



## DIMENSIONAMENTO E SEQUENCIAMENTO DE LOTES DE MÚLTIPLOS PRODUTOS EM ESTÁGIO ÚNICO E PASSO FIXO DE PRODUÇÃO

Euclýdes da Cunha Neto

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Orientadores: Virgílio José Martins Ferreira  
Filho  
Edilson Fernandes de Arruda.

Rio de Janeiro  
Junho de 2014

DIMENSIONAMENTO E SEQUENCIAMENTO DE LOTES DE MÚLTIPLOS  
PRODUTOS EM ESTÁGIO ÚNICO E PASSO FIXO DE PRODUÇÃO

Euclides da Cunha Neto

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO.

Examinada por:

---

Prof. Virgílio José Martins Ferreira Filho, D.Sc.

---

Prof. Edilson Fernandes de Arruda, D.Sc.

---

Profa. Laura Silvia Bahiense da Silva Leite, D.Sc.

---

Prof. Peter Fernandes Wanke, D.Sc.

---

Prof. Martín Gómez Ravetti, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2014

Cunha Neto, Euclides da

Dimensionamento e sequenciamento de lotes de múltiplos produtos em estágio único e passo fixo de produção/ Euclides da Cunha Neto. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.

X, 120 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Virgílio José Martins Ferreira Filho

Edilson Fernandes de Arruda

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Produção, 2014.

Referências Bibliográficas: p. 90-99.

1. SELSP. 2. Gestão de estoques. 3. Dimensionamento de lotes. 4. Sequenciamento. 5. Lean manufacturing. 6. Modelos fluidos. I. Ferreira Filho, Virgílio José Martins *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Produção. III. Título.

À Rose, ao meu pai, à minha mãe, aos meus  
filhos Cândia, Danilo, André e Pedro, e à  
minha neta Melissa

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores Professores Virgílio José Martins Ferreira Filho e Edilson Fernandes de Arruda pela dedicação, permanente disponibilidade e paciência.

Agradeço à Professora Laura Bahiense e a todos do LORDE pelo ótimo ambiente de interação acadêmica. Aos Professores Marcos Estelita Lins, Ismael da Silva Soares e Mario Jorge Oliveira pelo estímulo. À Andreia Lima e todos da Área de Pesquisa Operacional e do Programa de Engenharia de Produção pelos excelentes serviços. À UFRJ por possibilitar tudo isso.

Agradeço a Manoel Carlos Pego Saisse, Andréa Regina Nunes de Carvalho e Adriane Monteiro Cavalieri Barbosa, meus colegas de trabalho, pela sobrecarga assumida durante meu afastamento parcial. À minha chefe Valeria Said de Barros Pimentel pelo apoio necessário. Através de vocês agradeço ao Instituto Nacional de Tecnologia.

Agradeço a Caetano Caruso, Carlos Achui, Carlos Cruz, Cristiane Marques, Heloisa Varela, João Bosco Erthal Serrão, Karine Murad, Leonardo de Aragão, Marcio Samamede, Ricardo Sarmento Costa, Rose Rebello da Cunha e, de novo, aos meus colegas Adriane, Andréa e Manoel, pelas lições fundamentais, aprendidas e compartilhadas em nosso convívio profissional.

Agradeço particularmente ao Professor Eduardo Galvão de Moura Jardim por apontar e viabilizar novos caminhos ao longo desta trajetória.

Agradeço ao meu Pai e a minha Mãe, aos meus filhos Pedro, André, Danilo e Cândida, à minha neta Melissa, à minha irmã Fátima, meus sobrinhos Guilherme e Flávia, e Eduardo, Nathalie, Gabriel, minha avó Luiza, minha tia Simone, D. Zuleide, Eliete, aos velhos amigos Paulinho, Rato, Nagib, Quito, Tatau, Bori, a todos vocês pelo suporte emocional necessário à travessia destes tempos.

À minha esposa Rose agradeço por tudo, sem ela seria impossível.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

## DIMENSIONAMENTO E SEQUENCIAMENTO DE LOTES DE MÚLTIPLOS PRODUTOS EM ESTÁGIO ÚNICO E PASSO FIXO DE PRODUÇÃO

Euclides da Cunha Neto

Junho/2014

Orientadores: Virgílio José Martins Ferreira Filho

Edilson Fernandes de Arruda

Programa: Engenharia de Produção

É apresentada uma solução para uma classe do problema estocástico de dimensionamento e sequenciamento de lotes com as seguintes características: lotes de quaisquer produtos executados em intervalo fixos de tempo (chamados de passo fixo), pontos de pedido e sequência variável de produção. Este tipo de problema é característico do sistema puxado de reposição proposto pela abordagem *Lean Manufacturing*.

A solução proposta adota disciplina de fila obtida através de modelo de fluidos que aproxima o processo estocástico de chegada e atendimento às ordens de produção. Estabelecida a disciplina de fila, um algoritmo iterativo retorna solução próxima da ótima para todos os parâmetros operacionais do sistema.

O algoritmo é rápido e estável, permitindo o uso frequente com instâncias reais. Com a disciplina de fila proposta, o estoque requerido para atender níveis de serviço preestabelecidos é significativamente menor que o necessário pela disciplina adequada ao problema encontrada na literatura.

Para contribuir com a avaliação da adequabilidade do sistema puxado de reposição à diferentes contextos produtivos, o método proposto foi comparado através de 54 instâncias de teste a dois outros métodos de solução, viáveis apenas para instâncias de pequeno porte: um método ótimo totalmente flexível e um ótimo para um dado passo fixo.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

STOCHASTIC ECONOMIC LOT SIZING AND SCHEDULING PROBLEM OF  
MULTIPLE PRODUCTS, SINGLE-STAGE AND FIXED PITCH PRODUCTION

Euclides da Cunha Neto

June/2014

Advisors: Virgílio José Martins Ferreira Filho

Edilson Fernandes de Arruda

Department: Production Engineering

A solution for a class of the stochastic economic lot sizing and scheduling problem with the following characteristics is presented: lots of any product are produced in fixed time intervals called pitch, reorder points and variable production sequence. This kind of problem is typical of the replacement pull system proposed by lean manufacturing approach.

The proposed solution adopts queuing discipline obtained through fluid model that approximates the stochastic process of arrival and production orders. Given the queue discipline, an iterative algorithm returns a solution close to the optimum for all parameters to run the system. The algorithm is fast and stable, allowing its frequent use with real instances. With the proposed queuing discipline, the stock required to meet predetermined service levels is significantly less than required by the proper discipline to the problem found in the literature

To contribute to the assessment of the suitability of the "replacement pull system" on different production contexts, the proposed method was compared across 54 test instances to two other methods of solution, viable only for small instances: (i) a fully flexible and optimal method and (ii) optimal method for a given fixed pitch.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	1
1.1	RELEVÂNCIA DO PROBLEMA	2
1.2	OBJETIVOS	3
1.3	ORGANIZAÇÃO DOS PRÓXIMOS CAPÍTULOS	4
<b>2</b>	<b>O SISTEMA PUXADO DE REPOSIÇÃO</b>	5
2.1	SUPERMERCADO DE PEÇAS	5
2.2	PASSO FIXO	7
2.3	PROGRAMAÇÃO NIVELADA	9
2.4	SISTEMA PUXADO DE REPOSIÇÃO	10
2.5	MÓDULOS DO SISTEMA PUXADO DE REPOSIÇÃO	11
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	13
3.1	CLASSIFICAÇÃO DAS REGRAS DE CONTROLE	13
3.1.1	Quanto à sequência de produção	14
3.1.2	Quanto ao ciclo de produção	15
3.1.3	Quanto às regras de fila	15
3.1.4	Quanto ao tamanho dos lotes	16
3.1.4.1	Lote fixo	16
3.1.4.2	Lote definido localmente	16
3.1.4.3	Lote definido globalmente	17
3.1.4.4	Peça a peça, definido globalmente	17
3.2	CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS DE GESTÃO	17
3.3	BREVE APRESENTAÇÃO DOS MÉTODOS DE GESTÃO	21
3.3.1	Sequência fixa	21
3.3.1.1	Ciclo e lote fixo	21
3.3.1.2	Ciclo e lote variável	23
3.3.1.2.1	Lote definido localmente	23
3.3.1.2.2	Lote definido globalmente	25
3.3.2	Sequência variável	27
3.3.2.1	Fila estática	27
3.3.2.2	Fila dinâmica	29
3.3.2.2.1	Lote fixo	29

3.3.2.2.2	Lote variável .....	31
3.3.2.2.3	Peça a peça, definido globalmente.....	31
3.3.2.3	Rede de Filas .....	34
3.3.2.3.1	Modelos de Fluidos.....	35
<b>4</b>	<b>DIRETRIZES PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA.....</b>	<b>36</b>
4.1	SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	36
4.2	REGRAS DE CONTROLE PROPOSTAS .....	37
4.2.1	<b>Passo fixo de produção .....</b>	<b>38</b>
4.2.2	<b>Sequenciamento flexível.....</b>	<b>39</b>
4.2.3	<b>Controle de estoque (<math>s, Q</math>).....</b>	<b>39</b>
<b>5</b>	<b>MODELO PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA GLOBAL.....</b>	<b>40</b>
5.1	PREMISSAS .....	40
5.2	NOMENCLATURA.....	41
5.3	MODELO GLOBAL.....	42
5.4	INTERPRETAÇÃO GRÁFICA.....	46
5.5	ALGORITMO DE SOLUÇÃO .....	48
<b>6</b>	<b>MODELO PARA O SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO .....</b>	<b>51</b>
6.1	MODELO PARA SOLUÇÃO EXATA .....	52
6.2	APROXIMAÇÃO POR FLUIDOS.....	53
6.2.1	<b>Construção do modelo.....</b>	<b>53</b>
6.2.2	<b>Solução.....</b>	<b>54</b>
6.3	SOLUÇÃO APROXIMADA PARA O MODELO DISCRETO .....	56
<b>7</b>	<b>USO EXPERIMENTAL DA SOLUÇÃO PROPOSTA .....</b>	<b>57</b>
7.1	IMPLEMENTAÇÃO .....	57
7.2	INSTÂNCIAS DE TESTE .....	57
7.3	RESULTADOS .....	58
7.4	DISCUSSÃO.....	60
7.5	SIMULAÇÃO DE USO .....	62
<b>8</b>	<b>AValiação DOS CUSTOS DAS REGRAS DE CONTROLE.....</b>	<b>63</b>
8.1	SOLUÇÃO ÓTIMA .....	64
8.1.1	<b>Algoritmo de iteração de valor relativo.....</b>	<b>65</b>
8.1.2	<b>Custo paramétrico .....</b>	<b>65</b>
8.2	SOLUÇÃO ÓTIMA COM PASSO FIXO .....	66
8.3	SOLUÇÕES COM PASSO FIXO E PONTO DE PEDIDO.....	67

8.4	INSTÂNCIAS DE TESTE .....	67
8.5	RESULTADOS .....	69
<b>8.5.1</b>	<b>Custo médio ótimo .....</b>	<b>69</b>
8.5.1.1	Variação em função do <i>setup</i> .....	69
8.5.1.2	Variação em função do nível da demanda .....	71
8.5.1.3	Variação em função do mix de produtos.....	73
<b>8.5.2</b>	<b>Sobrecusto devido ao passo fixo .....</b>	<b>75</b>
8.5.2.1	Variação em função do <i>setup</i> .....	75
8.5.2.2	Variação em função do nível da demanda .....	78
8.5.2.3	Variação em função do mix de produtos.....	80
<b>8.5.3</b>	<b>Sobrecusto devido ao ponto de pedido.....</b>	<b>82</b>
8.5.3.1	Variação em função do <i>setup</i> .....	82
8.5.3.2	Variação em função do nível da demanda .....	85
8.5.3.3	Variação em função do mix de produtos.....	87
<b>8.5.4</b>	<b>Sobrecusto devido a paradas de duração múltipla do passo fixo.....</b>	<b>89</b>
<b>9</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>90</b>
9.1	DESDOBRAMENTOS E TRABALHOS FUTUROS .....	91
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>93</b>
	<b>ANEXO 1: INSTÂNCIAS DE TESTE .....</b>	<b>103</b>
	<b>ANEXO 2: RESULTADOS DO MÉTODO ÓTIMO.....</b>	<b>107</b>
	<b>ANEXO 3: RESULTADOS DO MÉTODO ÓTIMO COM PASSO FIXO .....</b>	<b>109</b>
	<b>ANEXO 4: RESULTADOS DO MÉTODO COM PASSO FIXO, PONTO DE PEDIDO, DISCIPLINA “PMC” E PARADA FLEXÍVEL.....</b>	<b>113</b>
	<b>ANEXO 5: RESULTADOS DO MÉTODO COM PASSO FIXO, PONTO DE PEDIDO, DISCIPLINA “PMC” E PARADA FIXA.....</b>	<b>117</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A determinação da melhor escala de produção é uma das questões mais tradicionais da engenharia de produção. Desde HARRIS (1913), que foi o primeiro a obter uma expressão analítica para o tamanho ótimo do lote de produção, muito se evoluiu no sentido de se englobar mais e mais variáveis, bem como incorporar problemas correlatos.

O dimensionamento de lotes para múltiplos produtos foi uma das direções de expansão de seu trabalho. Há diferentes motivações para se reunir vários produtos em um só modelo. Segundo classificação de ZIPKIN (2000), diferentes motivações resultam em diferentes tipos de problema, a saber:

- a) Problemas com uma ou mais restrições em comum, tais como: espaço físico, capital, número máximo de encomendas, entre outros (DE SCHRIJVER *et al.*, 2013).
- b) Problemas de rede de itens com relacionamentos do tipo fornecimento - demanda (AXSÄTER, 2003; GLOCK, 2012).
- c) Problemas em que o reabastecimento conjunto é conveniente (AXSÄTER, 2006)
- d) Problemas em que vários produtos compartilham os mesmos processos de suprimentos, sendo necessário integrar o sequenciamento dos lotes de produção ao controle de estoques.

Este último tipo de problema é identificado na literatura pela sigla ELSP (*Economic Lot Sizing and Scheduling Problem*), em sua versão determinística, e SELSP (*Stochastic Economic Lot Sizing and Scheduling Problem*) quando a demanda, taxa de produção e / ou tempo *setup* são probabilísticos (SOX *et al.*, 1999; WINANDS *et al.*, 2011; RAZA e AKGUNDUZ, 2008).

Trata-se de determinar tamanhos de lote, níveis de estoque e sequência de produção, sujeita a existência de tempo e / ou custo significativos de preparação (chamados *setup*), de modo a atender a demanda dos clientes em regime de pronta entrega, respeitando a capacidade disponível e de modo econômico.

Os métodos de solução do ELSP buscam encontrar um ciclo de produção, composto por uma sequência fixa de produção e tamanhos fixos de lotes, tal que: possa ser repetido indefinidamente, atenda integralmente a demanda, respeite a capacidade e incorra em custo mínimo de carregamento de estoque e *setup*.

Para resolver o SELSP, existem diversas estratégias. Vários métodos procuram complementar soluções do ELSP com regras que tornem flexíveis a sequência de produção e / ou os tamanhos de lotes, em resposta ao estado corrente do sistema, representado pelo saldo em estoque de cada item e pelo *setup* corrente da máquina.

Genericamente, a solução deve conter um conjunto de regras capaz de indicar, a cada momento, se a máquina deve ser mantida em seu estado atual (continuando com o mesmo item em produção ou continuando ociosa), ou se o seu estado deve ser alterado para iniciar a produção de outro item ou iniciar período ocioso.

## 1.1 RELEVÂNCIA DO PROBLEMA

A importância do SELSP se dá por ser um problema muito comum tanto em indústrias de processo quanto em manufaturas. Em indústrias de processo, é ponto central do planejamento e controle da produção de diversos segmentos, como por exemplo: petroquímico, químico, farmacêutico e alimentício. Em manufaturas, aparece frequentemente em etapas de produção tais como: estamparia, moldagem de plásticos ou metais, centros de usinagem, células de montagem.

Mais recentemente, a relevância do SELSP vem se renovando e ampliando devido a crescente pressão sobre as indústrias para que ofereçam maior variedade de produtos e para que se adaptem com maior agilidade às frequentes flutuações do mercado. Parte significativa das empresas industriais busca se reorganizar para dar conta destas novas exigências e, neste sentido, a abordagem conhecida como *lean manufacturing* ou *modelo Toyota de produção* (WOMACK e JONES, 2004; WOMACK *et al.*, 2004) é reconhecida como uma das propostas de mais ampla disseminação (THUN *et al.*, 2010; GUPTA e JAIN, 2013; MARODIN e SAURIN, 2013).

Trata-se de um conjunto de ferramentas que busca a supressão de todo tipo de “desperdício”, definido como tudo que é realizado na empresa sem gerar valor para o cliente (WOMACK e JONES, 2004; COSTA e JARDIM, 2010). Desempenham papel central nesta abordagem as técnicas de transição da produção em grandes lotes, dita em massa ou “tradicional”, para uma produção em lotes menores, que se aproxime ao máximo do ideal *just in time*, ou seja: produzir apenas na quantidade e hora demandada pelo cliente (WOMACK *et al.*, 2004).

Para se aproximar deste objetivo, a abordagem *lean manufacturing* conta com métodos de redução dos custos e tempos de *setup* (SHINGO, 1985), pois sem isso a produção em pequenos lotes será fatalmente inviável ou antieconômica. Entretanto, diante da demanda por lotes menores, a frequente persistência de tempos ou custos *setups* ainda significativos, torna mais delicada a determinação dos tamanhos de lotes, pois seu *trade off* característico fica mais agudo, aumentando a importância do SELSP.

Outro aspecto do *lean manufacturing* que faz crescer a relevância do SELSP está relacionado à técnica conhecida como *mapeamento do fluxo de valor* (ROTHER e SHOOK, 2003), que é a mais popular maneira de se implantar o paradigma *lean manufacturing* (LIAN e VAN LANDEGHEM, 2007; BERTOLINI, 2013). Grande parte das indústrias que adota esta abordagem aciona e controla a produção através do chamado *sistema puxado e nivelado de reposição* ou apenas *sistema puxado de reposição* (ROTHER e SHOOK, 2003; SMALLEY, 2004). As plantas que seguem este modelo se organizam em cadeias de módulos de produção e estoque bem delimitados, muitos destes módulos se configurando como instâncias reais do SELSP, que assim se proliferam. Este modo de ver o sistema puxado de reposição é apresentado em mais detalhes no Capítulo 2.

## 1.2 OBJETIVOS

A presente tese tem como primeiro objetivo desenvolver um novo método de solução do SELSP, em apoio à gestão da produção e dos estoques de plantas industriais que usam o sistema puxado de reposição, tal como proposto pela metodologia *lean manufacturing* (ROTHER e SHOOK, 2003; SMALLEY, 2004).

Além disso, como segundo objetivo, deseja-se avaliar o custo extra decorrente da adoção do sistema puxado de reposição, devido às regras práticas de controle assumidas a priori por este sistema, e em que condições estes custos são mais elevados.

Devido à ampla abrangência do SELSP, mesmo quando restrito ao contexto de interesse, a pesquisa se limita ainda a problemas cujo tempo e custo *setup* são independentes da sequência de produção.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DOS PRÓXIMOS CAPÍTULOS

No próximo capítulo o sistema puxado de reposição é descrito no grau de detalhe necessário à compreensão do problema e posterior avaliação da solução proposta.

A seguir, no Capítulo 3 é feita uma revisão bibliográfica abrangente sobre o SELSP.

Buscando contextualizar o tipo de solução proposta pela presente tese, o Capítulo 4 resume os pontos mais relevantes da revisão bibliográfica, e depois relaciona e justifica as regras de controle assumidas como parte da solução do problema.

O Capítulo 5 formula um modelo global para cálculo dos parâmetros de operação necessários à solução completa do problema SELSP enfocado e apresenta um algoritmo para resolução do modelo.

O Capítulo 6 é dedicado à resolução aproximada do subproblema de sequenciamento da produção. Este subproblema é tratado separadamente porque o algoritmo global do Capítulo 5 pode ser conectado a diferentes políticas de sequenciamento.

O Capítulo 7 demonstra o uso do método proposto nos dois capítulos anteriores, comparando-o com o método alternativo presente na literatura que poderia ser usada para o mesmo problema.

O Capítulo 8 é dedicado à avaliação dos custos extras inerentes ao sistema puxado de reposição. São relatados dois novos métodos que foram desenvolvidos para viabilizar esta tarefa, um ótimo e o outro subótimo, mas parcialmente adequado ao sistema puxado de reposição.

Por fim, o Capítulo 9 aponta possíveis desdobramentos do trabalho realizado e o Capítulo 10 relaciona as conclusões.

## 2 O SISTEMA PUXADO DE REPOSIÇÃO

Segundo SMALLEY (2004), o *sistema puxado e nivelado de reposição* ou apenas *sistema puxado de reposição* é o modo de se comandar e controlar a produção em plantas industriais que adotam a abordagem *lean manufacturing* e que precisam atender a demanda de seus clientes em regime de pronta entrega, ou seja: quando são obrigadas a manter estoque de produtos acabados.

Convém notar que mesmo quando a produção é “sob-encomenda”, se existirem processos iniciais cuja produção seja “para estoque”, esta parte da planta usará o sistema puxado de reposição.

Da Seção 2.1 até 2.3 são descritos os elementos mais importantes do sistema puxado de reposição para os objetivos do presente trabalho, a saber: supermercado de peças, passo fixo e programação nivelada. A Seção 2.4 apresenta o sistema como um todo e a Seção 2.5, encerrando o capítulo, mostra como ele contém várias instâncias do SELSP.

### 2.1 SUPERMERCADO DE PEÇAS

No sistema puxado de reposição, o armazenamento dos produtos acabados ou semiacabados é organizado em *supermercados de peças*, que são uma espécie de depósito aberto e desburocratizado, localizados no próprio piso de fábrica entre processos consecutivos (SMALLEY, 2004).

A expressão *supermercado de peças* (ou apenas *supermercado*) é usada, em referência ao modelo de atendimento de consumidores em lojas de varejo, porque o processo seguinte da cadeia produtiva pode “se servir” de acordo com a sua necessidade, sem que sejam necessárias requisições de materiais ou registros de saída.

Nos supermercados de peças, o estoque de cada produto possui um limite superior e é dito “puxado” porque é o seu consumo que autoriza a produção, até que este limite máximo seja repostado.

O sistema de controle, embora de formatação muito variada, é chamado genericamente de *sistema kanban*<sup>1</sup>, e são projetados de modo que as ordens de reposição, também chamadas de *sinal*, sejam disparadas automaticamente, na hora

---

<sup>1</sup> Palavra japonesa que pode ser traduzida como cartão ou placa sinalizadora.

desejada. Com isso, todo o sistema pode ser facilmente operado pelo próprio pessoal responsável pela movimentação física do material, sem que seja necessário escritório para controle e emissão de ordens de produção.

Dada a crescente variedade de soluções todas chamadas genericamente de “sistema *kanban*” (LAGE JUNIOR e GODINHO FILHO, 2008, anotaram 33 diferentes adaptações), a seguir são detalhados tipos compatíveis com os supermercados e usados no contexto deste trabalho.

Fisicamente, na versão mais comum do sistema *kanban*, o material é organizado em pequenos contenedores aos quais são anexados cartões contendo as instruções de reposição impressas, que são os *kanbans* propriamente ditos. Quando ocorre a retirada do material pelo cliente estes cartões são destacados dos contenedores, se transformando nas ordens de reposição. Mais tarde, quando ocorre a reposição do estoque, os mesmos cartões são novamente anexados ao novo material.

Os cartões, portanto, ficam circulando entre o estoque de material processado e a produção. Para cada tipo de material que fica localizado em um supermercado, um cartão corresponde a uma quantidade fixa de peças e o número total de cartões em circulação delimita o estoque máximo. A Figura 1 ilustra um pequeno supermercado de peças organizado desta forma.



Figura 1: Exemplo de pequeno supermercado com o estoque organizado em contenedores e respectivos *kanbans*<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> Extraído de <http://cuddletech.com/?p=723>

Quanto ao tipo de sistema lógico de reposição de estoque que se adéqua bem às características do supermercado de peças, e é frequentemente usado, é o tipo  $(s_i, Q_i)$ . Ou seja: sistemas em que se dispara uma ordem de tamanho  $Q_i$  para produzir o produto  $i$  quando o seu estoque cai ao nível do ponto de pedido  $s_i$  (GARCIA *et al.*, 2006; WANKE, 2011).

