A. Push and Pull Production Systems: Issues and Comparisons, **Operations Research**, v. 40, n. 3 p. 521-532, 1992.
- STALK, G. Time – The next source of competitive advantage. **Harvard Business Review**, p.41-51, July-August, 1988.
- STALK, G.; HOUT, T. **Competing against time**. The Free Press, New York, 1990.
- STEELE, D. C. Period Batch Control systems for cellular manufacturing In Suresh, N. C. e Kay (eds) **Group Technology and Cellular Manufacturing**, Boston:Kluwer, p. 309-320, 1998.
- STEELE, D. C.; BERRY, W. L.; CHAPMAN, S. N. Planning and control in multi-cell manufacturing, **Decision Sciences**, Vol. 26, n. 1, pp. 1-34, 1995.

- STEELE, D. C.; MALHOTRA, M. K. Factors affecting performance of period batch control systems in cellular manufacturing, **International Journal of Production Research**, v. 35, n. 2, p. 421-446, 1997.
- STEELE, D. C.; MALHOTRA, M. K. Operating characteristics of period batch control. **Proceedings Decisions Sciences Insitute**, 1994.
- SÜER, G. A.; SUBRAMANIAN, A.; HUANG, J. Heuristic procedures and mathematical models for cell loading and scheduling in a shoe manufacturing company. **Industrial and Systems Engineering**, Ohio University, Athens, v. 56, p; 462-475, 2009.
- TAHARA, C.S. **Sistema de Apoio à Decisão para a Elaboração do Programa Mestre de Produção para a Manufatura Celular. Dissertação** de Mestrado, DEP-UFSCar, São Carlos, 1995.
- TAVARES NETO, R. F.; GODINHO FILHO, M.; SILVA, F. M. An ant colony optimization approach for the parallel machine scheduling problem with outsourcing allowed. **Journal of Intelligent Manufacturing**, Springer, July, 2013.
- TAVARES NETO, R. **Proposta de solução de problemas de scheduling considerando a possibilidade de terceirização usando a técnica de colônia de formigas.** Tese de doutoramento, Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia de Produção UFSCar, São Carlos, 2010.
- TEIXEIRA JR., R. F.; FERNANDES, F. C. F.; PEREIRA, N. A.; Binary interger programming formulations for scheduling in Market-driven foundries. **Computers & Industrial Engineering**, n. 59, p. 425-435, 2010.
- TEIXEIRA JR., R. F.; FERNANDES, F. C. F; PEREIRA, N. A. SISTEMA DE APOIO À DECISÃO PARA PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO EM FUNDIÇÕES DE MERCADO. **Gestão & Produção**. v. 13, n. 2, p. 205-221, maio-ago, 2006.
- TOWILL, DR. FORRIDGE – Principles of good practice in material flow, **Production Planning & Control**, v. 8, n. 7, p. 622-632, 1997.

- TUBINO, D. F. **Planejamento e controle da produção: teoria e prática**, São Paulo: Atlas, 2007.
- VOLLMANN, E. T.; BERRY, W. L.; WHYBARK, D. C. **Manufacturing Planning and Control Systems**, 4th ed., McGraw-Hill, 1997.
- WALL, B.; HIGGINS, P.; BROWNE, J. A prototype system for short-term supply planning, **Computers in Industry**, v. 19, n. 1, 1992.
- WEMMERLÖV, U. Production planning and control procedures for cellular manufacturing systems. **American Production and Inventory Control Society**, Fall Church, VA, 1988.
- WU, Z.; ZHANG, C.; ZHU, X. Ant a colony algorithm for Master production scheduling optimization, *Proceeding of the IEEE 16th International Conference Supported Cooperative Work Design*, 2012.
- YANG, K. K.; JACOBS, F. R. Comparison of make-to-order job shops with diferente machine layouts and production control systems. **International Journal of Production Research**, v. 30, n. 6, p. 1269-1283,1992.
- YING, K.-C.; LIN, S.-W.; HUANG, C.-Y. Sequencing single-machine tardiness problems with sequence dependent setup times using an iterated greedy heuristic. **Expert Systems with Applications**, v. 36, n. 3 PART 2, p. 7087 – 7092, 2009.
- ZACCARELLI, S. B. **Programação e Controle da Produção**. São Paulo: Livraria Pioneira, 8º. Ed., 1987.
- ZELENOVIC, D. M.; TESIC, Z. M. Period Batch Control and group technology. **International Journal of Production Research**, v. 26, n. 3, p. 539-552, 1988.