A simplicidade operacional faz com que esta seja a escolha, a menos que existam motivos que a contra indiquem. A seguir, são descritos dois tipos de *kanban* muito usados em supermercados de peças e que são sistemas  $(s_i, Q_i)$ :

- a) *Kanban de produção em fluxo contínuo*: é um sistema  $(s, Q)$ , com a restrição adicional que obriga que  $s$  seja múltiplo inteiro de  $Q$ .

Na prática é a solução mais simples em que basta o consumo do material de apenas um contenedor para que o *kanban* correspondente já autorize a reposição. Portanto, não é preciso esperar o acúmulo de vários *kanbans* até que seja formado um lote maior e mais econômico para que a produção seja autorizada.

É adequado quando a reposição pode ser feita em pequenas quantidades.

- b) *Kanban de sinalização*: corresponde ao sistema  $(s, Q)$  exatamente como ele é, sem nenhuma restrição adicional. Usa-se normalmente apenas um *kanban* para marcar visualmente o ponto de pedido  $s$  no estoque físico.

É adequado à reposição em lotes grandes ou médios.

Em síntese, os supermercados de peças são depósitos de estoque intermediário que, ao facilitar e simplificar tanto o consumo quanto a reposição, reduzem significativamente os custos de emissão e controle de ordens, além dos custos de abastecimento dos processos produtivos. Como estes custos são parte significativa dos custos de *setup*, pode-se dizer que a adoção de supermercados contribui para a redução dos lotes econômicos de produção.

## 2.2 PASSO FIXO

O *passo fixo de produção* ou simplesmente *passo* é um intervalo constante de tempo dedicado à produção de qualquer lote de qualquer produto (SMALEY, 2004). Este intervalo de tempo inclui o tempo de *setup* e o tempo da produção propriamente dita.

O passo fixo de produção estabelece o ritmo da produção, isto é: de quanto em quanto tempo o processo produtivo deverá entregar um lote concluído e iniciar a produção de um novo lote.

A sua adoção possibilita as seguintes vantagens operacionais:

- a) Controle de produção mais simples e claro.
- b) Maior previsibilidade na execução e confiabilidade no planejamento, devido ao melhor controle de produção.
- c) Possibilidade de racionalização e redução dos custos e tempos de *setup*, devido à regularização da demanda por estes serviços, sabendo-se de antemão quando e quantos serão os *setups* necessários. E reduções de custo e tempo *setup* se desdobram em menores lotes econômicos, menores estoques e produção mais flexível.
- d) Facilidade também no controle de estoque devido à possibilidade de se usar containers padronizados e *kanbans* para movimentação e armazenagem dos materiais.

Conforme citado na introdução (Seção 1.1), reduzir o tempo de *setup* é um ponto central da abordagem *lean*, que incorpora técnicas especialmente voltadas a este objetivo.

Uma das ferramentas mais disseminadas neste sentido é conhecida como SMED (sigla de “Single Minute Exchange of Die”), e tem como objetivo reduzir todos os tempos de *setup* da planta para menos de 10 minutos por *setup*. Segundo o seu autor, isso é possível em um surpreendente percentual de plantas industriais, embora nem sempre o seja (SHINGO, 1985).

Para ilustrar a contribuição do passo fixo na redução do *setup*, vale citar um dos primeiros passos da metodologia SMED: a identificação e separação do *setup* externo e interno. O *setup* externo é composto por tarefas que podem ser realizadas mesmo com a máquina em produção. Já *setup* interno é composto por tarefas que só podem ser realizadas com a máquina parada.

Planeja-se então o trabalho de modo a garantir que todo o *setup* externo seja realizado previamente. Frequentemente, apenas esta medida reduz de 30 a 50% do tempo de máquina parada (SHINGO, 1985). Pode-se notar então a relevância do passo fixo, por facilitar o planejamento do *setup* através da determinação prévia dos momentos em que eles serão necessários.

### 2.3 PROGRAMAÇÃO NIVELADA

O terceiro aspecto de interesse da metodologia *lean* é a *programação nivelada*, também chamada de *heijunka*. Trata-se de programar a produção buscando dois objetivos:

- a) Reduzir flutuações no volume total produzido ao longo do tempo, tornando-o o mais equilibrado possível.
- b) Tornar o mix de produtos o mais variado possível. A expressão “toda peça todo dia” reflete um alvo quanto ao grau de variedade da produção.

A Tabela 1 abaixo exemplifica a programação nivelada ao longo de 12 passos de produção sucessivos, em contraste com a programação dita tradicional ou “em massa”. Enquanto esta última ocorreria em lotes maiores na busca de economias de escala, a programação nivelada procuraria alternar ao máximo o que é feito.

**Tabela 1: Exemplo com 4 produtos, contrastando a programação “tradicional” com a nivelada**

Passos:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Programação em massa:	A	A	A	A	A	B	B	B	C	C	D	D
Programação nivelada:	A	A	B	C	D	A	A	B	C	D	A	B

Em contrapartida ao maior custo total com *setups*, uma vantagem da programação nivelada, além do menor estoque de produtos processados, é o repasse mais nivelado da demanda aos processos fornecedores. Assim, a programação nivelada tenderia a estabilizar o fluxo ao longo dos vários elos da cadeia de suprimentos, ou pelo menos não ampliaria flutuações na demanda.

Já a produção em massa, ao contrário, acentua flutuações de demanda, tendendo a provocar maiores estoques também nos elos anteriores da cadeia de suprimentos. Sabe-se que a produção em grandes lotes é identificada como uma das causas do conhecido *efeito chicote*, que são flutuações crescentes, elo após elo da cadeia de suprimentos (LEE et.al, 1997; PAIK e BAGCHI, 2007).

Em síntese, a produção nivelada ou *heijunka* preconizada pelo modelo *lean* significa produzir em pequenos passos de produção, alternando ao máximo o que é

produzido, buscando se possível a produção de “toda peça todo dia”. Confunde-se, portanto, com o conceito de *just in time*.

É intuitivo perceber que a produção nivelada, embora considerada chave pela metodologia *lean manufacturing*, não poderá ser praticada de modo econômico quando os custos de *setup* forem altos. Ainda assim, um passo fixo não tão pequeno, como praticado por muitas indústrias, pode ser uma opção. E este contexto destaca a relevância dos problemas de *lot sizing* em geral e o SELSP em particular.

## 2.4 SISTEMA PUXADO DE REPOSIÇÃO

A Figura 2 abaixo ilustra o sistema puxado de reposição, simplificado para 3 processos em fluxo linear. A simbologia usada é da metodologia *lean manufacturing* e está resumida na Figura 3 (ROTHER e SHOOK, 2003).

Essencialmente, os vários processos são intercalados por supermercados de peças, cujo estoque é consumido pelo processo seguinte e reposto pelo processo anterior através de algum sistema *kanban*.

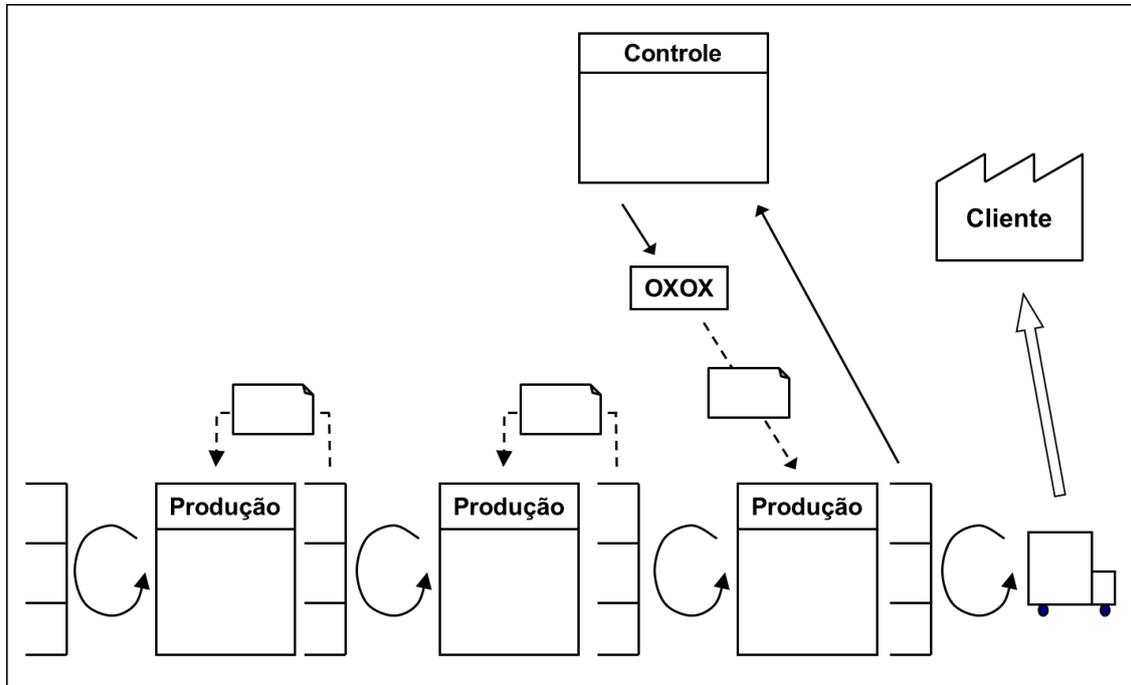


Figura 2: O Sistema Puxado de Reposição

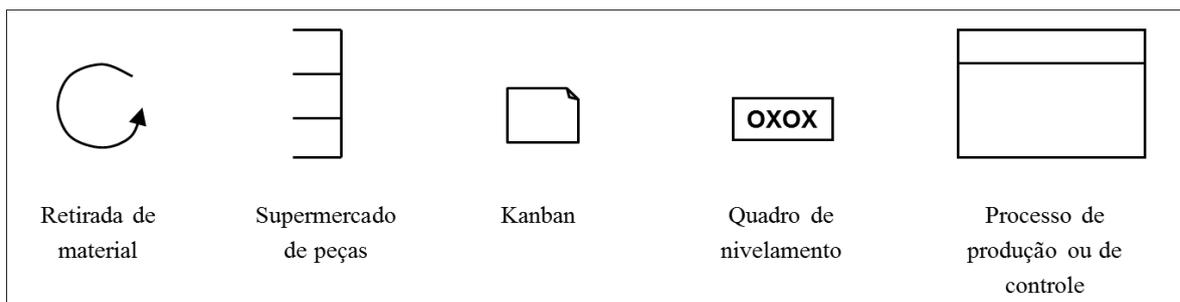


Figura 3: Simbologia da abordagem *Lean Manufacturing*, usada nas Figuras 2 e 4.

Quando a planta é inteiramente operada pelo sistema puxado de reposição, o último elo à jusante é dito *marca-passo*<sup>3</sup> ou *processo puxador*. Ele se diferencia dos demais porque processa os pedidos dos clientes, sendo o destinatário direto da *programação nivelada* elaborada pelo controle de produção. O quadro *de nivelamento* que aparece na Figura 2 é apenas o instrumento de comunicação entre o controle de produção e o processo puxador. Os demais processos são ditos *puxados* e, em geral, são programados de modo mais automático.

## 2.5 MÓDULOS DO SISTEMA PUXADO DE REPOSIÇÃO

Para os objetivos desta tese mais importante do que a distinção entre o processo puxador e os demais, é perceber que cada par “supermercado – processo anterior” pode ser compreendido como um módulo (ou elo) relativamente independente de uma cadeia de suprimentos, na medida em que podem ser programados com relativa autonomia um do outro, graças ao estoque intermediário existente entre eles. Com isso, boa parte destes módulos são instâncias reais do SELSP, embora possam ser muito diversos entre si. A Figura 4 a seguir exemplifica esta visão, através de um sistema puxado de reposição composto por 4 módulos, cada um sendo uma instância do SELSP.

<sup>3</sup> A expressão “marca-passo” está sendo usada como tradução de *pacemaker*.

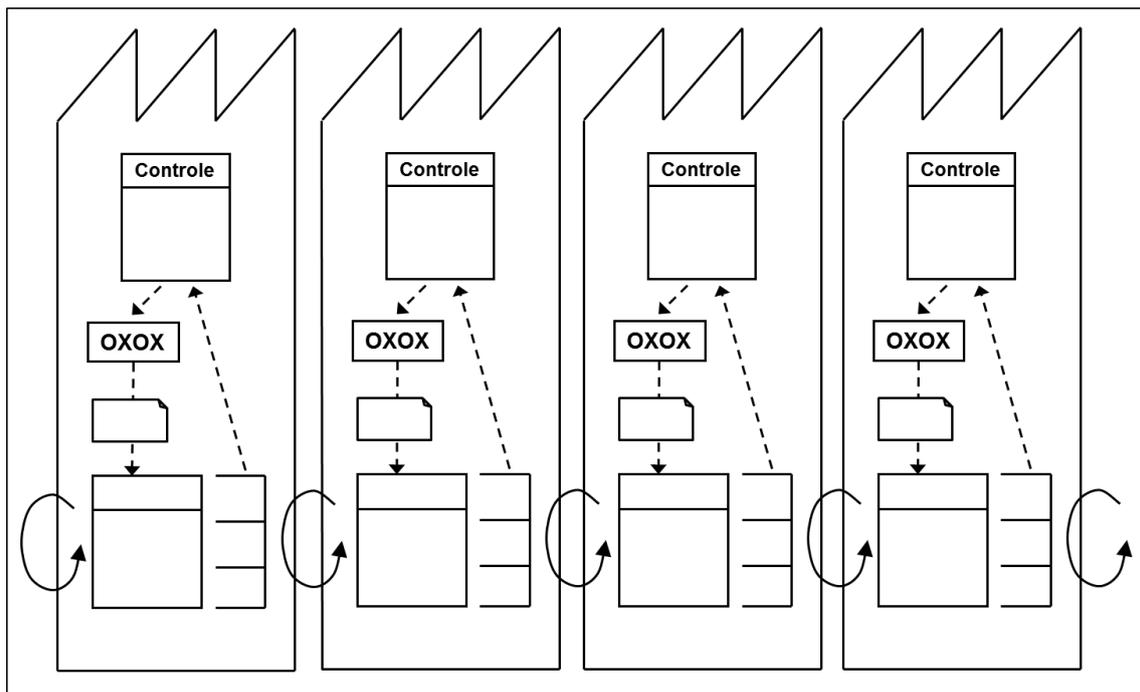


Figura 4: O Sistema Puxado de Reposição percebido como uma cadeia de módulos  
SELSP

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo está organizado da seguinte maneira: em primeiro lugar são apresentadas as principais regras de controle presentes na literatura, classificadas por diversos critérios (Seção 3.1).

A Seção 3.2, em seguida, classifica os métodos de gestão encontrados na literatura segundo duas dimensões: quanto aos tipos de regras de controle que utilizam e quanto à técnica principal utilizada no cálculo de parâmetros quantitativos e demais detalhes operacionais do método.

Depois, a Seção 3.3 descreve resumidamente métodos de gestão previamente classificados, eventualmente complementados por tópicos relevantes para o desenvolvimento desta tese.

Convém esclarecer inicialmente que, no contexto desta tese, a expressão *método de gestão* (ou *política de gestão* ou ainda *solução*) é usada para se referir a uma solução completa para o ELSP ou SELSP, cujas partes quase sempre são *regras de controle e métodos de cálculo dos parâmetros* requeridos por estas *regras de controle*.

Em geral as regras e seus parâmetros são estabelecidos em *tempo de planejamento*, isto é: previamente, a parte da operação. Com base nestas regras e em seus parâmetros, deve ser possível tomar em *tempo de execução*, isto é: durante a operação do sistema de produção e estoques, as decisões propriamente ditas de *o que, quando e quanto* produzir, sem dúvidas.

#### 3.1 CLASSIFICAÇÃO DAS REGRAS DE CONTROLE

Existem diversos artigos que revisam, classificam e / ou comparam as diferentes soluções para o ELSP e SELSP presentes na literatura técnica. Dentre estas, podem ser destacadas os trabalhos de SOX et al. (1999), WINANDS et al. (2011), BRADLEY e CONWAY (2003), VERGIN e LEE (1978), NARASIMHA KAMATH e BHATTACHARYA (2005), CARRERAS e SABATER (2006), VAUGHAN (2007) e RAZA e AKGUNDUZ (2008).

É possível classificar os métodos de gestão e suas regras de controle segundo a natureza dos seguintes critérios:

- sequência de produção,
- ciclo de produção,

- regras de fila e
- tamanho dos lotes.

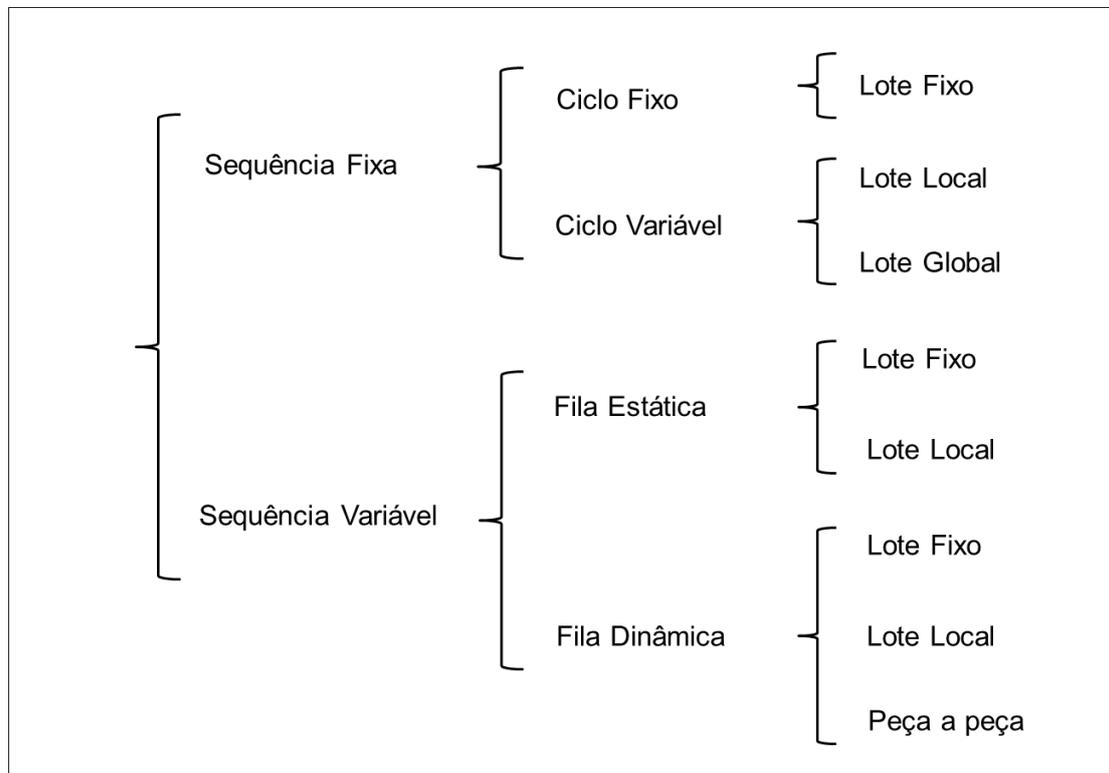


Figura 5: Tipos de regras de controle

Esta seção apresenta as principais opções para cada um destes critérios (veja resumo na Figura 5 acima), que depois são usadas para a classificação propriamente dita dos métodos de gestão. Esta estrutura de análise foi adaptada a partir do trabalho de WINANDS et al. (2011).

### 3.1.1 Quanto à sequência de produção

Os métodos de gestão propostos pela literatura podem usar sequências de produção fixas ou variáveis.

Obedecer uma sequência fixa de produção significa que existe um ordenamento fixo dos itens a serem produzidos durante um ciclo de produção, ciclo este que se repete indefinidamente.

Vale notar que “sequência fixa” não significa que necessariamente todos os itens são produzidos na mesma frequência, ou seja: é possível que um item seja produzido várias vezes em uma única “sequência fixa”.

Os métodos que utilizam uma sequência fixa procuram responder às incertezas do ambiente variando os tamanhos de lote. Grande parte dos autores que propõe esta abordagem utiliza alguma sequência fixa oriunda dos métodos de solução do ELSP.

Existem outros métodos que não usam nenhuma sequência pré-definida e a decisão quanto ao próximo item a ser produzido é tomada em função de regras de filas, estas sim pré-definidas. Estes métodos são ditos baseados em sequências dinâmicas de produção.

### **3.1.2 Quanto ao ciclo de produção**

Os métodos que utilizam sequência fixa de produção podem usar ciclos de produção de duração fixa ou variável.

Soluções que, além de fixar a sequência, fixam também a duração do ciclo, propõem flutuações no tamanho dos lotes e no tempo ocioso dos ciclos, como alternativa para acomodar as flutuações na demanda e demais incertezas.

Outras soluções, ao variar os tamanhos dos lotes, não se preocupam em manter fixo o tempo de ciclo.

### **3.1.3 Quanto às regras de fila**

Os métodos que utilizam sequência dinâmica de produção podem usar regras de fila estáticas ou dinâmicas.

A regra de fila é dita estática quando o lote de produção é “enfileirado” imediatamente após ser liberado do estoque para a produção, mantendo-se nesta posição até ser processado. A regra mais comum deste tipo é a regra FIFO (sigla de “first in, first out” - ou PEPS de “primeiro a entrar, primeiro a sair”) que diz que o primeiro a chegar é o primeiro a ser processado e sair.

A regra de fila é dita dinâmica quando os lotes a serem produzidos podem ter a sua prioridade alterada ao longo do tempo em função do estado do sistema (o que seria equivalente a mudar de posição na fila). Um exemplo é a regra que manda que o próximo item a ser produzido seja aquele cujo estoque está mais próximo de se esgotar.

Ou seja: aquele com o menor “tempo de cobertura do estoque”, que é quociente da divisão do seu saldo em estoque pela sua taxa de demanda.

### 3.1.4 Quanto ao tamanho dos lotes

As várias políticas de gestão quanto ao tamanho de lote podem ser classificadas em quatro tipos diferentes, a saber: lote fixo, lote definido localmente, lote definido globalmente e produção de cada peça definida globalmente.

#### 3.1.4.1 Lote fixo

As políticas de lote fixo, como o nome diz, são aquelas em que cada item possui um tamanho de lote que fica inalterado ao longo do tempo. Vale observar que as soluções que fixam lote, sequência e o ciclo de produção, são as várias soluções para o problema ELSP.

#### 3.1.4.2 Lote definido localmente

As políticas ditas de “lote definido localmente” são aquelas em que o lote é definido dinamicamente em função apenas de informações do próprio item, geralmente o estoque do item.

A maneira mais frequente de fazer isso é comparando o estoque em mãos com um dado nível pré-definido de estoque geralmente chamado de “estoque máximo” ou “estoque base” (chamado neste documento de estoque máximo).

As políticas deste tipo se dividem ainda entre “lote exaustivo” ou “lote pré-definido” (ou “gated”), em função do momento em que se compara o estoque em mãos com o estoque máximo para estabelecer o tamanho do lote. A política de “lote exaustivo” é aquela em que a produção deverá prosseguir até que o estoque máximo seja de fato alcançado, repondo-se inclusive eventual demanda ocorrida após o início da produção do lote corrente. A política de “lote pré-definido” é aquela em que o lote é fixado já no início de sua produção, em função do estoque corrente neste momento.

Por fim, vale observar que tanto a política de “lote exaustivo” quanto a de “lote pré-definido” podem ou não ser condicionadas por um tamanho máximo de lote. E, em

caso positivo, são chamadas de política de “lote limitado” ou políticas que operam com “limitante de serviço”.

#### 3.1.4.3 Lote definido globalmente

As políticas onde o lote é dito “definido globalmente” são aquelas em que o lote é definido dinamicamente em função não apenas de suas informações, mas também dos demais itens, geralmente o estoque de todos os itens.

#### 3.1.4.4 Peça a peça, definido globalmente

Uma solução é dita de “produção peça a peça, definida globalmente”, quando ao se concluir a produção de cada peça, o método é consultado para escolher entre três opções:

- a) Produzir mais uma unidade do mesmo produto que acabou de ser produzido.
- b) Iniciar a produção de outro produto (após o devido *setup* do processo).
- c) Parar a máquina.

Se a máquina se encontra parada, então a consulta acima deve ser feita a cada ocorrência de demanda.

É o tipo de solução totalmente dinâmico.

### 3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS DE GESTÃO

A Tabela 2, à frente, classifica os métodos de gestão para o problema SELSP identificados através dos artigos que os propõem, segundo as regras de controle descritas na seção anterior. A seguir, a Tabela 3 adiciona à classificação anterior mais uma dimensão: a técnica principal de solução utilizada no cálculo dos parâmetros e outros detalhes da solução.

**Tabela 2: Artigos que propõem solução para o SELSP classificados por Tipos de Regras de Controle**

		Sequência Fixa		Sequência Variável	
		Ciclo Fixo	Ciclo Variável	Fila Estática	Fila Dinâmica
		Definição do Tamanho do Lote	Lote Fixo	BOMBERGER (1966); DOLL E WHYBARK (1973); ELMAGHRABY (1978); PHILIPOOM <i>et al.</i> (1990); KHOUJA <i>et al.</i> (1998); CHANDRASEKARAN <i>et al.</i> (2007); CHATFIELD (2007); BJORK (2012)	
Definido Localmente			FEDERGRUEN e KATALAN (1996a; b); ANUPINDI e TAYUR (1998); FEDERGRUEN e KATALAN (1998); KRIEG e KUHN (2001; 2002; 2004); WAGNER e SMITS (2004); NARASIMHA KAMATH e BHATTACHARYA (2005); BRANDER e FORSBERG (2006); VAN VUUREN e WINANDS (2007); VAN DER MEI e WINANDS (2008); WINANDS <i>et al.</i> (2009a); WINANDS (2007; 2010)	ALTIOK e SHIUE (1994; 1995; 2000); WINANDS <i>et al.</i> (2009b)	LEVEN e SEGERSTEDT (2007)
Definido Globalmente			LEACHMAN e GASCON (1988); LEACHMAN <i>et al.</i> (1991); FRANSOO (1992); BOURLAND e YANO (1994); GALLEGO (1990; 1994); GASCON <i>et al.</i> (1994); FRANSOO <i>et al.</i> (1995); MARKOWITZ <i>et al.</i> (2000); EISENSTEIN (2005)		
Peça a Peça Globalmente					QIU e LOULOU (1995); PATERNINA-ARBOLEDA e DAS (2005)

**Tabela 3: Artigos que propõem solução para o SELSP classificados por Tipos de Regras de Controle e Método de Cálculo dos Parâmetros**

MÉTODO DE CÁLCULO DOS PARÂMETROS		TIPOS DE REGRAS DE CONTROLE						
		Sequência Fixa			Sequência Dinâmica			
		Ciclo Fixo	Ciclo Variável		Fila Estática		Fila Dinâmica	
		Lote Fixo	Lote Local	Lote Global	Lote Fixo	Lote Local	Lote Fixo ou Local	Lot Global
Análise Matemática		ELMAGHRABY (1978)		GALLEGO (1990; 1994); BOURLAND e YANO (1994); EISENSTEIN (2005)				
Regras Heurísticas		DOLL E WHYBARK (1973)	FEDERGRUEN e KATALAN (1998); BRANDER e FORSBERG (2006)	LEACHMAN e GASCON (1988); LEACHMAN <i>et al.</i> (1991); FRANSOO (1992); GASCON <i>et al.</i> (1994); FRANSOO <i>et al.</i> (1995)			SEGERSTEDT (1999); BRANDER <i>et al.</i> (2005); LEVEN e SEGERSTEDT (2007) NILSSON e SEGERSTEDT (2008)	
Processos Estocásticos	Polling		NARASIMHA KAMATH e BHATTACHARYA (2005); VAN VUUREN e WINANDS (2007); VAN DER MEI e WINANDS (2008); WINANDS <i>et al.</i> (2009a); WINANDS (2007; 2010)					
	Heavy Traffic			MARKOWITZ <i>et al.</i> (2000)				
	Outros		FEDERGRUEN e KATALAN (1996a; b); ANUPINDI e TAYUR (1998); KRIEG e KUHN (2001; 2002; 2004)			ALTIOK e SHIUE (1994; 1995; 2000); WINANDS <i>et al.</i> (2009b)		QIU e LOULOU (1995)

**Tabela 3: Artigos que propõem solução para o SELSP classificados por Tipos de Regras de Controle e Método de Cálculo dos Parâmetros (cont.)**

MÉTODO DE CÁLCULO DOS PARÂMETROS		TIPOS DE REGRAS DE CONTROLE						
		Sequência Fixa			Sequência Dinâmica			
		Ciclo Fixo	Ciclo Dinâmico		Fila Estática		Fila Dinâmica	
		Lote Fixo	Lote Local	Lote Global	Lote Fixo	Lote Local	Lote Fixo ou Local	Lot Global
Program. Matemática	Dinâmica	BOMBERGER (1966)						
	Inteira	PHILIPOOM <i>et al.</i> (1990)						
	Estocástica				ZIPKIN (1986)			
Metaheurísticas	Algoritmo Genético	KHOUJA <i>et al.</i> (1998); CHATFIELD (2007)						
	Simulated Anneling		WAGNER e SMITS (2004)					
	Várias	CHANDRASEKARAN <i>et al.</i> (2007);						
Reinforcement Learning							PATERNINA-ARBOLEDA e DAS (2005)	
Lógica fuzzy		BJORK (2012)						

### 3.3 BREVE APRESENTAÇÃO DOS MÉTODOS DE GESTÃO

*Abaixo, os principais métodos de gestão dentre os previamente classificados são descritos resumidamente.*

#### 3.3.1 Sequência fixa

##### 3.3.1.1 Ciclo e lote fixo

Os métodos que usam sequência, ciclo e lote fixo são aqueles que resolvem o ELSP, a versão determinística do SELSP. Há muito trabalho nesta área e os conhecimentos desenvolvidos para este problema são usados como parte da solução do problema SELSP, mais genérico.

Em 1966, BOMBERGER (1966) estabeleceu um limite inferior e um limite superior para a soma dos custos de estocar e de *setup*, que é a função objetivo do problema.

O limite inferior é obtido através do cálculo do lote econômico de cada item, como se fossem produzidos de modo independente, a menos da restrição da capacidade total disponível que precisa ser suficiente para realizar todas as operações produtivas e todos os *setups*. O problema é então resolvido com o auxílio de relaxação lagrangeana, decorrendo uma solução que respeita o limite de capacidade, mas não necessariamente garante que os ciclos de produção dos diversos itens sejam compatíveis entre si.

O limite superior é uma solução viável, obtida através de programação dinâmica, baseada no “período básico” (*basic period* ou “BP” – também chamado por alguns autores de “ciclo fundamental”), que tem as seguintes características:

- a) o tempo de ciclo de cada item é um múltiplo inteiro do período básico; e
- b) um só período básico é maior que a soma do tempo de produção e do tempo *setup* de todos os itens.

Esta solução é melhor que outra, conhecida como método do “ciclo comum” (*common cycle* ou “CC”), que impõe uma mesma frequência para todos os itens e calcula a frequência ótima nestas condições (HANS SMANN, 1962).

BOMBERGER (1966) ilustra seus métodos com um exemplo numérico, composto por 10 itens, instância esta que passou a ser usada em muitos artigos para comparação de resultados.

Posteriormente DOLL e WHYBARK (1973) apresentaram outro método para cálculo do período básico e dos multiplicadores inteiros usados na obtenção dos tempos de ciclo dos itens, cuja principal vantagem é ser um procedimento iterativo independente de julgamentos subjetivos. O procedimento apresentou ainda menor custo total para várias instâncias de teste.

ELMAGHRABY (1978), por sua vez, propôs o método “período básico estendido” (EBP – *extended basic period*) que, usando dois períodos consecutivos, relaxa a exigência do método de BOMBERGER (1966), de que o período básico seja maior que a soma de todos os tempos de produção e *setup*, conseguindo como isso melhores resultados.

Além disso, ELMAGHRABY (1978) desenvolveu procedimentos para:

- a) verificar se uma solução qualquer é viável;
- b) transformar uma solução qualquer em solução viável; e
- c) obter uma solução viável a partir de um dado conjunto de multiplicadores inteiros dos períodos dos itens.

O uso de metaheurísticas para resolver o ELSP foi relatado por vários autores: KHOUJA *et al.* (1998), CHATFIELD (2007) e CHANDRASEKARAN *et al.* (2007). Todos relatam resultados melhores que os apresentados pelos métodos analíticos.

Enquanto KHOUJA *et al.* (1998) e CHATFIELD (2007) aplicaram algoritmo genético, CHANDRASEKARAN *et al.* (2007) aplicaram e compararam três diferentes metaheurísticas: algoritmo genético, *simulated annealing* e colônia de formigas. Vale notar que este último artigo apresentou solução para problemas onde o tempo *setup* é independente da sequência de produção e problemas onde o tempo *setup* é dependente da sequência de produção.

Já BJORK (2012) reconheceu a existência de incertezas na duração do ciclo de produção e dos tamanhos de lote, decorrentes de várias causas, inclusive mercado. O autor modelou estas incertezas através de *fuzzy numbers*, e então calculou analiticamente os tamanhos de lote ótimos. Os lotes resultaram um pouco maiores do que aqueles que resultariam de modelo puramente determinístico. O modelo assume sequência fixa e que todos os produtos possuem ciclos de mesma duração.

Convém notar que, apesar de considerar incertezas, o método proposto por BJORK (2012) foi classificado como estático porque as ações do planejador não variam em resposta a estas incertezas, a medida em que elas vão ocorrendo. Elas apenas são incorporadas no modelo para resultar em melhores decisões que, a partir daí, são mantidas fixas.

### 3.3.1.2 Ciclo e lote variável

Diversas técnicas de resolução do SELSP herdaram e mantêm fixas as melhores propostas de sequência de produção originalmente desenvolvidas para o ELSP, adicionando, entretanto, flexibilidade à solução através de flutuações no ciclo e tamanho de lote de produção. Segue um painel sobre esta abordagem.

#### 3.3.1.2.1 Lote definido localmente

Segundo FEDERGRUEN e KATALAN (1998), os métodos que fixam a sequência, variam o ciclo total e variam os tamanhos de lote usando, para isso, entretanto, apenas informações do item em fabricação, tem o mérito de possuir ferramental analítico de avaliação e otimização, algo geralmente indisponível em opções mais flexíveis.

Estes autores publicaram 3 artigos que se completam propondo um sistema baseado em sequência fixa de produção e estoque máximo. O primeiro deles (FEDERGRUEN e KATALAN, 1996a) apresenta método eficiente para estimar o tempo de espera na fila de produção e para cálculo do estoque máximo, dado o nível de serviço desejado. O segundo artigo (FEDERGRUEN e KATALAN, 1996b) estabelece procedimento para que se decida pela interrupção da produção ou não (mantendo-se a máquina ociosa ou não) antes do início da produção de cada lote.

O terceiro artigo é dedicado à obtenção de uma boa sequência fixa de produção (FEDERGRUEN e KATALAN, 1998). Propõe um método heurístico para obtenção da sequência fixa em três etapas, a saber:

- a) inicialmente obtêm-se valores para as frequências relativas de produção dos itens;
- b) em seguida obtêm-se a duração total do ciclo e as frequências absolutas dos itens;

c) por fim é montado o sequenciamento para as frequências estabelecidas.

Vale notar que os autores optaram por usar política de lote do tipo "exaustiva" que, no contexto das políticas baseadas em estoque máximo, significa que a produção deverá prosseguir até que o estoque máximo seja alcançado, repondo-se inclusive a demanda ocorrida após o início da produção do lote corrente. Segundo os autores, no entanto, não seria difícil alterar o trabalho para se optar pela política do tipo "limitada" (ou "gated"), aquela em que o lote já é fixado no início de sua produção, em função do estoque corrente neste momento.

KRIEG e KUHN (2001) modelaram o sistema *kanban* multi-item como um caso de SELSP. Assumiram que vendas são perdidas caso ocorra falta, que não há custo *setup* (além da perda de tempo), que deve ser respeitado um nível de serviço pré-estabelecido, e estabeleceram como objetivo o mínimo de estoques. Assumiram ainda política de lote do tipo "exaustiva", assim como FEDERGRUEN e KATALAN (1998). Desenvolveram então um método de solução em duas fases. Na primeira, calcula-se o número inicial de *kanbans* e, através de qualquer solução determinística para o ELSP, a sequência fixa e os tamanhos de lotes. Na segunda fase, o número de *kanbans* é aumentando gradualmente, um a um, verificando-se para cada *kanban* adicionado, se os níveis de serviço são atendidos através de método derivado da teoria de filas.

A solução completa é apresentada em 3 artigos sendo que o primeiro (KRIEG e KUHN, 2001) descreve o método como um todo. O segundo artigo (KRIEG e KUHN, 2002) constrói o processo estocástico representativo do problema e simplifica-o através da sua decomposição em vários processos "locais" (um para cada item de estoque), para reduzir o número total de estados, e também de aproximação para torná-lo markoviano. Finalmente, o terceiro artigo (KRIEG e KUHN, 2004) mostra como obter estimativas para o nível de serviço e o estoque médio de produtos acabados a partir do modelo markoviano desenvolvido. Os valores são obtidos através de método de aproximações sucessivas, implementado com auxílio de software especializado em cálculo de cadeias de Markov chamado MARCA. Os testes convergiram rapidamente e se aproximaram bastante dos valores exatos (desvios de até 1, 2 ou 3%).

BRANDER e FORSBERG (2006) propõe método para cálculo do estoque de segurança e de estoque máximo aplicável a qualquer sequência fixa de produção previamente definida. Propõe também procedimento para que se decida, ao final da produção de um lote, entre produzir o próximo item ou parar a produção.

WAGNER e SMITS (2004) aplicou metaheurística de busca local *simulated annealing* para melhorar política previamente obtida do tipo  $(R, S)$ , isto é: composta por estoque máximo e período fixo de reposição. Segundo o autor, uma vantagem da sua estratégia é tratar conjuntamente o estabelecimento da sequência de produção e o cálculo do estoque máximo, ao contrário do que é feito por outras abordagens. Outra peculiaridade do trabalho deste autor é que ele considerou que o lote é integralmente entregue ao estoque apenas ao final da produção, diferentemente da maioria dos artigos que supõem que os produtos entram continuamente no estoque durante todo o tempo de produção do lote.

Uma outra modelagem, quando se opta pelo uso de sequência fixa e lotes definidos localmente, é conhecida como *polling system*, técnica originária da computação que trata de sistemas compostos por várias filas de espera atendidas por um mesmo servidor (TAKAGI, 1988). No contexto do SELSP, atribui-se uma fila para cada produto diferente, sendo necessário ainda cuidado especial com o fato do tempo *setup* ser normalmente bem maior que no contexto original desta técnica. WINANDS (2007, 2010), WINANDS *et al.* (2009a) e NARASIMHA KAMATH e BHATTACHARYA (2005) publicaram artigos com esta abordagem.

#### 3.3.1.2.2 Lote definido globalmente

GALLEGO (1990, 1994) apresentou política composta por 3 passos. Inicialmente define-se uma boa sequência fixa e ciclo total para o problema determinístico. Em seguida define-se uma política formal de controle que irá reagir à ocorrência de “rupturas” (ou seja: estoques significativamente desbalanceados), promovendo alteração nas quantidades produzidas de modo a restaurar os níveis de estoque desejados. Por fim calcula-se os estoques de segurança necessários.

Mais tarde EISENSTEIN (2005) melhorou o procedimento de controle de GALLEGO (1990, 1994), de modo a manipular também os tempos ociosos, além dos tamanhos de lote.

BOURLAND e YANO (1994) desenvolveram um dos poucos trabalhos que trata explicitamente a hipótese de se usar horas extras como solução para os problemas de variabilidade da demanda. O artigo desenvolve técnica de gestão que lida com o *trade-off* entre tempo ocioso planejado, estoque de segurança e horas extras,

objetivando planos de produção que serão de fato executados, além do baixo custo. O método é composto pela fase de planejamento e pela fase de controle.

A fase de planejamento parte de uma sequência fixa pré-estabelecida, usa um modelo de otimização e resulta em:

- a) uma janela de tempo para execução de cada item, subdividida em tempo ocioso, tempo *setup* e tempo de produção; e
- b) níveis máximo e mínimo de estoque para cada item.

A fase de controle tem como objetivo garantir, para cada item, que o seu estoque máximo será restaurado até o final da sua janela de tempo, o que é conseguido através do gerenciamento do tempo ocioso e da realização de hora extra. Isto é possível graças à premissa de que se pode decidir por fazer hora extra ou não a cada janela de tempo.

Assumindo como fixo o ciclo total de produção, o artigo apresenta os seguintes resultados conceituais interessantes:

- a) A medida que cresce o tempo ocioso da *i*-ésima janela, decresce o retorno marginal obtido quanto a quantidade necessária de hora extra.
- b) A medida que cresce o estoque de segurança de ciclo do *i*-ésimo item, decresce o retorno marginal obtido quanto a quantidade necessária de hora extra.
- c) A alocação ótima do tempo ocioso é a que resulta em igual probabilidade de falta para todos os itens.

Assumindo o ciclo total de produção como variável de decisão, o artigo apresenta os seguintes resultados conceituais interessantes:

- a) A medida que cresce o tempo ocioso da *i*-ésima janela, cresce a quantidade necessária de hora extra para todos os demais itens.
- b) A medida que cresce o tempo ocioso total, decresce o retorno marginal obtido quanto a quantidade necessária de hora extra.

Por fim o autor apresenta as seguintes conclusões interessantes:

- a) A existência ou não de incerteza na demanda não muda o tamanho do ciclo total de produção ótimo, portanto tempo ocioso não serve como proteção contra a incerteza da demanda.
- b) A sequência ótima para o problema determinístico pode ser diferente da sequência ótima para o problema estocástico porque uma eventual frequência de produção maior para um item qualquer resulta em, por um

lado, maior tempo *setup* total, mas, por outro lado, em menor necessidade global esperada de hora extra.

- c) O uso de folga planejada é uma opção cara quando comparada ao estoque de segurança ou a hora-extra.

FRANSOO (1992) e FRANSOO *et al.* (1995) desenvolveram e aperfeiçoaram método referenciado em indústrias de processo, particularmente focados nos requisitos de uma aplicação real: a produção de garrafas e frascos de vidro com alta demanda, da ordem de 95% da capacidade – sem computar o tempo *setup* necessário.

Optaram por maximizar o lucro, dado que os produtos possuíam margem de contribuição diferenciada, e assumiram que deveriam maximizar a utilização da capacidade e que não seria possível atender toda a demanda.

Desenvolveram então método de decisão em duas fases, de modo que primeiro calcula-se os tamanhos de ciclo de modo a equilibrar a capacidade disponível com a necessária. Na segunda fase faz-se apenas ajustes no mix dos produtos, evitando-se a estratégia de outros métodos que reduzem lotes diante da perspectiva de falta de estoque com agravamento dos problemas de capacidade.

### **3.3.2 Sequência variável**

#### **3.3.2.1 Fila estática**

ZIPKIN (1986) desenvolveu alguns modelos de otimização (minimização de custos totais) conectando modelos de estoque de tipo (q, r) - baseados em quantidade fixa de encomenda e ponto de pedido – com modelos básicos de fila onde a máquina é o servidor e as ordens de produção formam a fila de clientes aguardando atendimento.

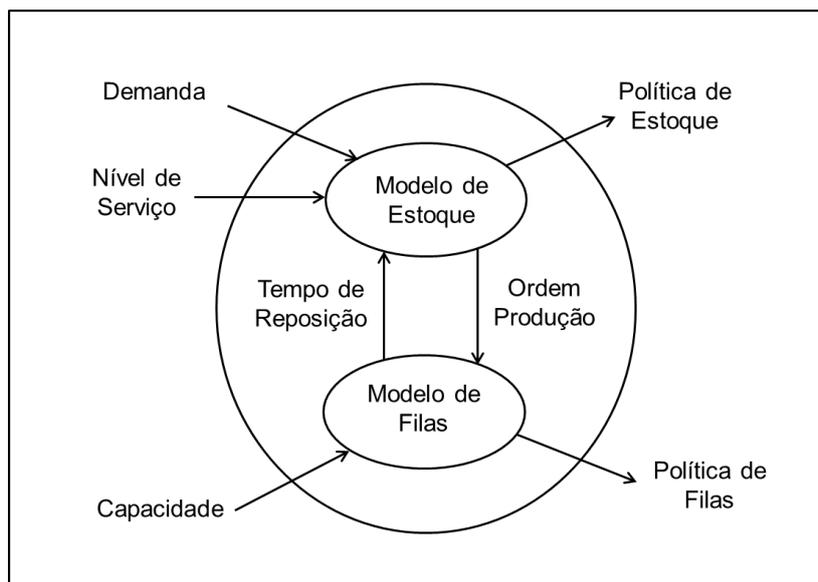


Figura 6: Conexão entre modelo de estoque e modelo de fila

A conexão muda um pouco o modelo de estoques porque o tempo de reposição deixa de ser um dado externo e passa a ser obtido a partir da estimativa do tempo de espera na fila. E muda um pouco também o modelo de fila porque o processo de chegada de clientes (as ordens de produção) também deixa de ser externo, passando a ser comandado pelo subsistema de estoques. A Figura 6 abaixo ilustra esquematicamente o modelo resultante.

Além dos pressupostos já colocados pelos modelos de estoque e de filas, ZIPKIN (1986) assumiu outras hipóteses simplificadoras e realizou aproximações para, com isso, tornar mais fácil o tratamento computacional dos modelos. Segundo o autor, o objetivo é evitar modelos muito mais complexos que ofereçam resultados apenas um pouco mais precisos.

Neste sentido, o autor construiu e provou ser convexos e lineares modelos que atendam as seguintes premissas (além daquelas mais fundamentais já presentes nos modelos de estoques e filas):

- a) transferência integral da ordem de produção ao estoque;
- b) demanda não atendida imediatamente pelo estoque fica pendente;
- c) chegada das ordens de produção à fila em processo de Poisson (em decorrência de premissas básicas dos modelos de fila e estoque);
- d) fila com disciplina FIFO;
- e) tempo de produção exponencialmente distribuído ou com distribuição genérica;

- f) tempo de produção dos diferentes produtos idêntico ou não;
- g) tempo de produção de cada produto fixo, independente do tamanho do lote.

O autor mostrou ainda que se o tempo de produção passa a depender do tamanho de lote o modelo deixa de ser convexo. Podendo, entretanto, ser aproximado como convexo caso os lotes sejam suficientemente pequenos.

Em conclusão, cita que outros modelos mais complexos e genéricos da teoria de filas podem vir a ser úteis, desde que ofereçam estimativas também para a variância do tempo de fila, não apenas para a média.

Ressalta ainda a dificuldade de se incorporar na regra de fila a informação sobre o estoque corrente de todos os itens, devido ao imenso espaço de estados do processo estocástico resultante. Não descarta, entretanto, disciplinas de fila mais flexíveis desde que se refiram às ordens de produção já liberadas.

Apesar de dedicar grande parte do artigo a discussão da convexidade dos modelos, ressalta paradoxalmente que ela pode não ser tão importante quando se tem poucas alternativas de políticas de controle em avaliação.

Nesta linha apontada por ZIPKIN (1986), ALTIOK e SHIUE (1994; 1995; 2000) estimaram a demora na fila e usaram esta informação para dimensionar sistemas de controle de estoques do tipo  $(R, r)$ .

Sistemas  $(R, r)$  funcionam da seguinte maneira: quando o nível do estoque alcança o ponto de reposição  $r$ , a reposição do estoque é solicitada em quantidade suficiente para repor o nível máximo  $R$ .

Nos artigos de 1994 e 1995 a análise se limitou a 3 produtos, enquanto que no artigo de 2000 esta restrição foi superada. Em todos os artigos a política de fila foi estabelecida como premissa dos modelos.

WINANDS *et al.* (2009b) relataram estudo de caso onde conectaram modelo de estoque com modelo de fila, onde cálculos analíticos aproximados foram realizados por ferramenta computacional de apoio.

### 3.3.2.2 Fila dinâmica

#### 3.3.2.2.1 Lote fixo

SEGERSTEDT (1999) propõe método completo de gestão composto por duas soluções heurísticas, uma para a sequência de produção e outra para o tamanho de lote.

Quanto à disciplina de fila, a proposta é enfileirar os itens da menor para a maior cobertura do estoque, conforme a primeira parte da regra experimentada por BRANDER *et al.* (2005) - ver seção anterior. ZHENG e ZIPKIN (1990) mostraram que esta política de fila tem vantagens sobre a política FIFO (isto é: atender primeiro quem chegou primeiro - "first in - first out").

Quanto ao tamanho de lote, ele propõe método que não difere tanto dos propostos pela literatura de ELSP: inicia com todos os itens sendo produzidos uma vez por período e, em seguida, verifica a conveniência (em termos de custos) de dobrar o tamanho de lote daquele que tem o *setup* mais caro, prosseguindo com este mesmo critério para outros itens. O resultado é uma regra do tipo "potência de dois", reconhecida como mais prática e de custo um pouco mais alto.

O autor conclui dizendo que o mérito de sua proposta é que ela, ao mesmo tempo, não se descuida da escala adequada de produção e é sensível ao curto prazo, por se basear nos estoques correntes. Indica o método para ambientes de produção *just-in-time*. Reconhece ser necessário que a tomada de decisão do "próximo a produzir" ocorra algum tempo antes do momento de início de sua produção e, sugere o uso de estoque de segurança para proteção durante este tempo.

NILSSON e SEGERSTEDT (2008) aperfeiçoaram o método de obtenção dos tamanhos de lote de SEGERSTEDT (1999) através de heurísticas melhoradas. Uma contribuição interessante de NILSSON e SEGERSTEDT (2008), é que eles substituem uma condição tradicional, usada pela literatura de ELSP, para que uma a sequência de produção seja considerada viável, por outra menos restritiva. A condição tradicional diz que: o estoque de um item deve ser nulo no início e no fim de seu ciclo de produção e durante o ciclo ele não pode ser negativo. NILSSON e SEGERSTEDT (2008) alteraram dizendo que basta o estoque inicial ser igual ao final e a demanda ser integralmente atendida.

BRANDER *et al.* (2005) avaliaram através de simulação o comportamento dos métodos determinísticos desenvolvidos por BOMBERGER (1966) e por SEGERSTEDT (1999), quando submetidos à demanda estocástica. Para isso, BRANDER *et al.* (2005) complementaram os referidos métodos com procedimento dinâmico de fila para escolher, ao final de cada lote, qual será o próximo produto a ser produzido ou se a máquina ficará parada. Este procedimento, que segundo os autores é similar ao de LEACHMAN e GASCON (1988), é composto por duas partes, a saber:

- a) Os itens são enfileirados da menor para a maior cobertura do estoque (calculado pela divisão do saldo em estoque pela demanda prevista) e o próximo a ser produzido será aquele com menor estoque.
- b) A máquina só ficará parada se, para todos os itens, ocorrer do estoque corrente do item ser maior que a sua demanda esperada durante o tempo até que ele volte a ser produzido (considerando sua posição na fila) mais um estoque de segurança.

A partir das simulações, os autores concluem que métodos como estes, desenvolvidos para ambientes determinísticos, funcionam bem e podem ser aproveitados em ambientes estocásticos, desde que sejam combinados com regras de fila como a que eles usaram.

Concluem também que a disciplina de fila é mais importante para que se obtenha um bom resultado do que os tamanhos do lote.

Esta é uma questão importante porque, métodos flexíveis por um lado são bons porque permitem que o sistema se ajuste na medida em que as incertezas aparecem. Mas, por outro lado, variações sejam nas quantidades produzidas ou nos momentos de produção, muitas vezes impõem custos operacionais ou impedem racionalizações dos processos.

#### 3.3.2.2.2 Lote variável

LEVEN e SEGERSTEDT (2007) aperfeiçoaram o método de obtenção dos tamanhos de lote de SEGERSTEDT (1999) através de heurísticas melhoradas.

A principal contribuição do artigo de LEVEN e SEGERSTEDT (2007), em relação à heurística original é que, após obtida a sequência de produção, caso ela aponte provável falta de algum produto, os tamanhos de lote originalmente planejados de todos os produtos anteriores na sequência são reduzidos na mesma proporção para que a falta seja evitada.

#### 3.3.2.2.3 Peça a peça, definido globalmente

QIU e LOULOU (1995) modelaram o SELSP como processo estocástico semimarkoviano e o resolveu usando programação dinâmica, se aproximando muito da solução ótima para o problema e estimando inclusive o desvio máximo do ótimo.

O método proposto pelos autores é ilustrado através de exemplo para dois itens, incluindo gráfico que demonstra como seria o uso do método (veja-o na Figura 7 abaixo). Ao concluir a produção de cada peça, dependendo do estado do sistema (nível dos estoques e *setup* da máquina) neste momento, o gráfico indica que ação deve ser tomada: produzir mais uma peça igual, iniciar *setup* e produção de uma unidade do outro item ou manter a máquina parada.

O gráfico representa o universo dos possíveis estados do sistema: os eixos representam os estoques dos itens 1 e 2 e cada ponto a situação global dos estoques. As linhas (contínua ou pontilhada) delimitam 4 áreas que determinam o que produzir. Quando o ponto indicativo dos estoques se encontra na região I deve-se produzir o item 1, independente de quem esteja em produção. A região III manda produzir o item 2, também incondicionalmente. A região II indica que a máquina deve ficar ociosa e a região IV determina que deve-se continuar produzindo o item que já estiver em produção, seja ele qual for. Se uma das linhas (contínua ou pontilhada) é atravessada significa que a ação a ser tomada deve mudar.

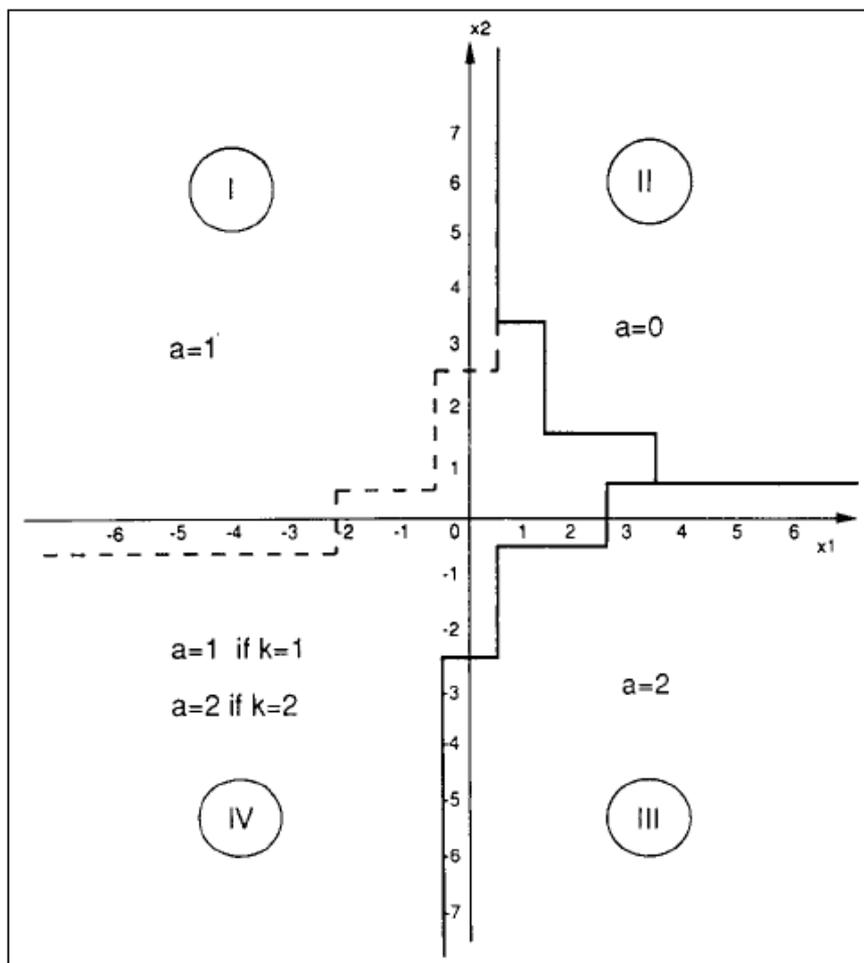


Figura 7: Exemplo da política proposta por QIU e LOULOU (1995), indicativa do que produzir em função dos estoques correntes de 2 itens (extraída do artigo do autor)

A partir deste exemplo, os autores destacam a distância entre a política ótima e políticas mais comuns como aquelas baseadas em ponto de pedido ou estoque máximo.

Esta proposta, entretanto, apresenta as seguintes limitações:

- a) a natureza combinatória do número de possíveis estados do processo estocástico que cresce extremamente rápido conforme aumenta o número de itens e o nível máximo dos estoques; e
- b) a dificuldade de operar, e mesmo comunicar ao usuário, a política a ser seguida quando temos mais do que dois itens.

PATERNINA-ARBOLEDA e DAS (2005) propõem um método de otimização baseado em simulação usando procedimentos da inteligência artificial. A simulação é baseada em multi agentes, um para cada item, que decidem ao final da produção do seu item, qual deve ser o próximo a ser produzido ou se a máquina deve ficar parada. O

procedimento de inteligência artificial usado para "ensinar" os agentes a tomar a decisão é o *reinforcement learning* (SUTTON e BARTO, 1998).

Adicionalmente, é usado esquema baseado em rede neural (HAYKIN, 1994) para aproximar os valores de *reinforcement* necessários a cada possível estado / ação pois estes tem natureza combinatória, já que para cada agente os possíveis estados são os níveis de estoque dos demais itens e as possíveis ações são as escolhas que ele pode realizar, tornando inviável o armazenamento explícito.

Segundo os autores, o método proposto tem como problema ser uma "caixa preta" na medida em que os usuários teriam dificuldade de compreender o processo de decisão. Para minimizar o problema, eles propõem usar *data mining* (HAN *et al.*, 2006) para extrair a lógica usada do histórico de decisões e então comunicar esta lógica ao usuário em forma de árvore de decisão.

Os autores afirmam que o método é computacionalmente rápido podendo ser usado em instâncias maiores.

O uso de rede neural acelera significativamente a convergência do método mas, por outro lado, tem como desvantagem a necessidade de boa escolha dos parâmetros da rede, reconhecido como delicado pelos autores.

### 3.3.2.3 Rede de Filas

Um tópico relevante para o desenvolvimento de soluções baseadas em sequências variáveis é rede de filas.

HAJEK (1984) estudou uma rede de filas composta por dois servidores que tem o problema de priorização da produção do SELSP como um caso particular. Ele demonstrou que políticas ótimas de controle destas redes são descritas por curvas de comutação que dividem o espaço de estados do sistema em regiões, cada uma delas indicando uma ação de controle. Veja exemplo esquemático na Figura 8 abaixo.

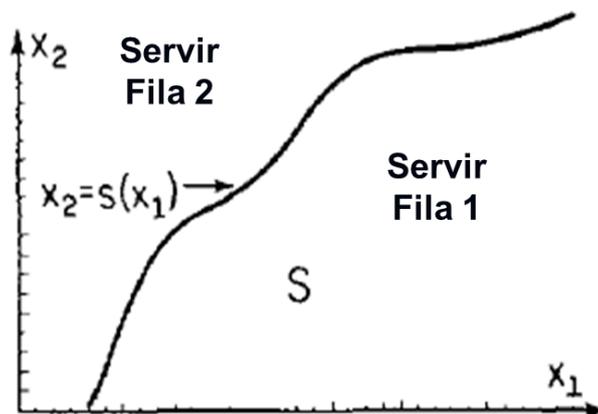


Figura 8: Exemplo de curva de comutação de políticas<sup>4</sup>

A política ótima em processos estocásticos de redes de filas como esta estudada por HAJEK (1984) pode ser obtida através de algoritmos de programação dinâmica (PUTERMAN, 2009). Esta foi a abordagem de solução usada por QIU e LOULOU (1995), sendo limitada, entretanto, a poucos produtos e / ou poucos níveis de estoques por restrições computacionais.

#### 3.3.2.3.1 Modelos de Fluidos

Alguns autores, interessados em redes de filas diferentes das existentes no contexto do SELSP, usaram resultados do trabalho de HAJEK (1984) para obter políticas próximas da ótima a partir da solução ótima de modelos de fluidos associados à rede discreta original (MEYN, 1997; VEATCH, 2001).

Os modelos de fluidos são obtidos quando os eventos discretos da rede original são substituídos por processos contínuos e determinísticos, comandados pelas mesmas taxas médias. Se a rede discreta é estável, o modelo de fluido será transiente, drenando até secar a partir de qualquer estado inicial. A função objetivo é o custo acumulado de estocar, até que o estoque seja totalmente esgotado (CHEN e MANDELBAUM, 1991).

A obtenção da solução ótima do modelo de fluidos é bem mais simples, e ela se aproxima assintoticamente da solução ótima do problema discreto original, à medida que aumenta o congestionamento da rede (MEYN, 1997; VEATCH, 2001).

<sup>4</sup> Adaptado de HAJEK (1984)

## 4 DIRETRIZES PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA

No intuito de embasar o desenvolvimento de uma nova solução para o SELSP que seja adequada ao sistema puxado de reposição, este capítulo primeiramente resume os tópicos considerados mais relevantes da revisão bibliográfica. Em seguida são estabelecidas as regras de controle que são assumidas como premissas do novo método.

### 4.1 SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir são relacionados os pontos chaves da revisão bibliográfica para o desenvolvimento de uma nova solução para o SELSP, que seja adequada a módulos de produção típicos dos sistemas puxados nivelados, tal como descrito no Capítulo 2:

1) Conforme mostra a Tabela 2 e foi constatado por WINANDS *et al.*, (2011), em sua revisão sobre o estado da arte do SELSP, a maior parte das propostas de solução pré-estabelecem regras estáticas, mantidas fixas independentemente do estado do sistema. Em particular, a maioria das soluções encontradas na literatura utiliza sequência fixa de produção. Em contraste, são exatamente as estratégias flexíveis que tem maior chance de se aproximar da solução ótima.

2) Foram encontradas na literatura apenas duas propostas de solução totalmente flexíveis para o SELSP: a primeira proposta por QIU e LOULOU (1995), cujo uso está limitado a apenas 2 produtos, e a segunda apresentada por PATERNINA-ARBOLEDA e DAS (2005). Os próprios autores do segundo método reconhecem que este tipo de solução é de difícil compreensão pelos usuários. Além disso, para muitas instâncias reais, podem impor maiores custos logísticos devido à incerteza transmitida aos processos.

3) Diante de tão poucos resultados em termos de métodos flexíveis, WINANDS *et al.* (2011) sugeriu enfaticamente mais pesquisas buscando estratégias de produção dinâmicas, baseadas em regras intuitivas, próximas do ótimo, que possam ser usadas em problemas com muitos produtos.

4) Um dos poucos métodos nesta direção foi desenvolvido e aperfeiçoado por SEGERSTEDT (1999), LEVÉN e SEGERSTEDT (2007) e NILSSON e SEGERSTEDT (2008). Eles exploram a ideia de produzir primeiro o produto cujo estoque estiver mais próximo de se esgotar (regra que será chamada de *PAPS*: “primeiro

a acabar o estoque, primeiro a ser servido”). ZHENG e ZIPKIN (1990) constatou vantagem desta política sobre a tradicional FIFO.

5) Baseado em simulações, BRANDER *et al.* (2005), mostrou que a disciplina de fila proposta por SEGERSTEDT (1999), apresentou resultados semelhantes com diferentes políticas de lote. Eles sugerem que disciplinas dinâmicas de fila impactam mais decisivamente na qualidade das soluções do que as políticas de lote. Postulam, a partir daí, que se as sequências de produção são dinâmicas, então os tamanhos do lote podem ser fixos, sem maiores consequências.

6) ZIPKIN (1986) sugeriu conectar modelos clássicos de estoque com modelos clássicos de filas das ordens de ressuprimento para a solução do SELSP. Mostrou que os problemas resultantes são convexos, sob determinadas condições.

7) HAJEK [1984] demonstrou que o subproblema de sequenciamento do SELSP possui política ótima estacionária, baseada em regra markoviana e determinística, representáveis através de superfícies de comutação de políticas.

8) Uma estratégia para se obter soluções próximas do ótimo para redes de filas estáveis é através da solução dos seus modelos de fluidos associados [MEYN, 1997; VEATCH, 2001, CHEN, 1991].

#### 4.2 REGRAS DE CONTROLE PROPOSTAS

Deseja-se construir uma solução para o problema SELSP que seja, ao mesmo tempo:

- Adequada ao sistema puxado de reposição da abordagem *lean manufacturing*.
- Flexível e de fácil uso, conforme recomendado por WINANDS *et al.* (2011).
- Na busca deste equilíbrio, conforme sugerido por BRANDER *et al.* (2005), mantenha flexível a sequência de produção (decisão mais crítica) e fixe previamente os tamanhos de lote (decisão menos crítica).

Sendo assim, optou-se a priori pelo seguinte conjunto de regras de controle:

- passo fixo de produção;
- sequenciamento flexível de produção;
- política (s, Q) de controle de estoque.

Sabe-se que assumir regras de controle a priori equivale a restringir o universo de possíveis soluções, talvez descartando as melhores de antemão. Mas, soluções totalmente flexíveis, além do uso mais difícil, contrariariam as peculiaridades do sistema puxado de reposição, limitando as possibilidades de uso real e tornando projetos de implantação ainda mais complexos do que normalmente já são (VRIES, 2013).

Nas próximas subseções cada uma das regras escolhidas é detalhada e justificada através de discussão de suas vantagens e desvantagens.

Vale notar que nestas subseções apenas se descreve o modo de operação das regras propostas. Para a completa definição do método de gestão proposto é necessário ainda um método de cálculo de seus parâmetros, assunto tratado nos próximos capítulos.

#### **4.2.1 Passo fixo de produção**

O passo fixo de produção, conforme explicado na Seção 2.2, é uma regra necessária por ser parte do sistema puxado de reposição.

Além de manter lotes predeterminados, obrigar que sejam todos iguais em tempo, produzirá custos extras, além do custo mínimo que uma política ótima incorreria, sem dúvida.

Em contrapartida, o passo fixo oferece as vantagens organizacionais que foram relacionadas na Seção 2.2. A possibilidade de reduções nos tempos e custos de *setup*, em especial, compensa ao menos parcialmente estes custos extras.

Outras vantagens são:

- a) Garantia de que o percentual de tempo realmente consumido com *setups* não será afetado pela demanda corrente, se mantendo no nível planejado no momento de cálculo dos tamanhos dos lotes. Ao contrário, portanto, de estratégias de lotes variáveis que podem comprometer a capacidade ao reduzir lotes, em determinado cenário, devido a número maior de *setups*.
- b) Facilidade no entendimento e adoção prática do método.
- c) Automática adequação a realidade das empresas que já operam assim.

### 4.2.2 Sequenciamento flexível

A opção pelo sequenciamento flexível resulta em que será necessário encontrar uma boa política de sequenciamento, como parte do problema global que é tratado nos próximos capítulos.

Vale notar que, com a adoção simultânea do passo fixo e do sequenciamento dinâmico, a tendência é que sejam produzidos produtos diferentes a cada passo. Então, se o passo for suficientemente reduzido, a solução adotada se aproximará da produção nivelada (*heijunka*) idealizada pela metodologia *lean manufacturing*.

Uma limitação prática importante ao uso deste tipo de solução é que os custos e tempos de *setups* devem ser independentes da sequência de produção. Em caso contrário, o uso de sequência fixa será provavelmente mandatório.

### 4.2.3 Controle de estoque ( $s, Q$ )

A política ( $s, Q$ ) de controle de estoque se adéqua naturalmente aos sistemas puxados de reposição da abordagem *lean manufacturing*. Ela pode ser facilmente adaptada para uso com os tipos de *kanban* mais usados em supermercados: o *in process kanban* ou o *signal kanban*.

Tem ainda as seguintes vantagens:

- Compatível com o sequenciamento flexível da produção (seção acima).
- Facilidade de adoção prática e uso, podendo ser implementada através de simples controles visuais.

Esta política funciona também como critério de parada de produção: quando o estoque de todos os produtos estiver acima dos respectivos pontos de pedido.

É, entretanto, um critério sub ótimo, pois não é baseado no estado global do sistema. Ao contrário, cada produto sinaliza pela continuação da produção ou não em função apenas de seu próprio estoque.

## 5 MODELO PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA GLOBAL

Para solucionar completamente o SELSP enfocado, a partir das estratégias de produção descritas no capítulo anterior, é necessário determinar a disciplina de fila e as seguintes variáveis: o passo, os tamanhos de lote e os pontos de pedido dos produtos.

Para isso, este capítulo formula um modelo através do acoplamento de equações típicas de modelos de estoques com equações típicas de modelos de filas. Conforme descrito no Capítulo 3, esta abordagem foi proposta originalmente por ZIPKIN (1986) que mostrou que os modelos resultantes são convexos, sob determinadas condições.

### 5.1 PREMISSAS

Desejamos encontrar a política que ofereça o menor custo total de estocar, respeitados os requisitos de mercado e o limite de capacidade. Neste sentido, são assumidas as premissas abaixo relacionadas.

Premissas sobre a relação com o mercado:

- a) A demanda ao longo do tempo forma um processo de Poisson, com taxa de chegada conhecida.
- b) O nível de serviço (isto é: percentual de vezes em que a demanda durante o tempo de reposição do estoque é integral e imediatamente atendida em relação ao número total de lotes solicitados) é pré-definido, como uma restrição imposta pelo mercado.
- c) A demanda que não é prontamente atendida fica pendente, para atendimento logo que possível (*backlog*).

Premissas sobre o processo produtivo, organização da produção e tempo:

- d) Os tempos unitários de produção e de *setup* de cada produto são determinísticos, conhecidos e independentes da sequência de produção.
- e) A capacidade de produção é previamente contratada, mantendo-se todo o tempo em um patamar fixo e conhecido.
- f) No momento em que é disparada uma nova ordem de produção (ou seja: quando o ponto de pedido é alcançado), toda a matéria prima necessária à

produção do lote é disponibilizada para o processo produtivo, onerando o estoque em processo na exata proporção do tamanho do lote.

- g) O lote concluído é entregue ao estoque integralmente, ao final da sua produção.
- h) Lotes e saldos em estoques podem ser fracionários.
- i) O horizonte de planejamento é indeterminado ou infinito.
- j) O método de gestão deve usar um passo fixo de produção e um modelo de estoque do tipo  $(s, Q)$  para compatibilidade com o sistema puxado de reposição, como explicado na Seção 4.2.

Premissas sobre os custos operacionais:

- k) Cada produto possui um custo de estocar diretamente proporcional ao nível médio de seu estoque total (englobando estoque de segurança, estoque de ciclo e estoque em processo).
- l) O custo de produção é diretamente proporcional à quantidade de capacidade contratada, portanto fixo.
- m) Inexiste custo de *setup* significativo (além da perda de tempo de produção).

## 5.2 NOMENCLATURA

a) Conjuntos:

- $i$  índice que indica um item de estoque;
- $N$  total de itens diferentes presentes no sistema;

b) Dados de entrada:

- $\bar{d}_i$  demanda média do produto  $i$  (em unidades por unidade de tempo);
- $o_i$  tempo de operação para produzir uma unidade do produto  $i$  (em unidades de tempo por unidade);
- $a_i$  tempo para realizar um *setup* do produto  $i$  (em unidades de tempo);
- $K_i$  nível de serviço do produto  $i$ , requerido pelo mercado (em percentual);

$I_i$  custo de estocar uma unidade do produto  $i$  durante uma unidade de tempo (em unidades monetárias por unidade por unidade de tempo).

c) Variáveis de decisão:

$Q_i$  quantidade fixa do lote de encomenda do produto  $i$  (em unidades);

$s_i$  ponto de pedido do produto  $i$  (em unidades);

$P$  duração do passo de produção (em unidades de tempo).

d) Demais variáveis:

$d_i$  demanda do produto  $i$  (em unidades por unidade de tempo);

$A$  número de *setups* por unidade de tempo, considerando todos os produtos (em vezes por unidade de tempo);

$\rho$  taxa de ocupação da capacidade por todos os produtos, incluindo o tempo dos *setups* (em percentual);

$W_i$  tempo de espera de uma ordem do produto  $i$  na fila (variável aleatória, em unidades de tempo).

### 5.3 MODELO GLOBAL

O modelo para cálculo dos parâmetros é composto pela função objetivo e pelas restrições explicadas abaixo:

a) Função objetivo:

Tendo em vista o conjunto de premissas relacionadas a custo (Seção 5.1 acima), o objetivo é minimizar o custo total médio de estocar no longo prazo.

Para estimar o estoque médio do produto  $i$  assumimos que: (i) o estoque de segurança mais o estoque em processo é equivalente ao ponto de pedido  $s_i$ , (ii) o estoque de ciclo médio é a metade do tamanho do lote  $Q_i$ . Assim, podemos definir a função objetivo como:

$$Z = \min \sum_{i=1}^N I_i s_i + \sum_{i=1}^N I_i (Q_i/2) \quad (1)$$

b) Restrição de capacidade:

Na medida em que a capacidade contratada se mantém fixa em todo o horizonte de planejamento, e este é infinito, o tempo total disponível se divide em três parcelas:

- Tempo total para executar operações: é um percentual fixo da capacidade contratada.
- Tempo total de *setup*: é inversamente proporcional ao tamanho dos lotes e limitado pela diferença entre o tempo total contratado e o tempo total das operações (pois em caso contrário a demanda não poderia ser integralmente atendida).
- Tempo ocioso: é o tempo não empregado nem em operações nem em *setup*, necessariamente maior que zero devido às flutuações aleatórias da demanda.

A restrição (2) abaixo expressa a limitação ao tempo total empregado em *setups*. Este tempo total está do lado esquerdo da equação, sendo que a taxa de demanda  $\bar{d}_i$  dividida pelo tamanho do lote  $Q_i$  resulta no número médio de *setups* do produto  $i$  por unidade de tempo. Do lado direito da equação, o resultado do somatório é o tempo total médio gasto com operações por unidade de tempo e o resultado da subtração é o tempo total médio não produtivo (tempo ocioso ou *setup*) por unidade de tempo.

$$\sum_{i=1}^N \left( a_i \frac{\bar{d}_i}{Q_i} \right) < 1 - \sum_{i=1}^N (\bar{d}_i o_i) \quad (2)$$

c) Restrições de passo fixo de produção:

A política de se usar o mesmo passo de produção para qualquer produto, impõe o conjunto de restrições (3). Com isso, todos os tamanhos de lote estarão univocamente determinados como decorrência direta do passo  $P$  escolhido.

$$(Q_i o_i) + a_i = P \quad \forall i = 1 \dots N \quad (3)$$

d) Restrição quanto ao número de *setups*:

A restrição (4) abaixo, fixa o número de *setups* necessários por unidade de tempo ( $A$ ) em função dos tamanhos de lote  $Q_i$ . Vale notar que o passo  $P$  indiretamente fixa a variável  $A$ , devido a combinação da restrição abaixo com as restrições (3).

$$A = \sum_{i=1}^N \frac{\bar{d}_i}{Q_i} \quad (4)$$

e) Restrição da taxa de ocupação de capacidade:

Como o número de *setups* por unidade de tempo  $A$  é exatamente o número de passos não ociosos por unidade de tempo (ou lotes que serão produzidos por unidade de tempo), a equação (5) abaixo estabelece a taxa de ocupação da capacidade  $\rho$ .

$$\rho = A P \quad (5)$$

f) Restrições de nível de serviço:

Por definição da teoria básica de estoques, o ponto de pedido  $s_i$  é a quantidade de produtos dedicados a atender à demanda durante o tempo de reposição do estoque. Neste caso, o tempo de reposição será o tempo de espera de uma ordem do produto  $i$  na fila  $W_i$  mais o passo  $P$ , que é o tempo de produção do lote. Então, o conjunto de restrições (6) impõe que os pontos de pedido  $s_i$  sejam tal que os níveis de serviço  $K_i$  sejam respeitados:

$$P ( (W_i + P)d_i \leq s_i ) \geq K_i \quad \forall i = 1 .. N \quad (6)$$

As variáveis  $W_i$  dependem da disciplina de fila, que é o assunto do próximo capítulo. Destaca-se preliminarmente que é complexo descrever analiticamente o comportamento desta variável aleatória quando a disciplina de fila não é FIFO. Conforme observado por ZIPKIN (1986), deve-se notar que é indispensável estimar a variância de  $W_i$ , além da média, pois o objetivo é determinar o estoque de segurança de cada produto (que é uma parcela do  $s_i$ ).

g) Restrições de domínio das variáveis:

Por fim, as restrições abaixo estabelecem os domínios das variáveis do modelo:

$$Q_i > 0 \quad \forall i = 1..N$$

$$s_i \geq 0 \quad \forall i = 1..N$$

$$P > 0$$

$$A > 0$$

$$1 > \rho \geq 0$$

$$W_i \geq 0 \quad \forall i = 1..N$$

h) Em síntese, eis o modelo:

$$Z = \min \sum_{i=1}^N I_i s_i + \sum_{i=1}^N I_i (Q_i/2) \quad (1)$$

Sujeito à:

$$\sum_{i=1}^N \left( a_i \frac{\bar{d}_i}{Q_i} \right) < 1 - \sum_{i=1}^N (\bar{d}_i o_i) \quad (2)$$

$$(Q_i o_i) + a_i = P \quad \forall i = 1..N \quad (3)$$

$$A = \sum_{i=1}^N \frac{\bar{d}_i}{Q_i} \quad (4)$$

$$\rho = A P \quad (5)$$

$$P ((W_i + P)d_i \leq s_i) \geq K \quad \forall i = 1..N \quad (6)$$

$$Q_i > 0 \quad \forall i = 1..N$$

$$s_i \geq 0 \quad \forall i = 1..N$$

$$P > 0$$

$$A > 0$$

$$1 > \rho \geq 0$$

$$W_i \geq 0 \quad \forall i = 1..N$$

#### 5.4 INTERPRETAÇÃO GRÁFICA

A Figura 9 abaixo, que relaciona a variável  $A$  (número de *setups* por unidade de tempo) com a função objetivo (1), oferece uma interpretação gráfica de uma parte relevante do modelo apresentado na seção anterior. O valor desta variável determina o quanto da capacidade não comprometida com a execução das operações será alocada para a execução de *setups* e quanto permanecerá como folga para acomodar as incertezas da demanda. Ou seja, ela determina uma solução para o seguinte *trade-off*:

- custo do estoque de ciclo (que é resultante da produção em lotes e aparece como o segundo somatório da função objetivo), que será tão menor quanto maior for o valor da variável  $A$ ; e
- custo dos estoques de segurança e de fluxo (materializados nos pontos de pedidos  $s_i$ , compõe o primeiro somatório da função objetivo), que serão tão menores quanto maior for a folga de capacidade.

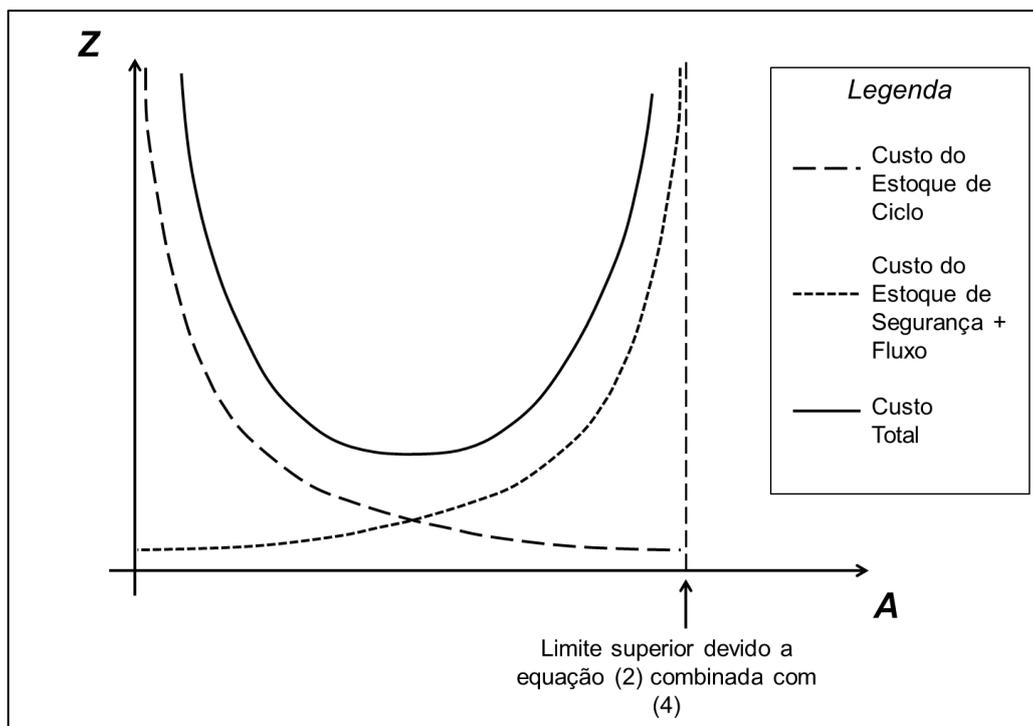


Figura 9: Nível do estoque em função do percentual de tempo gasto com *setup*

Como a restrição (4) mostra que variável  $A$  e os lotes  $Q_i$  são inversamente proporcionais, vemos na Figura 9 que valores muito reduzidos de  $A$  resultam em altos tamanhos dos lotes e, portanto, altos custos de estoque de ciclo. A partir daí, pequenos incrementos em  $A$  retornam grandes reduções neste custo. Mas novos aumentos em  $A$  retornam reduções cada vez menores, conforme mostrado na Figura 9.

A Figura 9 mostra também que o estoque de segurança somado ao estoque de fluxo tem comportamento inverso na sua relação com a variável  $A$ . Isto ocorre porque se aumentamos o valor de  $A$  aumentamos a taxa de ocupação  $\rho$  devido a restrição (5), aumentando os tempos de espera das ordens de reposição na fila  $W_i$ . Com isso, os pontos de pedidos precisam ser maiores devido às restrições (6), elevando o valor do primeiro somatório da função objetivo. Da teoria básica de filas (FOGLIATTI, 2007), sabe-se que este impacto de  $\rho$  sobre os tempos de espera  $W_i$  se acentua conforme  $\rho$  se aproxima de 1, acentuando portanto o aumento dos custos associados aos pontos de pedidos, conforme mostrado na Figura 9.

Em síntese, esta análise mostra a relevância de se estabelecer adequadamente a variável  $A$ , devido ao seu impacto sobre todos os custos envolvidos.

Observa-se por fim que fixar  $A$  significa fixar o passo  $P$ , pois estas duas variáveis estão biunivocamente relacionadas através das restrições (3) e (4), ambas de igualdade.

## 5.5 ALGORITMO DE SOLUÇÃO

Esta seção apresenta a estrutura de um algoritmo iterativo que resolve o modelo global formulado na Seção 5.3, a partir de alguma disciplina de fila que seja previamente estabelecida. Dada esta disciplina, são determinados valores próximos ao ótimo para o passo, os tamanhos de lote e os pontos de pedido.

Quanto a escolha da disciplina de fila, este assunto é tratado no próximo capítulo.

É importante notar que a resolução analítica exata do modelo da Seção 5.3 é difícil por ele ser não linear e, ao mesmo tempo, depender de funções de densidade de probabilidade relacionadas às equações (6). Estas funções de densidade de probabilidade são desconhecidas para a maioria das políticas de fila, se não todas. Diante disso, o algoritmo (ver os Quadros 1 e 2 abaixo) explora a convexidade do modelo, combinando dois procedimentos:

- a) Um algoritmo de busca unidimensional através da seção áurea (BAZARAA *et al.*, 2006; LUENBERGER e YINYU, 2008), que escolhe valores progressivamente melhores para o passo  $e$ , conseqüentemente, os tamanhos de lote.
- b) Uma rotina de simulação discreta estocástica para encontrar os menores pontos de pedido que, respeitada a disciplina de fila, sejam suficientes para atender os níveis de serviço  $K_i$ .

Quadro 1: Estrutura do Algoritmo de Solução do Problema

Constante:  $\epsilon$  (margem de erro para o passo de produção ótimo).

Variáveis:  $P_{Low}$ ,  $P_{High}$  (limites inferior e superior para o passo de produção).

- (1) Faça  $Q_i = 1, \forall i = 1..N$  nas equações (3) e atribua à  $P_{Low}$  o menor valor de  $P$  que respeite simultaneamente todas estas restrições.
- (2) Repita até que  $P_{Low}$  seja viável:
  - (2.1) Execute: Iteração ( $P_{Low}$ ).
  - (2.2) Se  $P_{Low}$  não é viável então incremente  $P_{Low}$ .
- (3) Repita até encontrar um  $P_{High}$  pior que  $P_{Low}$ :
  - (3.1)  $P_{High} := 2 P_{Low}$ .
  - (3.2) Execute: Iteração ( $P_{High}$ ).
- (4) Enquanto  $(P_{High} - P_{Low}) > \epsilon$  faça:
  - (4.1) Escolha novo valor para  $P$  usando a razão áurea.
  - (4.2) Execute: Iteração ( $P$ ).
  - (4.3) Atribua novo  $P_{Low}$  ou  $P_{High}$  de acordo com algoritmo da razão áurea.
- (5)  $P := (P_{Low} + P_{High}) / 2$ .
- (6) Execute: Iteração ( $P$ ).

Quadro 2: Estrutura do Procedimento “Iteração”

Input: passo  $P$ , e disciplina de fila previamente escolhidos.

Output: se  $P$  é viável, todas as demais variáveis do modelo e valor da função objetivo  $Z$ .

- (7) Calcule os tamanhos de lote  $Q_i$  usando as equações (3).
- (8) Verifique se  $P$  é viável através da equação (2).
- (9) Se  $P$  é viável então:
  - (9.1) Calcule o número de *setups*  $A$  e o fator de utilização  $\rho$  com equações (4) e (5).
  - (9.2) Estabeleça quaisquer valores provisórios para os pontos de pedido  $s_i$ .
  - (9.3) Simule o funcionamento do sistema, respeitando a disciplina de fila predefinida, e recolhendo amostra da demanda durante o tempo de reposição de cada produto  $i$ .
  - (9.4) Usando a amostra colhida no passo anterior, encontre os pontos de pedido  $s_i$  tal que respeitem as equações (6) e sejam os menores possíveis.
  - (9.5) Calcule  $Z$  usando a equação (1) e armazene o seu menor valor até agora.

Na linha 2.2, o tamanho do incremento do passo pode ser pequeno porque, como o loop da linha 2 é muito rápido para valores inviáveis de  $P_{Low}$ , não haverá problema de desempenho. Na linha 4, como o modelo é convexo, o método de busca unidimensional baseado na seção áurea garante que um passo  $P$  suficientemente próximo ao ótimo será encontrado em um número fixo de iterações, dependente apenas do tamanho do intervalo ( $P_{High}, P_{Low}$ ).

Vale notar que a cada iteração do algoritmo, quando a execução do algoritmo chega à linha 9.2, todas as variáveis já estão determinadas exceto os pontos de pedido  $s_i$ . Na linha 9.2, para viabilizar a simulação da linha seguinte, podem ser estabelecidos quaisquer valores provisórios para os pontos de pedido  $s_i$ . Apenas por comodidade (para que o mesmo algoritmo global possa ser usado com a disciplina PAPS - primeiro a acabar o estoque, primeiro a ser servido), os valores provisórios atribuídos equivalem à demanda média de cada produto durante um mesmo intervalo fixo de tempo, comum a todos os produtos.

Durante a simulação da linha 9.3, é então recolhida uma amostra da demanda durante o tempo de reposição do estoque de cada produto  $i$ . A partir desta amostra, os pontos de pedido  $s_i$  são por fim determinados na linha 9.4, de modo a atender os níveis de serviços  $K_i$  (equações 6) e que sejam os menores possíveis.

## 6 MODELO PARA O SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO

Como parte do SELSP, deseja-se encontrar regras de priorização que determinem que ordem de produção executar a cada passo  $P$ .

O subproblema de sequenciamento da produção é um problema de rede de filas do tipo *priorização de serviços* (HARRISON, 1975), onde:

- a cada ordem de produção corresponde um cliente;
- a cada tipo de produto corresponde uma classe de clientes;
- a cada classe de clientes corresponde uma fila;
- todas as filas são atendidas por um servidor único segundo alguma política de prioridade;
- deseja-se encontrar a política de prioridade que minimiza o custo médio de longo prazo de permanência dos produtos nas filas.

A Tabela 4 a seguir mostra a relação entre as variáveis do problema global e as variáveis do problema de sequenciamento. Para que a função objetivo do subproblema seja compatível com a do problema global, o custo de permanência de uma ordem na fila é o custo de estocar uma unidade do produto multiplicado pela quantidade da ordem.

Tabela 4: Relacionamento entre variáveis do Problema Global e do Subproblema de Sequenciamento

<i>Funções das Variáveis</i>	<i>Problema Global</i>	<i>Subproblema de Sequenciamento</i>
“Cliente”	<i>Peça</i>	Lote
Taxa de demanda	$\bar{d}_i$	$\lambda_i = \bar{d}_i / Q_i$
Taxa de produção	$\mu_i = Q_i / P$	$\mu = 1 / P = \mu_i / Q_i$
Custo de estocar	$I_i$	$c_i = I_i \cdot Q_i$

## 6.1 MODELO PARA SOLUÇÃO EXATA

Este subproblema pode ser modelado como um problema de decisão semi-markoviano com as seguintes características:

- O estado do sistema é o número de ordens de produção de cada produto aguardando processamento num dado instante.
- O espaço de estados é enumerável e infinito, já que o modelo global admite *backlog*.
- O momento de tomada de decisão é a cada início de passo  $P$ , tratando-se de uma sequência discreta e infinita de decisões ao longo do tempo.
- O processo é semimarkoviano porque o passo de produção é um valor determinístico predefinido.
- O espaço de ação é o seguinte conjunto de possíveis decisões: produzir qualquer um dos produtos ou manter o servidor ocioso.

Existe política ótima estacionária para este problema (HAJEK, 1984).

Para a definição formal do modelo é necessária a seguinte notação adicional:

- $\lambda_i$  Taxa de chegada de ordens de produção do produto  $i$ . Portanto:  $\lambda_i = \bar{d}_i / Q_i$ .
- $\mu$  Taxa de produção de um lote de qualquer produto, quando este está em produção. Portanto:  $\mu = 1/P$ .
- $x$  Número de ordens de cada produto aguardando processamento no instante  $t$ ; é o vetor de estado do sistema.
- $S$  Espaço de estado, isto é: conjunto de todas as possíveis combinações de número de ordens aguardando processamento para cada tipo de produto.
- $c$  Taxa de custo de permanência nas filas. Portanto, é um vetor no qual:  $c_i = I_i \cdot Q_i$ . Por comodidade, supõe-se que os produtos estão ordenados tal que:  $c_1 \geq c_2 \geq \dots \geq c_N$ .
- $t$  Momento de tomada de decisão (início de um passo  $P$ ).
- $\tilde{v}(x)$  Política de prioridade em função do estado  $x$ .
- $\Omega$  Conjunto de todas as possíveis políticas de prioridade.
- $H(x, \tilde{v}(x))$  Função que retorna o custo de manutenção de ordens na fila durante um passo  $P$ , quando estamos no estado  $x$  e aplicamos a política de prioridade  $\tilde{v}(x)$ .

Temos então a seguinte equação de otimalidade para o custo médio (PUTERMAN, 2009):

$$V(x) = \min_{\tilde{v} \in \Omega} \lim_{n \rightarrow \infty} E \left[ \frac{1}{n} \sum_{t=0}^n H(x, \tilde{v}(x)) \right] \quad \forall x \in \mathcal{S}$$

A Figura 10 abaixo ilustra o problema para o caso de 2 produtos. Temos as filas alimentadas por processos de Poisson com taxa  $\lambda_i$ . Uma fila é atendida de cada vez em função da política  $\tilde{v}(x)$ . O servidor para se todas as filas estiverem vazias.

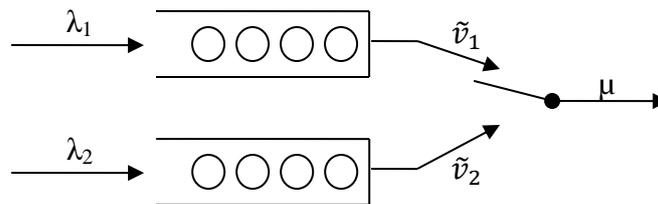


Figura 10: Visão Esquemática do subproblema de Sequenciamento para 2 produtos

A resolução exata deste problema é inviável para instâncias de interesse real, devido ao rápido crescimento do espaço de estados em função do número de produtos. Ele é então aproximado através do seu modelo de fluidos associado. Como explicado no final do Capítulo 3, a solução de um desses modelos é mais simples e aproxima assintoticamente a solução do problema discreto (CHEN e MANDELBAUM, 1991; MEYN, 1997; VEATCH, 2001).

## 6.2 APROXIMAÇÃO POR FLUIDOS

### 6.2.1 Construção do modelo

Para construir o modelo de fluidos, é usada a seguinte notação adicional:

$T$  Horizonte de tempo para um estado inicial  $x$ . É definido como sendo o instante no tempo mais cedo tal que  $x(t) = 0$  para todo  $t \geq T$ , para uma classe apropriada de políticas.

$v_i(t)$  Função que indica o percentual da capacidade do servidor dedicado à produção do produto  $i$  no instante  $t$ . Estabelece a política de controle para o modelo.

$u_i$  Fração da capacidade acumulada do servidor dedicada ao produto  $i$  durante todo o horizonte de planejamento  $T$ .

$M$  Variável que indica o primeiro produto que possui serviço aguardando na fila no instante  $t$ . Ou seja,  $M$  é tal que:  $\sum_{i=1}^{M-1} x_i(t) = 0$ .

$|x(t)|$  Número total de ordens de todos os produtos aguardando processamento no instante  $t$ . Ou seja: é a norma do vetor  $x$  definida por:  $\sum_{i=1}^N x_i$ .

O modelo é formulado através do seguinte conjunto de equações:

$$J(x) = \min \int_0^T c'x(t)dt \quad (7)$$

$$\dot{x}_i(t) = \lambda_i - \mu v_i(t) \quad \forall i = 1..N; \quad \forall t, 0 \leq t \leq T \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^N v_i(t) \leq 1 \quad \forall t, 0 \leq t \leq T \quad (9)$$

$$x(0) = x; \quad x(t) \geq 0; \quad v(t) \geq 0$$

A função objetivo (7) expressa que se deseja minimizar o custo total acumulado, desde um estado inicial  $x$  qualquer, até que o sistema seque, isto é: até que  $x(t) = 0$ . As restrições (8) regem a evolução do estado do sistema, através da diferença entre o fluxo de entrada e de saída, estando este último condicionado pela variável de decisão  $v_i$ . A restrição (9) representa o limite de capacidade do servidor.

## 6.2.2 Solução

A política ótima para o modelo fluido formulado acima é estabelecida pelo Teorema 1 abaixo.

*Teorema 1:* A política ótima para o modelo de fluidos é dada por:

$$i < M: v_i = \frac{\lambda_i}{\mu}; \quad i = M: v_i = 1 - \sum_{i=1}^{M-1} \frac{\lambda_i}{\mu}; \quad i > M: v_i = 0. \quad (10)$$

*Prova:* Notar inicialmente que qualquer política ótima deve necessariamente manter o servidor operando a 100% da sua capacidade, durante todo o horizonte de planejamento  $T$  (ou seja: até o sistema secar). Isto porque qualquer política que não utilize integralmente a capacidade não seria ótima pois poderia ser melhorada, antecipando-se o atendimento a serviços em espera através da ocupação das folgas existentes. Tem-se então que a restrição (9) precisa ser atendida na igualdade, ficando assim:

$$\sum_{i=1}^N v_i(t) = 1, \quad \forall t, 0 \leq t \leq T. \quad (11)$$

Todas as políticas que atendam a (11), tem as seguintes propriedades:

a) O mesmo horizonte de planejamento  $T$ , que pode ser obtido através do seguinte sistema de  $N + 1$  equações e  $N + 1$  incógnitas:

$$T = \frac{x_i(0) + \lambda_i T}{\mu \cdot u_i} \quad \forall i = 1..N \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^N u_i = 1 \quad (13)$$

Observe-se em (12), que o numerador de cada equação indica o total de ordens do produto  $i$  que precisam ser atendidas e o denominador indica a parcela da capacidade acumulada que será dedicada a isto. Já a equação (13) é decorrência natural de (11).

b) A mesma taxa de redução da fila total  $|x(t)|$ , que é invariante no tempo e dada por:

$$|\dot{x}| = \sum_{i=1}^N \lambda_i - \mu.$$

A equação acima pode ser obtida pela soma das equações (8), combinada com a equação (11). Ela pode também ser percebida intuitivamente como decorrência do uso integral da capacidade.

Portanto, se todas as políticas que mantêm o servidor à plena carga possuem  $T$  invariante e a mesma taxa de redução da fila total, inspecionando a função objetivo (7) vemos que a estratégia que minimiza seu valor é reduzir primeiro a fila dos produtos de maior custo. Esta é exatamente a política definida em (10).  $\square$

A política acima estabelece que a prioridade no serviço aos produtos seja do maior para o menor custo de permanência na fila. À medida que as filas dos produtos de maior prioridade secam ( $i < M$ ), elas continuam sendo atendidas na exata medida da taxa de chegada de novos serviços  $\lambda_i$ . E toda a capacidade remanescente é dedicada ao produto  $M$ , que é o de maior custo dentre aqueles cuja fila ainda não secou.

### 6.3 SOLUÇÃO APROXIMADA PARA O MODELO DISCRETO

À política ótima do modelo fluido obtida acima corresponde à disciplina de fila para o modelo discreto original que será chamada de “PMC – primeiro o maior custo”, definida como se segue:

$$\textit{Produzir o produto } i \textit{ tal que: } \max_{i: x_i > 0} (c_i) = \max_{i: x_i > 0} (I_i \cdot Q_i) \quad (14)$$

## 7 USO EXPERIMENTAL DA SOLUÇÃO PROPOSTA

### 7.1 IMPLEMENTAÇÃO

Para avaliar o método proposto, um algoritmo foi implementado usando a estrutura descrita na Seção 5.5. O algoritmo foi codificado na linguagem Pascal e compilado com o Delphi 2007. Além disso, compilou-se um segundo algoritmo idêntico e nas mesmas condições que o primeiro, alterando-se apenas a disciplina de fila que passou a ser a PAPS - primeiro a acabar o estoque, primeiro a ser servido.

O método da seção áurea foi aplicado com uma tolerância de 2 minutos para o passo de produção. A cada simulação executada pelo algoritmo (linha 9.3 na estrutura do algoritmo descrita na Seção 5.5), foram colhidas 10.000 amostras da demanda durante o tempo de reposição, para determinação dos pontos de pedido. Experimentação prévia mostrou que este tamanho de amostra é suficientemente grande para fornecer estabilidade ao algoritmo.

### 7.2 INSTÂNCIAS DE TESTE

Os dois algoritmos foram testados com 4 instâncias derivadas da proposta por BOMBERGER (1966), uma das mais utilizadas na literatura (ver Tabela 5). Elas diferem entre si apenas nos valores das demandas que multiplicam respectivamente por 1, 2, 3 e 4 a “demanda base” de BOMBERGER (1966). A jornada diária de trabalho é de 480 minutos e o nível de serviço requerido pelo mercado é de 90%. O custo de estocar é de 1 unidade monetária por peça por unidade de tempo, igual para todos os produtos.

Tabela 5: Quatro Instâncias Variando apenas a Taxa de Demanda

Produtos	Tempo de Operação (min./peça)	Tempo de <i>Setup</i> (min)	Demanda Instância 1 (peças/dia)	Demanda Instância 2 (peças/dia)	Demanda Instância 3 (peças/dia)	Demanda Instância 4 (peças/dia)
1	6,40	60	4	8	12	16
2	5,05	120	2	4	6	8
3	1,60	60	1	2	3	4
4	6,00	60	1	2	3	4
5	3,20	60	1	2	3	4
6	36,92	240	0,85	1,7	2,55	3,4
7	24,00	360	0,85	1,7	2,55	3,4
8	24,00	240	0,2	0,4	0,6	0,8
9	8,00	120	0,2	0,4	0,6	0,8
10	20,00	480	0,06	0,12	0,18	0,24

### 7.3 RESULTADOS

Na resolução foi usado um equipamento com processador Intel Core i5 de 2,53 GHz, 4 GB memória RAM e sistema operacional Windows 7. Cada uma das quatro instâncias foi resolvida 50 vezes. O algoritmo convergiu igualmente em suas duas versões: em 17, 17, 18 e 20 iterações, respectivamente para as instâncias 1, 2, 3 e 4.

As soluções obtidas estão apresentadas nas tabelas 6, 7, 8, 9 e 10. A Tabela 6 mostra medidas globais de desempenho, enquanto que as demais mostram os parâmetros dos produtos (tamanhos de lote e os pontos de pedido) obtidos para cada instância.

Tabela 6: Indicadores globais obtidos para cada instância

Inst.	Tempo Ope- rações (%)	Passo de Produção $P$ (min.)		Tempo de $Setup$ (%)		Folga (%)			Custo Total $Z$ (\$ / unid.tempo)		Tempo de Execução (sec.)	
		PMC	PAPS	PMC	PAPS	PMC	PAPS	Redu- ção (%)	PMC	PAPS	PMC	PAPS
1	22,1	501	502	25,2	25,0	52,7	52,9	-	398	404	87	71
2	44,2	502	520	49,4	41,4	6,4	14,5	56	437	487	83	66
3	66,3	690	711	31,3	29,7	2,4	4,0	40	695	792	117	145
4	88,3	1776	1838	11,2	10,7	0,5	0,9	44	2061	2422	350	345

Tabela 7: Parâmetros dos produtos obtidos para a Instancia 1

Produtos:		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Total
$s_i$	PMC	11	7	4	4	4	4	5	2	2	2	45
	PAPS	15	8	5	5	5	4	4	2	2	1	51
$Q_i$	PMC	69	75	275	73	138	7	6	11	48	1	704
	PAPS	69	76	276	74	138	7	6	11	48	1	705

Tabela 8: Parâmetros dos produtos obtidos para a Instancia 2

Produtos:		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Total
$s_i$	PMC	21	11	7	7	7	7	12	3	3	5	83
	PAPS	39	20	11	11	11	9	9	3	3	2	118
$Q_i$	PMC	69	76	276	74	138	7	6	11	48	1	707
	PAPS	72	79	288	77	144	8	7	12	50	2	738

Tabela 9: Parâmetros dos produtos obtidos para a Instancia 3

Produtos:		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Total
$s_i$	PMC	43	20	11	12	11	35	15	5	5	21	178
	PAPS	89	45	24	23	24	20	20	5	6	2	257
$Q_i$	PMC	99	113	394	105	197	12	14	19	71	10	1035
	PAPS	102	117	407	109	204	13	15	20	74	12	1071

Tabela 10: Parâmetros dos produtos obtidos para a Instancia 4

Produtos:		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Total
$s_i$	PMC	152	62	32	36	32	200	53	13	12	5	598
	PAPS	320	161	82	81	82	69	69	17	17	6	904
$Q_i$	PMC	268	328	1072	286	536	42	59	64	207	65	2926
	PAPS	278	340	1111	296	556	43	62	67	215	68	3035

#### 7.4 DISCUSSÃO

Pode-se observar na Tabela 6, que foi obtida uma folga excessiva (maior que 52%), com qualquer regra de fila, para a Instância 1, de baixa demanda. Neste caso não foi possível dedicar uma parcela maior do tempo não produtivo à execução de mais *setups* porque isto implicaria em reduzir mais o passo, que já está em seu valor mínimo. Vale notar que o menor passo possível varia de 500 a 502 minutos, que é o tempo necessário à produção de apenas 1 unidade do produto 10, mais 2 minutos devido à margem de tolerância usada pelo método da seção áurea.

Quanto à Instância 4, tem-se 88,3% da capacidade total consumida por operações produtivas (ver Tabela 6), restando apenas 11,7% para ser distribuído entre *setup* e folga. Nestas condições, as duas soluções encontradas mostram que foi necessário aumentar significativamente o passo, para um pouco mais de 1800 minutos, para preservar um mínimo de folga (menos de 1%), de modo a evitar um crescimento ainda maior nos custos totais, devido ao típico crescimento vertiginoso do tempo de permanência na fila que ocorre em sistemas quase sem folga.

Importante notar também, na Tabela 6, que a disciplina PMC requereu tempo de folga de 40% a 56% menor para todas as instâncias (exceto a Instância 1, de muito baixa demanda).

A Tabela 6 mostra ainda que a disciplina de fila PMC retornou um menor custo total em todas as instâncias. Os percentuais de redução de custo devidos aos pontos de pedido, e devidos aos tamanhos de lote, bem como o percentual total estão resumidos na Tabela 11. Observa-se nesta tabela uma expressiva redução devida aos pontos de pedido, que são diretamente impactados pela disciplina de fila, à qual se soma uma redução devida aos tamanhos de lote. (exceto para a Instância 1, quando não foi

possível um melhor ajuste no valor do passo, abaixo do valor mínimo aceitável de 502 minutos).

Tabela 11: Redução no custo de estocar obtida pela disciplina PMC para cada Instância

Instância	Redução devida aos Pontos de Pedido (%)	Redução devida aos Tamanhos de Lote (%)	Redução no Total (%)
1	12	-	2
2	30	4	10
3	31	3	13
4	34	4	15

Exceto para a Instância 1 (porque a folga é excessiva devido à impossibilidade de redução adicional nos tamanhos de lote, como explicado acima), os custos devidos aos pontos de pedido foram reduzidos em pelo menos 30% e o custo total em pelo menos 10%.

A redução no custo devido ao ponto de pedido (em torno de 30%) é particularmente expressiva porque serem obtidas simultaneamente à redução no percentual de folga (em torno de 50%). A sobreposição destas duas reduções indica significativa vantagem da disciplina de fila PMC sobre a PAPS.

Os desvios padrões obtidos para os indicadores globais (passo, custo total, percentual do tempo dedicado a *setups* e folga) ficaram sempre abaixo de 1%. Os desvios padrões obtidos para os tamanhos de lotes ficaram quase sempre abaixo de 1,5%, e para os pontos de pedido um pouco maiores (quase sempre abaixo de 7%), provavelmente por ser variável inteira.

Experimentação adicional mostrou que bastariam de 10 a 20 execuções para a obtenção de desvios padrões com as mesmas ordens de grandeza. Esta é uma indicação de que as 10.000 amostras recolhidas para a determinação do ponto de pedido (linha 9.3 da estrutura do algoritmo descrita na Seção 5.5) são de fato suficientes para a estabilidade do algoritmo.

O tempo de execução foi sempre inferior a 6 minutos, conforme pode ser visto na Tabela 6. Eles aumentam de instância para instância porque a demanda é crescente, alongando o tempo de conclusão da rotina de simulação.

## 7.5 SIMULAÇÃO DE USO

Em seguida, procurou-se verificar o atendimento ao nível de serviço requerido (90%). Para isso, o “uso real” de cada solução obtida para cada instância foi simulado 50 vezes, e em cada simulação foram recolhidas 20.000 amostras da demanda durante o tempo de reposição de cada produto. Os valores obtidos estão na Tabela 12.

Tabela 12: Nível de serviço obtido em 50 execuções para cada instancia

Instâncias	Prod.:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	PMC	90,4	94,8	92,1	91,3	92,0	92,7	95,7	95,1	95,2	98,9
	PAPS	95,9	93,4	92,7	92,7	92,6	92,1	91,3	92,8	92,5	91,1
2	PMC	90,4	91,6	94,9	93,1	94,8	90,5	92,5	95,2	95,3	93,2
	PAPS	97,2	96,1	93,2	94,2	93,3	95,7	94,9	88,6	87,0	92,4
3	PMC	90,2	90,5	91,4	90,9	90,8	90,5	91,1	95,0	95,3	91,5
	PAPS	93,2	92,8	89,9	91,8	91,0	92,3	91,6	87,6	86,0	82,0
4	PMC	90,2	90,4	91,9	90,0	90,9	91,8	90,1	92,0	91,1	92,8
	PAPS	92,0	91,8	91,4	91,7	91,6	91,7	91,5	90,0	89,7	86,4

Examinando a Tabela 12, observa-se que o método PMC respeita produto a produto o nível de serviço requerido, não se distanciando muito dele. Já o método PAPS produz níveis de serviço menos homogêneos devido a distintas variâncias para a demanda durante o tempo de reposição (quanto menor a taxa de demanda maior a variância porque o processo de chegada de clientes é mais rarefeito). Com esta disciplina de fila, para que todos os produtos atendam ao nível de serviço mínimo requerido, seria necessário elevar o ponto de pedido de todos os produtos, o que não foi feito para não distorcer a comparação dos métodos pela média.

## 8 AVALIAÇÃO DOS CUSTOS DAS REGRAS DE CONTROLE

Conforme explicado no Capítulo 4, o presente trabalho assumiu *a priori* o uso do passo fixo de produção e do ponto de pedido como regras de controle, por integrarem o sistema puxado de reposição da abordagem *lean manufacturing*.

Neste capítulo pretende-se avaliar o impacto do uso destas regras de controle sobre o custo da solução em diferentes instâncias, já que a aceitação *a priori* de regras de controle tende a afastar a solução adotada da solução ótima. Para isso, foram implementados quatro métodos de solução para o SELSP de interesse, de modo a se obter:

- A solução ótima, quando não se assume *a priori* nenhuma regra de controle.
- A solução ótima assumindo-se *a priori* o uso de um passo fixo de produção porém sem a adoção de pontos de pedido (será chamada de OtimoPF);
- Duas soluções usando passo fixo de produção e ponto de pedido, ambas adaptadas a partir do método proposto nos Capítulos 5 e 6 desta tese, e diferenciadas quanto à duração das paradas de máquinas, a saber:
  - Parada de máquina com duração idêntica ou múltipla do passo fixo (será chamada de PMC ou “PMC com parada fixa”);
  - Parada de máquina com duração flexível (será chamada de PMCFlex).

Deseja-se fazer as seguintes avaliações com estas soluções:

- Estimar o sobrecusto devido ao uso do passo fixo através da comparação entre o custo mínimo fornecido pela solução ótima com o custo fornecido pela “solução ótima com passo fixo”.
- Estimar o sobrecusto devido ao uso do ponto de pedido através da comparação entre o custo fornecido pela “solução ótima com passo fixo” com o custo fornecido pelo método proposto nos Capítulos 5 e 6, que usa passo fixo e ponto de pedido.
- Estimar o sobrecusto devido a parada de máquina com duração múltipla do passo fixo através da comparação entre os custos fornecidos pelas duas soluções usando passo fixo de produção e ponto de pedido.

Os quatro métodos foram usados para resolver um total de 54 instâncias, com elas variando entre si quanto aos seguintes atributos:

- Tempo de *setup*;
- Nível de demanda;
- Mix de demanda;
- Tempo de operação.

Para simplificar e viabilizar computacionalmente os métodos Ótimo e OtimoPF, foi necessário alterar algumas das premissas originalmente assumidas e relacionadas na Seção 5.1. As alterações e novas restrições são:

- O nível de serviço foi substituído por um custo de falta, diretamente proporcional à quantidade e tempo de atraso e incorporado à função objetivo.
- Lotes e saldos em estoques passaram a ser variáveis inteiras, restritas a valores relativamente reduzidos.
- As instâncias se limitam a dois produtos.
- O uso de passo fixo e ponto de pedido deixaram de ser impositivos, naturalmente.

Aspectos de implementação dos quatro métodos estão descritos nas Seções 8.1, 8.2 e 8.3. A Seção 8.4 apresenta as instâncias de teste através dos valores de seus atributos. Fechando o capítulo, a Seção 8.5 apresenta e discute os resultados obtidos.

## 8.1 SOLUÇÃO ÓTIMA

Para construção de uma solução ótima, o SELSP de interesse foi modelado como um problema de decisão semimarkoviano com as seguintes características:

- O espaço de estados é o conjunto de todas as possíveis combinações de níveis de estoque dos produtos, combinado ainda com os possíveis *setups* correntes do servidor.
- O estoque negativo foi truncado a partir de valores suficientemente baixos para que seja improvável a sua ocorrência. Com isso, o espaço de estados se tornou enumerável e finito, facilitando a solução numérica do modelo.
- O espaço de ações é o conjunto composto pelas seguintes possíveis decisões: produzir qualquer um dos produtos ou manter o servidor ocioso.

- O critério para escolha da melhor decisão é o menor custo médio no longo prazo.
- O momento de tomada de decisão é ao fim de produção de cada peça, ou após a ocorrência de cada demanda caso a máquina esteja parada, tratando-se de uma sequência discreta e infinita de decisões ao longo do tempo.
- Os tempos de *setup* e de operação são valores determinísticos predefinidos.

Um processo estocástico com estas características pode ser resolvido através de algoritmo de iteração de valor da programação dinâmica (PUTERMAN, 2009). Porém, por se tratar de problema semimarkoviano cujo critério de decisão é o custo médio de longo prazo, são necessárias duas variações em relação à versão mais tradicional do algoritmo, que estão explicadas nas seções abaixo.

Convém destacar que o método ótimo desenvolvido se diferencia do método de QIU e LOULOU (1995), único método ótimo encontrado na literatura sobre SELSP, nos seguintes pontos:

- É semimarkoviano porque os tempos de *setup* e de operação são determinísticos.
- O critério de otimalidade é o menor custo médio no longo prazo.
- Não é necessário utilizar taxa de juros para descontar valores no tempo.

### **8.1.1 Algoritmo de iteração de valor relativo**

Devido ao critério ser o de custo médio de longo prazo, sem utilização de taxa de desconto de valores no tempo, optou-se por usar o algoritmo de iteração de valor relativo (PUTERMAN, 2009).

Neste algoritmo, a cada iteração abate-se o valor de um estado qualquer, previamente escolhido, do valor de todos os estados. O objetivo é evitar instabilidade numérica durante a execução, devido ao crescimento permanente do valor dos estados.

### **8.1.2 Custo paramétrico**

Devido ao critério ser o de custo médio combinado com o processo semimarkoviano composto por intervalos entre tomadas de decisão de duração diferentes, foi implementada uma rotina complementar para cálculo paramétrico do

custo médio (CAO *et al.*, 2002; TAO *et al.*, 2007; LEIZAROWITZ e SHWARTZ, 2008).

Estas duas características combinadas trazem a seguinte dificuldade: como obter o custo de um estágio se o custo do estado do sistema durante este estágio é conhecido, mas a duração do estágio é variada (em função de qual produto está sendo fabricado e de que poderá ocorrer *setup* prévio ou não)?

Para resolver este ponto, o algoritmo de iteração de valor relativo precisa ser executado várias vezes, iterativamente, recebendo como parâmetro de cada iteração um “custo médio candidato”. Este “custo médio candidato” é usado no algoritmo de iteração de valor relativo para ponderar igualmente todos os estágios processados durante a sua execução. Com isso, o custo médio resultante do algoritmo passa a ser o desvio do “custo médio candidato” em relação ao verdadeiro custo médio que se deseja encontrar. Incorpora-se então uma fração deste desvio ao “custo médio candidato” de uma próxima execução do algoritmo de iteração de valor relativo, iterando-se até que o desvio seja suficientemente próximo de zero.

## 8.2 SOLUÇÃO ÓTIMA COM PASSO FIXO

A estrutura principal do algoritmo iterativo, baseado na razão áurea e apresentado no Quadro 1 da Seção 5.5, foi usada para o desenvolvimento da solução ótima com passo fixo.

A diferença em relação ao método proposto no Capítulo 5 está no procedimento “iteração” (Quadro 2 da Seção 5.5), que é chamado pelo procedimento principal após a atribuição de valor tentativo ao passo. Aqui esta rotina foi substituída por algoritmo de iteração de valor relativo, parecido com o que foi descrito na seção anterior, porém com as seguintes diferenças:

- O espaço de estados é apenas o conjunto de todas as possíveis combinações de níveis de estoque dos produtos, não envolvendo os possíveis *setups* correntes do servidor (já que o passo fixo incorpora incondicionalmente o tempo *setup*).
- O momento de tomada de decisão é a cada início de passo  $P$ , tratando-se de uma sequência discreta e infinita de decisões ao longo do tempo.

Vale notar que, como o passo  $P$  é fixo e determinístico o processo continua sendo semimarkoviano, mas agora todos os estágios tem a mesma duração (o valor do passo). Por isso não há necessidade de se calcular parametricamente o custo médio.

### 8.3 SOLUÇÕES COM PASSO FIXO E PONTO DE PEDIDO

O método PMC proposto nos Capítulos 5 e 6 foi adaptado às novas premissas. Além disso, foram configuradas as duas versões: uma com paradas de máquina de duração múltipla do passo  $P$  (ou poderia dizer: parada de duração fixa) e outra com paradas flexíveis (ou seja: até que o estoque de algum produto alcance o ponto de pedido).

Convém observar que, após a conclusão do algoritmo para estas duas soluções, foi simulado o uso do método obtido, para se apurar o “real” custo médio da solução.

### 8.4 INSTÂNCIAS DE TESTE

Os quatro métodos foram usados para resolver 54 instâncias obtidas através da combinação exaustiva dos seguintes valores para cada atributo das instâncias:

a) Tempo de *setup*:

- Rápido: 1 minuto;
- Médio: 4 minutos;
- Lento: 16 minutos.

b) Nível de demanda:

- Baixo: tempo de operações ocupando 35% da capacidade (8,4 peças / dia quando as demandas dos produtos são iguais);
- Intermediário: tempo de operações ocupando 50% da capacidade (12 peças / dia quando as demandas dos produtos são iguais);
- Alto: tempo de operações ocupando 65% da capacidade (15,6 peças / dia quando as demandas dos produtos são iguais).

c) Mix de demanda:

- Iguais (BB): a demanda total é dividida por igual entre os dois produtos;
- Alta variação (AC): o produto 1 recebe 90% da demanda total, enquanto o produto 2 recebe 10%.

d) Tempo de operação:

- Iguais: ambos os produtos consomem 10 minutos para serem produzidos;
- Decrescente: o produto 1 consome 15 minutos para ser produzido, enquanto o produto 2 consome 5 minutos;
- Crescente: o produto 1 consome 5 minutos para ser produzido, enquanto o produto 2 consome 15 minutos.

Os custos de estocar e de falta foram mantidos fixos, respectivamente de \$1 e \$500 por unidade de tempo.

Para análise dos resultados, será usado o atributo “mix de produtos”, que é o resultado da combinação dos atributos “mix de demanda” com “tempo de operação”. Com isso, o atributo “mix de produtos” assume os valores detalhados na Tabela 13 abaixo. Esta tabela mostra também a distribuição por produto do tempo total do servidor empregado em operações e a proporcionalidade entre os tamanhos de lote.

Tabela 13: Características dos mixes de produtos usados nas instâncias de teste

Mix de demanda	Tempo de operação	Distribuição do tempo total de operação (%)		Proporcionalidade entre os tamanhos de lote	
		Produto 1	Produto 2	Produto 1	Produto 2
BB	Iguais	50	50	1	1
AC	Crescente	75	25	3	1
BB	Decrescente	75	25	1	3
BB	Crescente	25	75	3	1
AC	Iguais	90	10	1	1
AC	Decrescente	96,4	3,6	1	3

Importante notar que as linhas da Tabela 13 foram ordenadas da distribuição do tempo de operações mais igualitária (mix “BB Iguais”) para a menos igualitária (mix “AC Decrescente”). O motivo deste ordenamento é ele facilita a análise dos resultados (assunto da próxima seção).

As instâncias detalhadas através de todos os seus atributos estão relacionadas no Anexo 1.

## 8.5 RESULTADOS

Esta seção está dividida em quatro subseções: a primeira apresenta e discute os custos médios de longo prazo, a segunda o custo adicional relativo ao uso do passo fixo, a terceira o custo adicional relativo ao ponto de pedido e a última o custo adicional devido a paradas durante o passo fixo integral.

Em cada uma das subseções o comportamento dos custos é analisado segundo cada um dos atributos das instâncias.

Os resultados detalhados da execução de cada um dos 4 métodos de solução com cada uma das 54 instâncias estão nos Anexos 2, 3, 4 e 5.

### 8.5.1 Custo médio ótimo

Os custos ótimos (ou mínimos) apresentados nesta seção foram obtidos através do algoritmo ótimo descrito na seção 8.1.

As principais conclusões quanto ao seu comportamento são:

- Cresce conforme cresce o *setup*.
- Cresce conforme cresce o nível da demanda.
- É menor com mixes mais desiguais.

Os valores para cada uma das 54 instâncias estão no Anexo 2. Uma análise detalhada é apresentada a seguir.

#### 8.5.1.1 Variação em função do *setup*

A Figura 11 abaixo mostra o custo médio ótimo em função do *setup* para várias instâncias. É possível observar que o custo médio ótimo cresce à medida que cresce o *setup*, para todas as instâncias testadas.

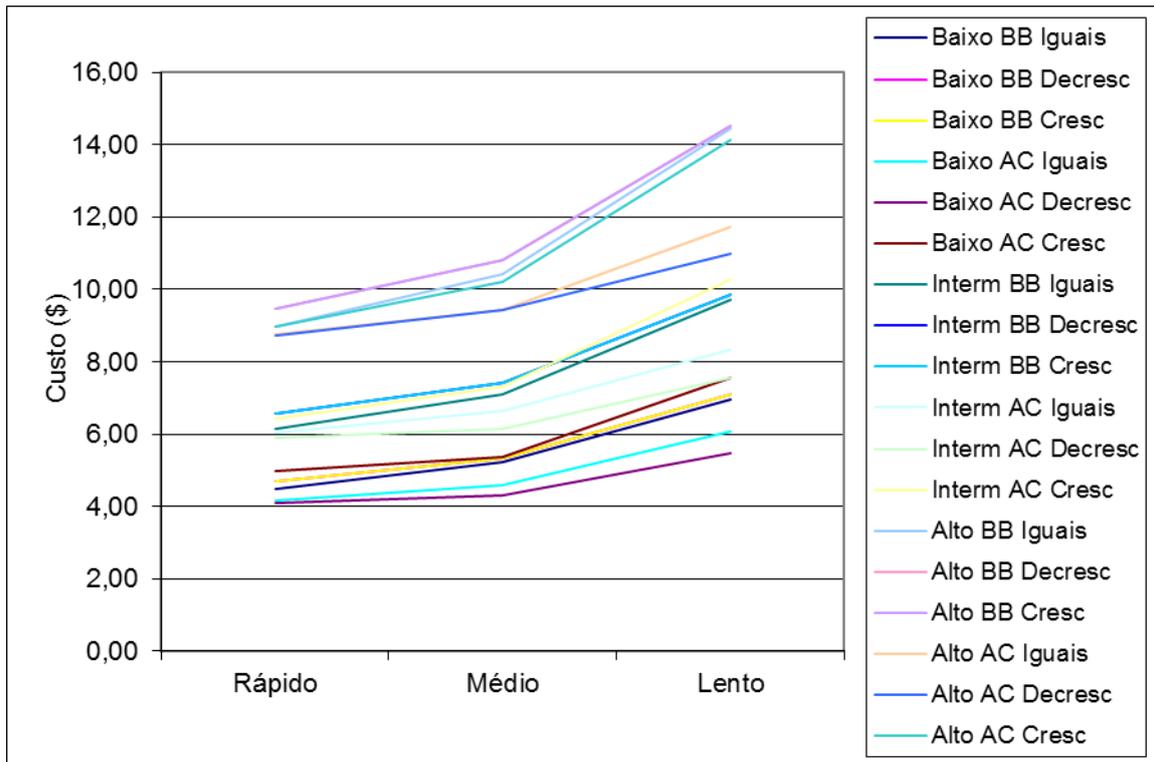


Figura 11: Custo médio ótimo em função do *setup* para várias instâncias

As Figuras 12, 13 e 14 também mostram o custo médio ótimo em função do *setup* só que agregando as instâncias. Enquanto a Figura 12 mostra os valores médios com todas as instâncias agregadas, na Figura 13 os valores estão agregados por nível de demanda e na Figura 14 estão agregados por mix de produtos.

Em todas estas figuras é nítido o crescimento do custo conforme cresce o *setup*.

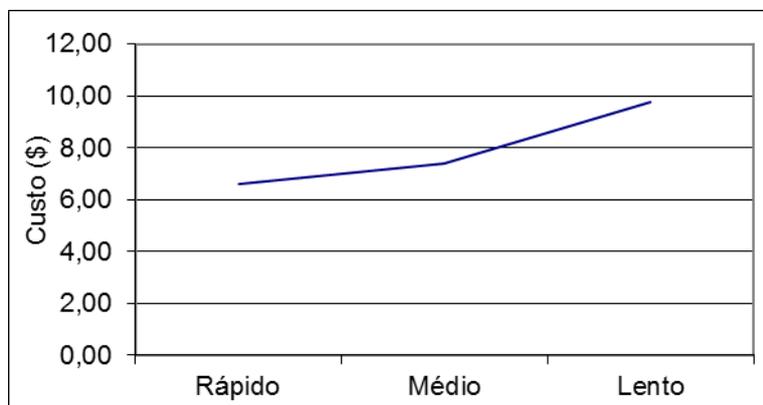


Figura 12: Custo médio ótimo em função do *setup*: Média de todas as instâncias

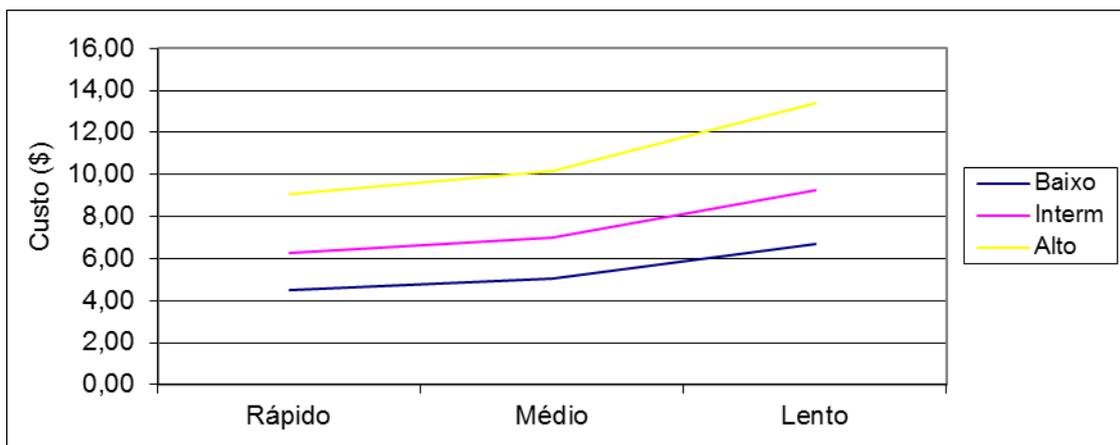


Figura 13: Custo médio ótimo em função do *setup*: Média por nível de demanda

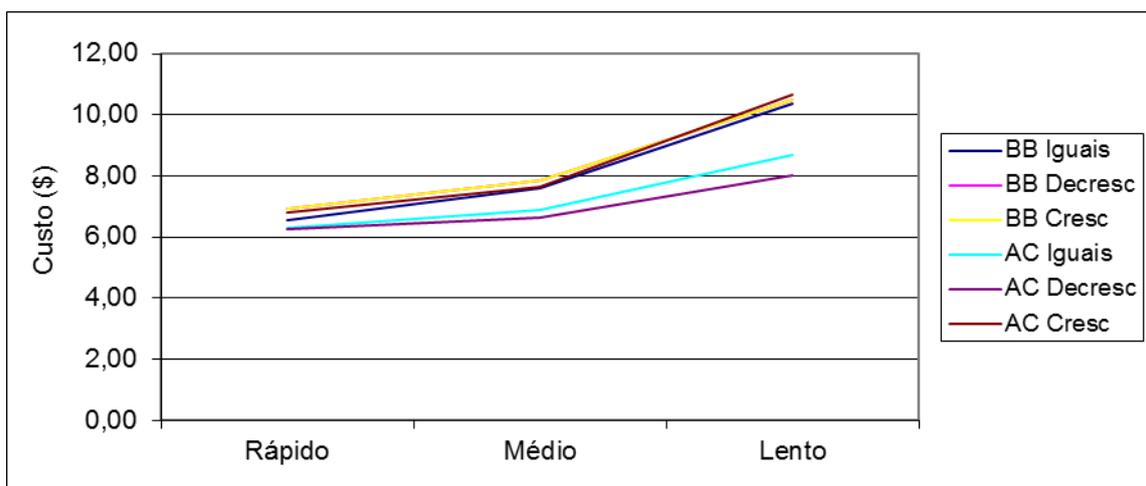


Figura 14: Custo médio ótimo em função do *setup*: Média por mix de produtos

#### 8.5.1.2 Variação em função do nível da demanda

A Figura 15 abaixo mostra o custo médio ótimo em função do nível da demanda para várias instâncias. Assim como acontece com o *setup*, o custo médio ótimo cresce à medida que cresce o nível da demanda, para todas as instâncias testadas.

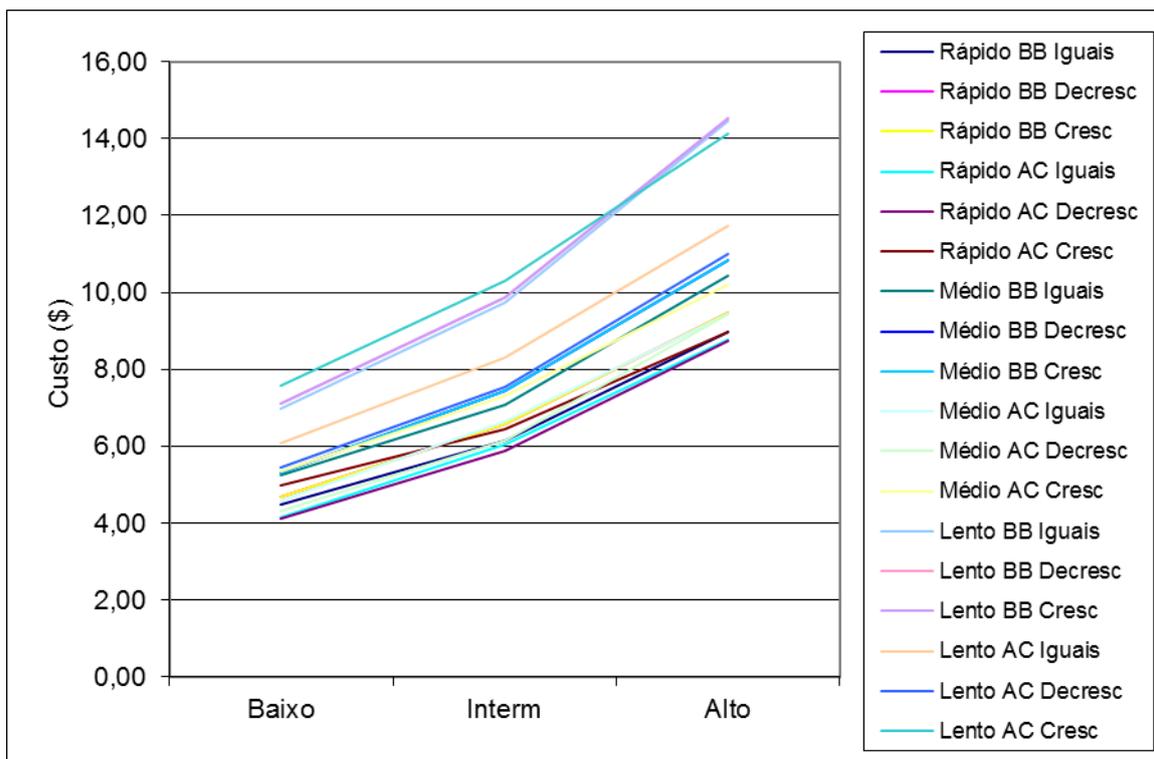


Figura 15: Custo médio ótimo em função do nível da demanda para várias instâncias

As Figuras 16, 17 e 18 também mostram o custo médio ótimo em função do nível da demanda só que agregando as instâncias. Enquanto a Figura 16 mostra os valores médios com todas as instâncias agregadas, na Figura 17 os valores estão agregados por *setup* e na Figura 18 estão agregados por mix de produtos.

Em todas estas figuras é nítido o crescimento do custo conforme cresce o nível da demanda.

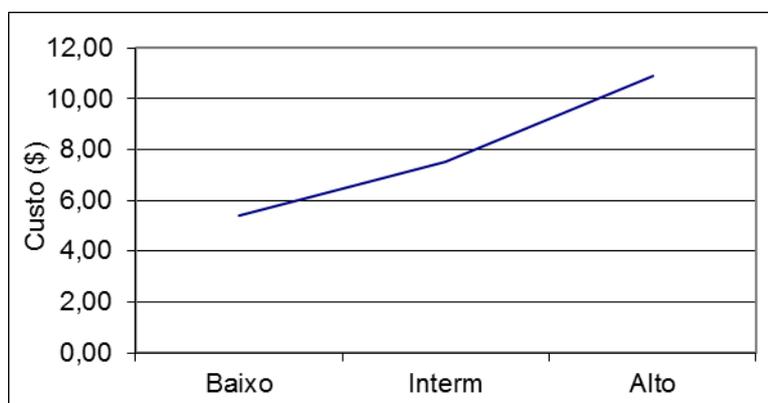


Figura 16: Custo médio ótimo em função do nível da demanda: Média de todas as instâncias

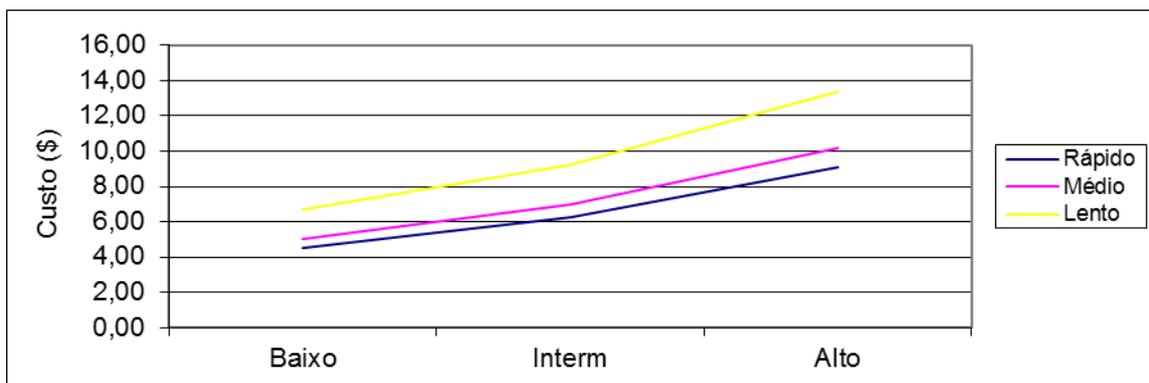


Figura 17: Custo médio ótimo em função do nível da demanda: Média por *setup*

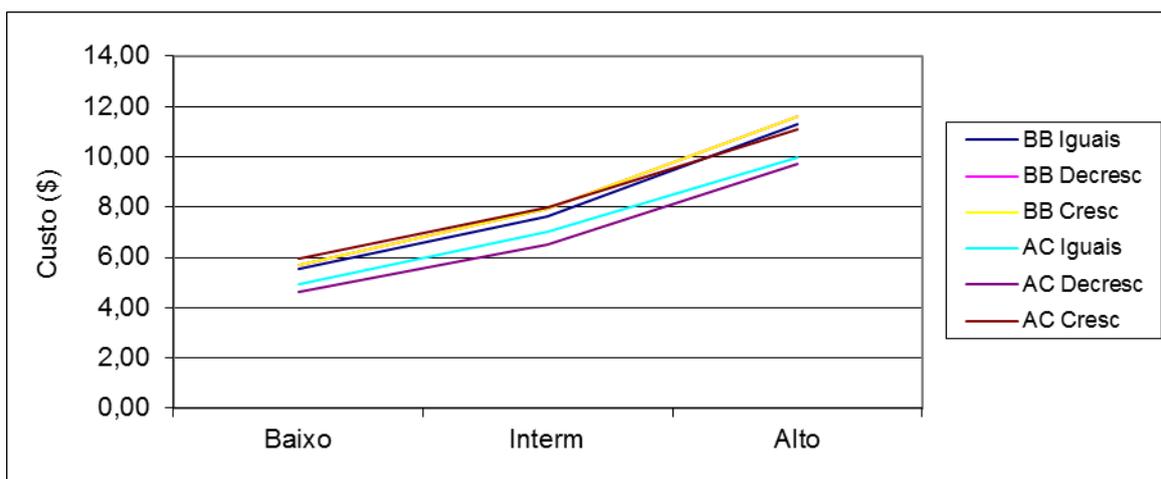


Figura 18: Custo médio ótimo em função do nível da demanda: Média por mix de produtos

### 8.5.1.3 Variação em função do mix de produtos

A Figura 19 abaixo mostra o custo médio ótimo em função do mix de produtos para várias instâncias. A Figura 20 mostra os valores médios com todas as instâncias agregadas. Pode-se notar que as duas instâncias com mix mais desigual são as que tem o menor custo: AC Decrescente, seguida por AC Iguais. O custo das demais não apresenta grandes variações.

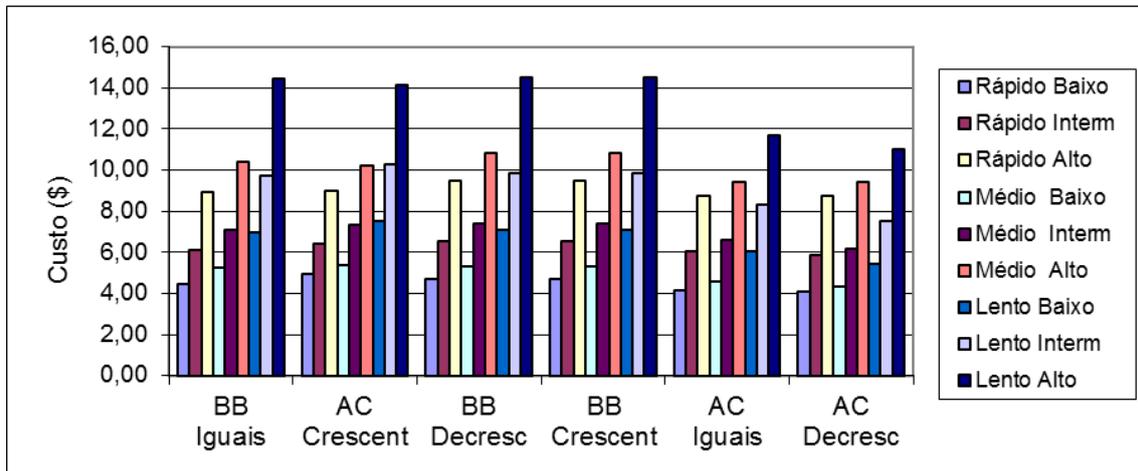


Figura 19: Custo médio ótimo em função do mix de produtos para várias instâncias

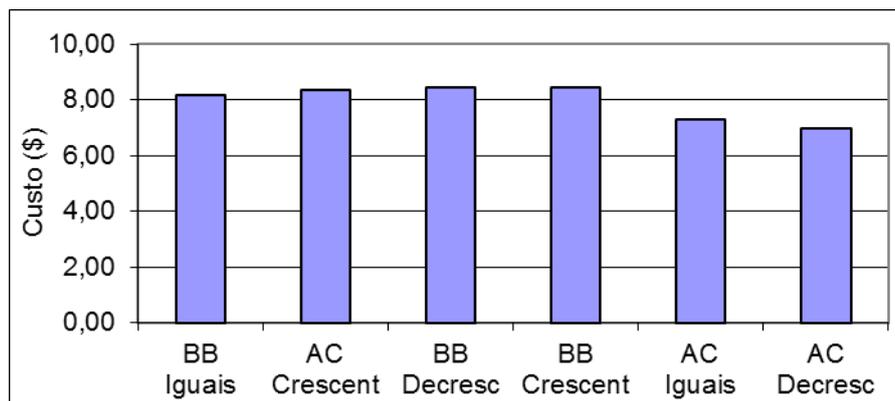


Figura 20: Custo médio ótimo em função mix de produtos: Média de todas as instâncias

As Figuras 21 e 22 mostram o custo médio ótimo em função do mix de produtos, a primeira agregando por *setup* e a segunda agregando por nível de demanda. Pode-se observar que o mix AC Decrescente se mantém com menor custo, seguido por AC Iguais, para todos os valores de *setup* e para todos os níveis de demanda.

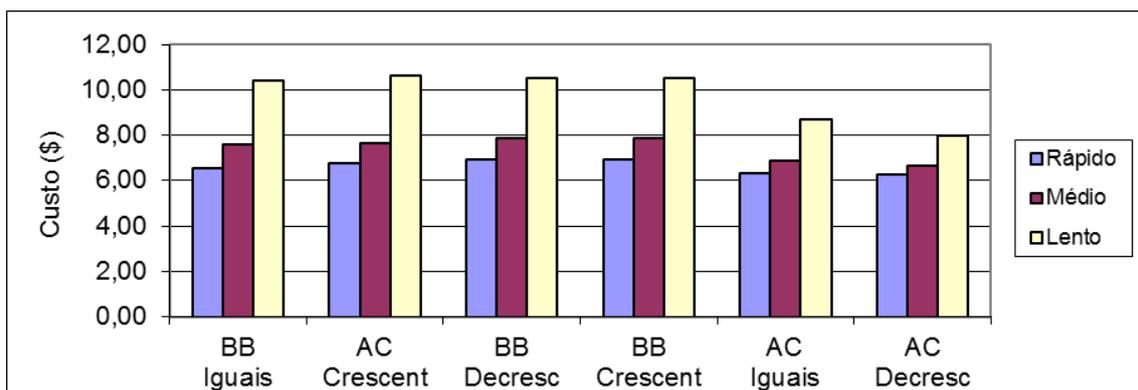


Figura 21: Custo médio ótimo em função do mix de produtos: Média por *setup*

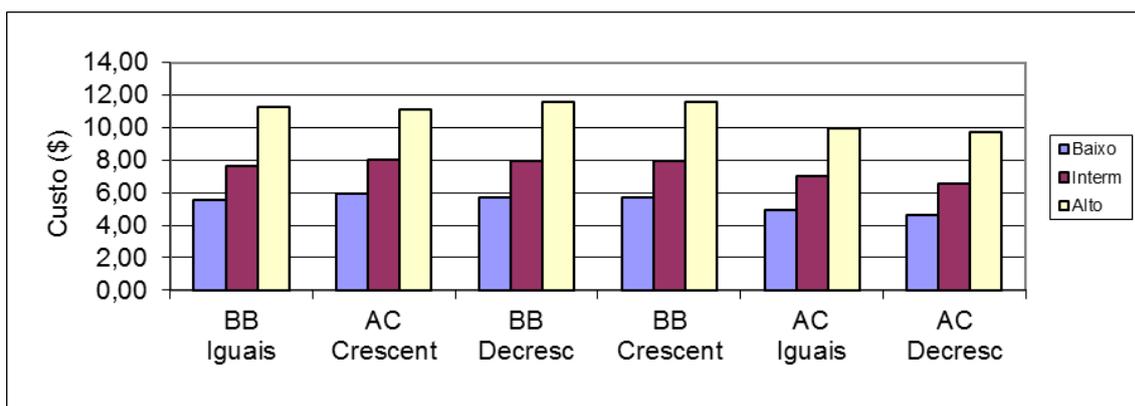


Figura 22: Custo médio ótimo em função do mix de produtos: Média por nível de demanda

### 8.5.2 Sobrecusto devido ao passo fixo

Os “sobrecustos” analisados nesta seção foram calculados como sendo o percentual de aumento do custo fornecido pela “solução ótima com passo fixo” sobre o custo mínimo fornecido pela solução ótima.

As principais conclusões quanto ao sobrecusto devido ao passo fixo são:

- Cresce conforme cresce o *setup*.
  - Este crescimento é mais forte conforme aumenta o nível da demanda.
  - Este crescimento é mais forte com mixes mais desiguais.
- Em geral, não cresce conforme cresce o nível da demanda.
  - Uma exceção constatada: *setup* “lento” com o mix mais desigual.
- Cresce com mixes mais desiguais.

O sobrecusto médio para todas as instâncias foi de 42%. Os valores para cada uma das 54 instâncias estão no Anexo 3. Uma análise detalhada é apresentada a seguir.

#### 8.5.2.1 Variação em função do *setup*

A Figura 23 abaixo mostra o sobrecusto devido ao passo fixo em função do *setup* para várias instâncias.

Em 12 das 16 instâncias o sobrecusto cresceu continuamente, a cada aumento de *setup*. Nas outras 4 instâncias o sobrecusto aumentou quando o *setup* passou de

médio para lento mas se manteve ou foi reduzido quando o *setup* passou de rápido para médio. Estas quatro instâncias são: “Baixo / BB / Iguais”, “Baixo / BB / Decrescente”, “Baixo / BB / Crescente” e “Intermediário / AC / Crescente”.

Importante observar que nas quatro vezes em que aumentando o *setup* (de rápido para médio) o sobrecusto não aumentou, os lotes já são os menores possíveis para ambos os *setups*, conforme pode ser visto no Anexo 3. Esta é uma indicação de que se trata de situação extrema, e que se fosse possível praticar lotes ainda menores o comportamento do sobrecusto seria similar ao que ocorreu em todas as outras instâncias e incrementos de *setup*.

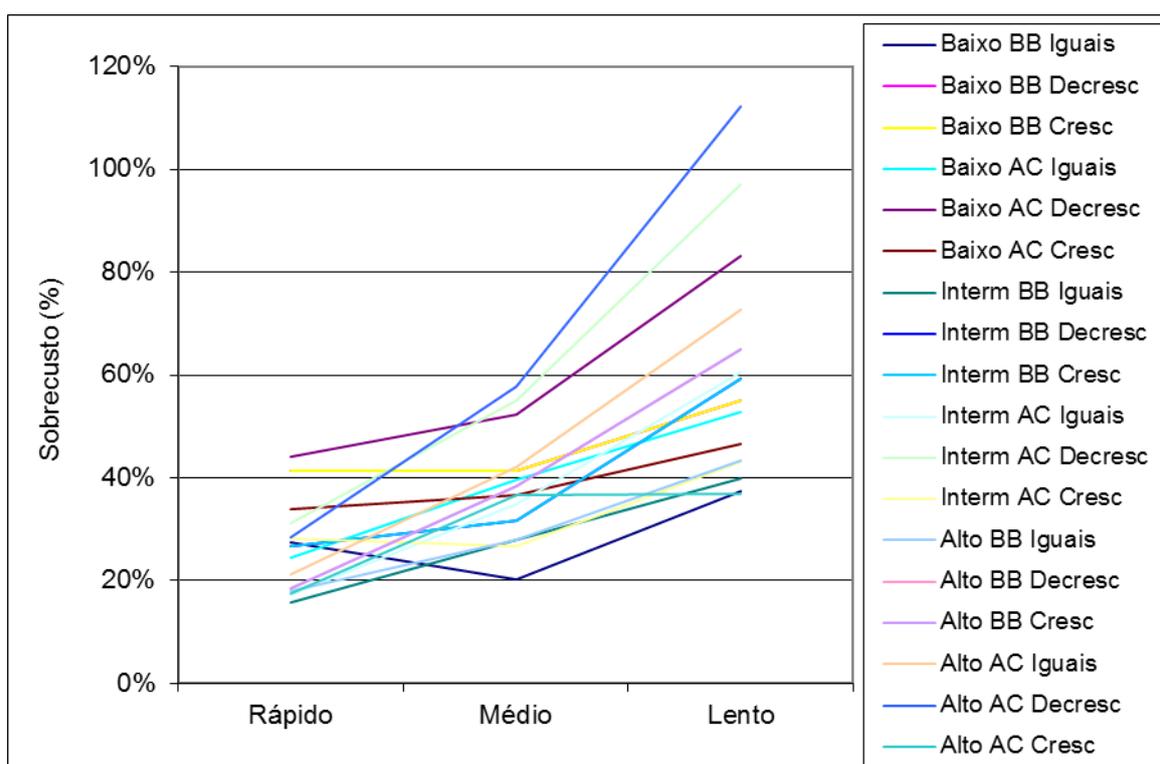


Figura 23: Sobrecusto devido ao passo fixo em função do *setup* para várias instâncias

As Figuras 24, 25 e 26 também mostram o sobrecusto devido ao passo fixo em função do *setup* só que agregando as instâncias. Enquanto a Figura 24 mostra os valores médios com todas as instâncias agregadas, na Figura 25 os valores estão agregados por nível de demanda e na Figura 26 estão agregados por mix de produtos. Todos estes gráficos mostram crescimento sistemático no sobrecusto conforme cresce o *setup*.

A Figura 25 mostra ainda que o sobrecusto cresce mais intensamente conforme aumenta o nível de demanda. Já a Figura 26 mostra que o sobrecusto cresce mais intensamente com os mixes mais desiguais (AC Decrescente e AC Iguais).

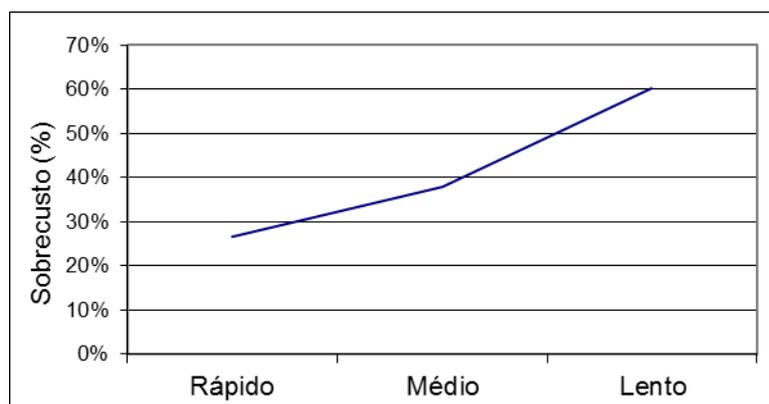


Figura 24: Sobrecusto devido ao passo fixo em função do *setup*: Média de todas as instâncias

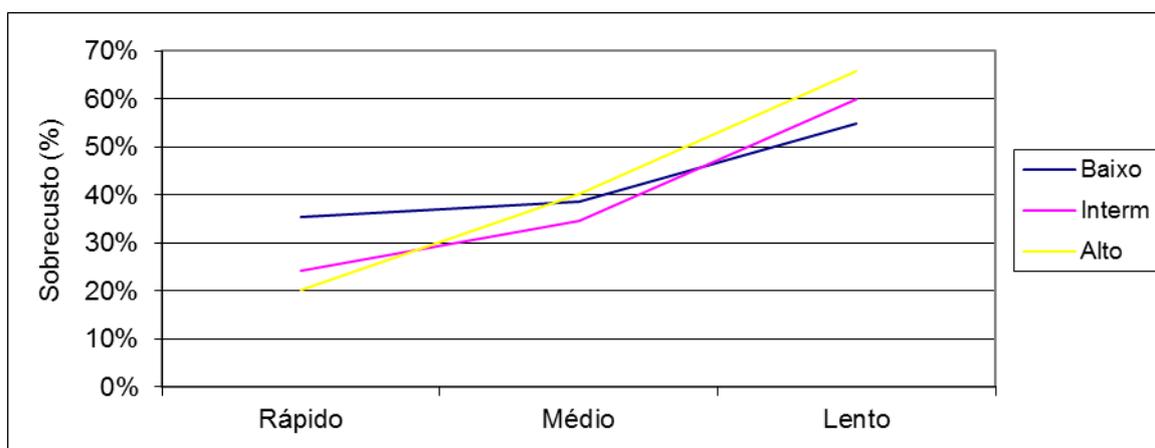


Figura 25: Sobrecusto devido ao passo fixo em função do *setup*: Média por nível de demanda

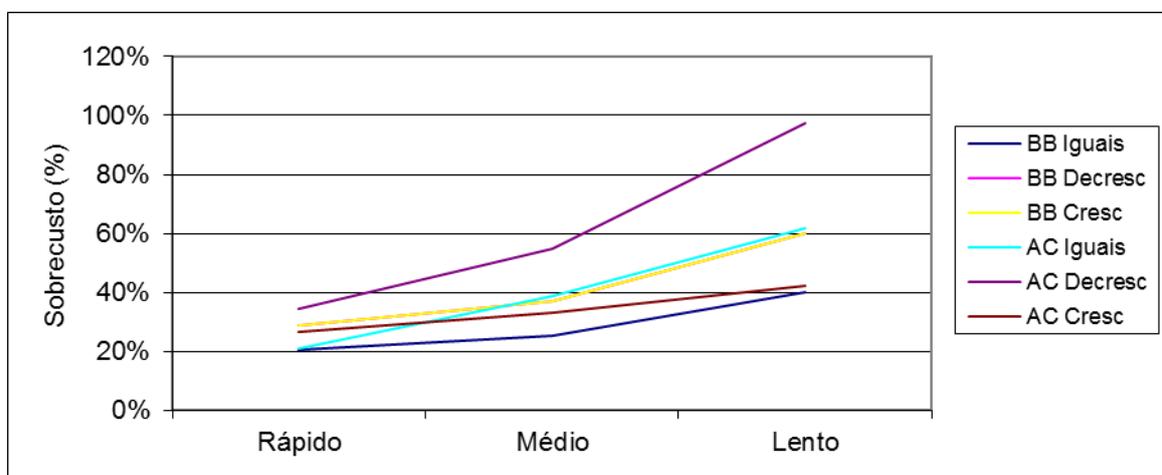


Figura 26: Sobrecusto devido ao passo fixo em função do *setup*: Média por mix de produtos

### 8.5.2.2 Variação em função do nível da demanda

A Figura 27 abaixo mostra o sobrecusto devido ao passo fixo em função do nível da demanda para várias instâncias. A Figura 28 mostra os valores médios com todas as instâncias agregadas.

Analisando os dados agregados (Figura 28), vemos que o sobrecusto não cresce significativamente em função do nível da demanda. Porém, desagregando os dados (Figura 27) observa-se uma exceção: a combinação de setup lento com o mix AC Decrescente (que é o mais desigual).

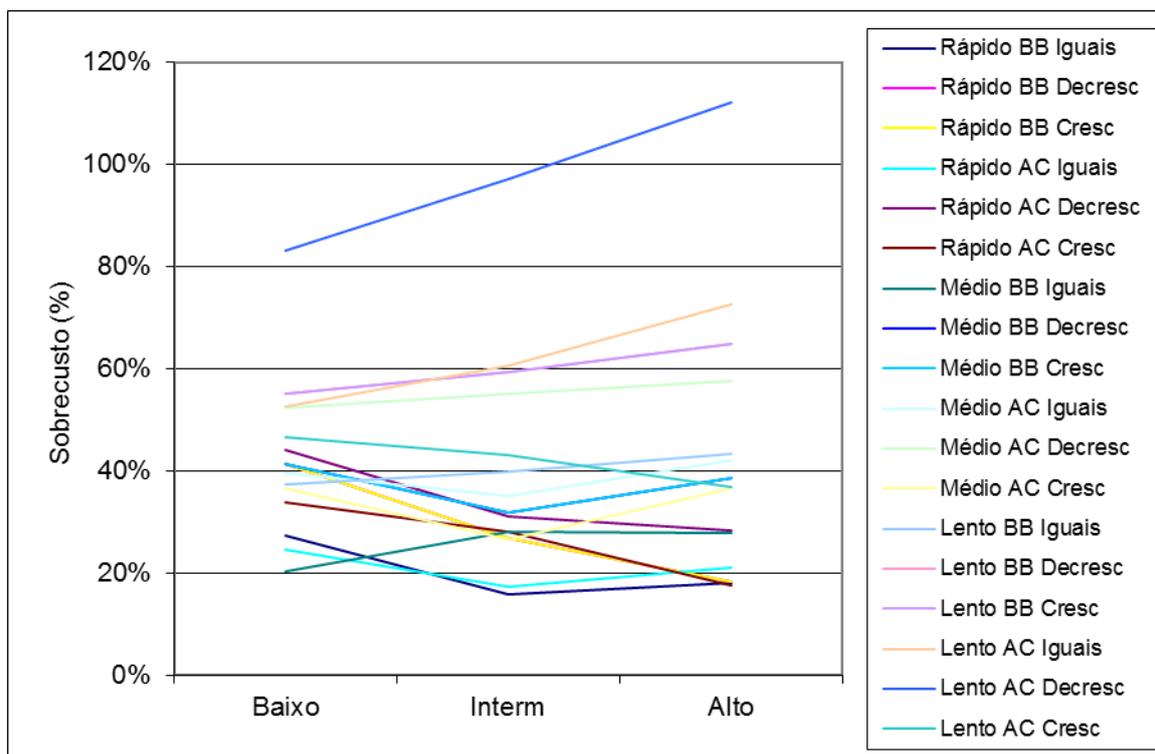


Figura 27: Sobrecusto devido ao passo fixo em função do nível da demanda para várias instâncias

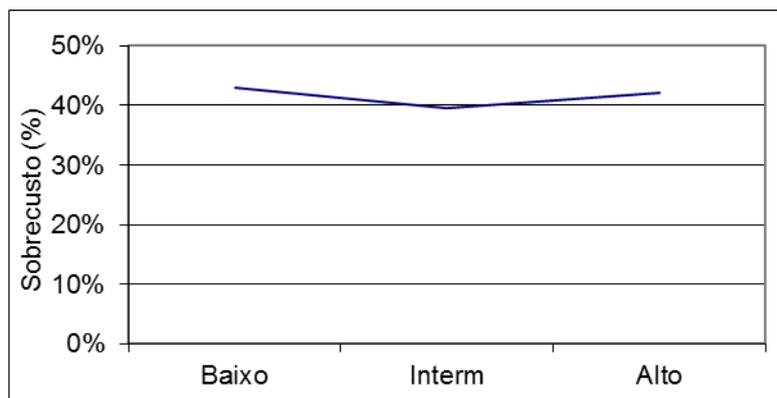


Figura 28: Sobrecusto devido ao passo fixo em função do nível da demanda: Média de todas as instâncias

A Figura 29 mostra o sobrecusto devido ao passo fixo em função do nível da demanda agregado por *setup*. Há um comportamento variado: quando o *setup* é rápido o sobrecusto é decrescente; quando o *setup* é lento o sobrecusto é crescente; quando o *setup* é médio o sobrecusto não apresenta comportamento uniforme.

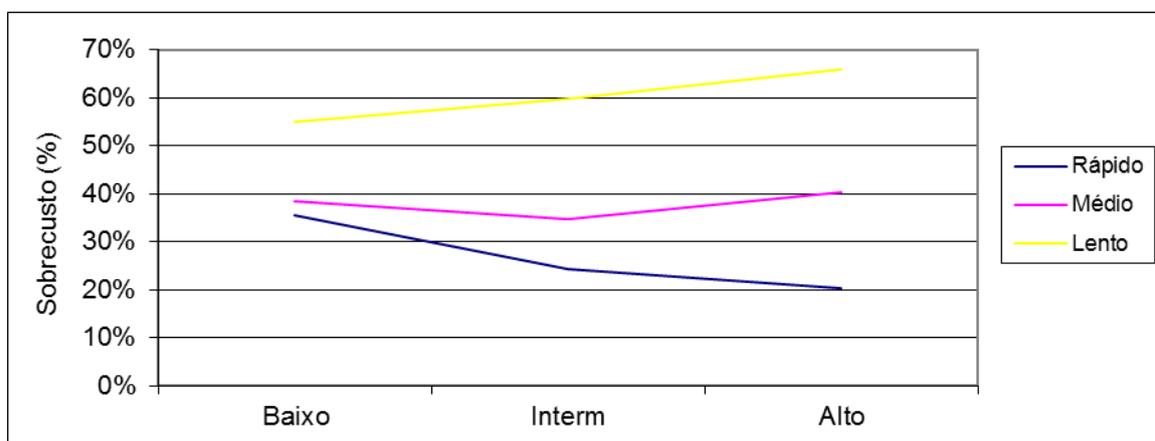


Figura 29: Sobrecusto devido ao passo fixo em função do nível da demanda: Média por *setup*

A Figura 30 mostra o sobrecusto devido ao passo fixo em função do nível da demanda agregado por mix de produtos. Há um comportamento variado: para os mixes “BB / Decrescente”, “BB / Crescente” e “AC / Crescente” o sobrecusto é maior quando a demanda é mais baixa; para os mixes “AC / Iguais” e “AC / Decrescente” o sobrecusto é maior quando a demanda é mais alta; para o mix “BB / Iguais” o sobrecusto é estável.

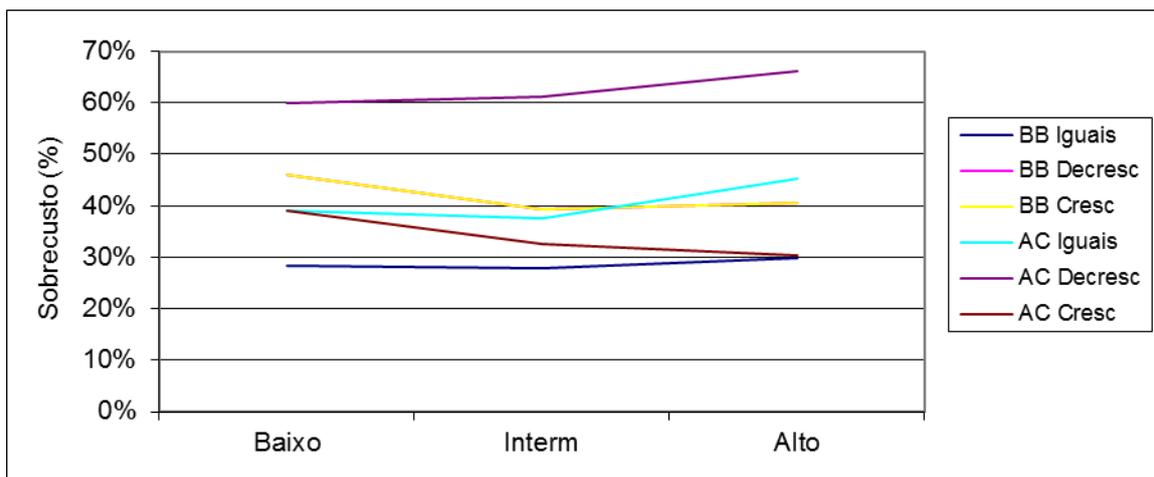


Figura 30: Sobrecusto devido ao passo fixo em função do nível da demanda: Média por mix de produtos

### 8.5.2.3 Variação em função do mix de produtos

A Figura 31 abaixo mostra o sobrecusto devido ao passo fixo em função do mix de produtos para várias instâncias. A Figura 32 mostra os valores médios com todas as instâncias agregadas. Os gráficos revelam que o mix com menor sobrecusto é o “BB Iguais”, seguido pelo “AC Crescente”, e que o mix com maior sobrecusto é o “AC Decrescente”.

Vale notar que os mixes com menor e maior sobrecusto são aqueles que apresentam distribuição, respectivamente, mais e menos igualitária do tempo do servidor empregado em operações (discriminado na Tabela 13).

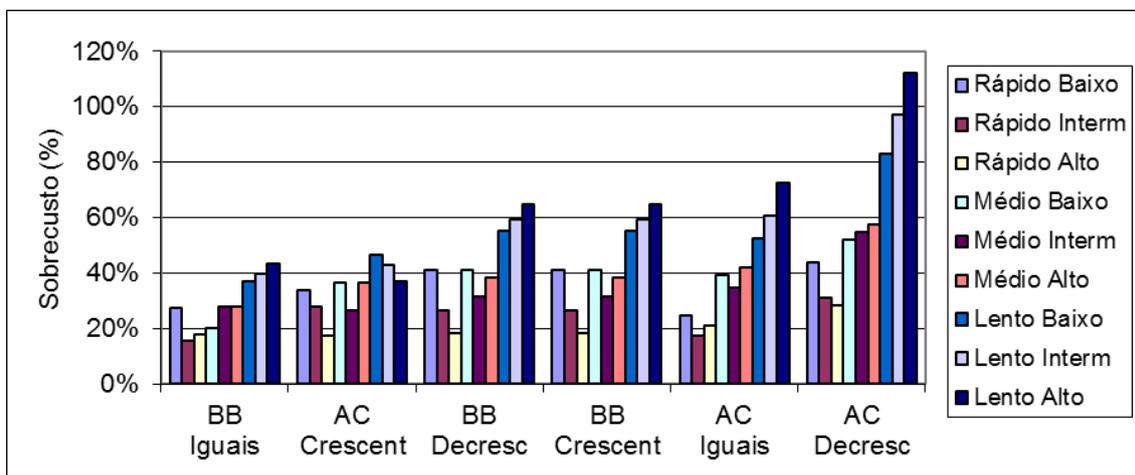


Figura 31: Sobrecusto devido ao passo fixo em função do mix de produtos para várias instâncias

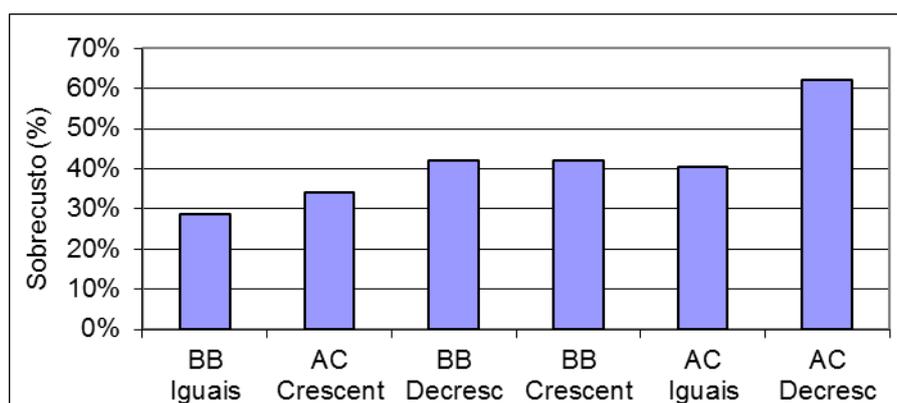


Figura 32: Sobrecusto devido ao passo fixo em função mix de produtos: Média de todas as instâncias

A Figura 33 mostra o sobrecusto devido ao passo fixo em função do mix de produtos com as instâncias agregadas por *setup*. O mix “AC Decrescente”, além de ter os maiores sobrecustos, apresenta maior sensibilidade ao aumento do *setup*. Já o mix “AC Crescente” (seguido pelo “BB Iguais”) demonstra menor sensibilidade ao aumento do *setup*. Portanto a sensibilidade ao aumento do *setup* parece aumentar conforme os mixes se tornam mais desiguais.

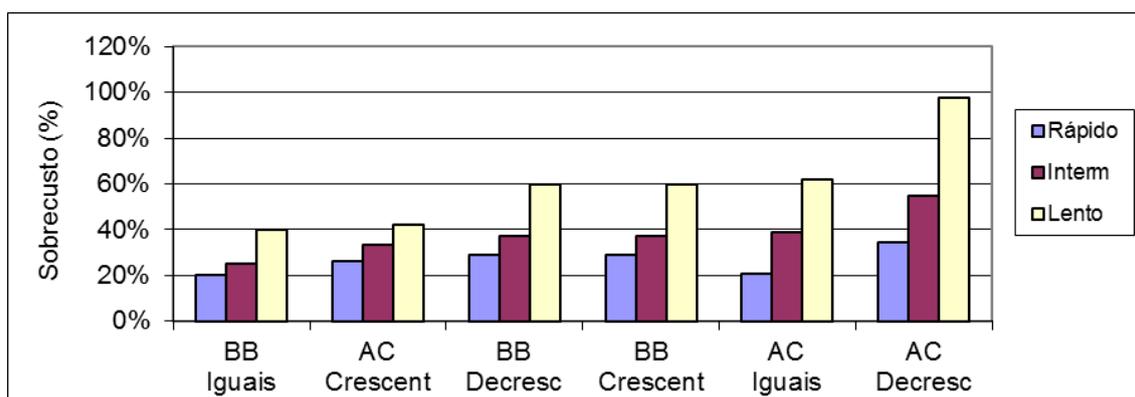


Figura 33: Sobrecusto devido ao passo fixo em função do mix de produtos: Média por *setup*

A Figura 34 mostra o sobrecusto devido ao passo fixo em função do mix de produtos com instâncias agregadas por nível de demanda. O sobrecusto de cada mix parece não sofrer grande influência do nível de demanda.

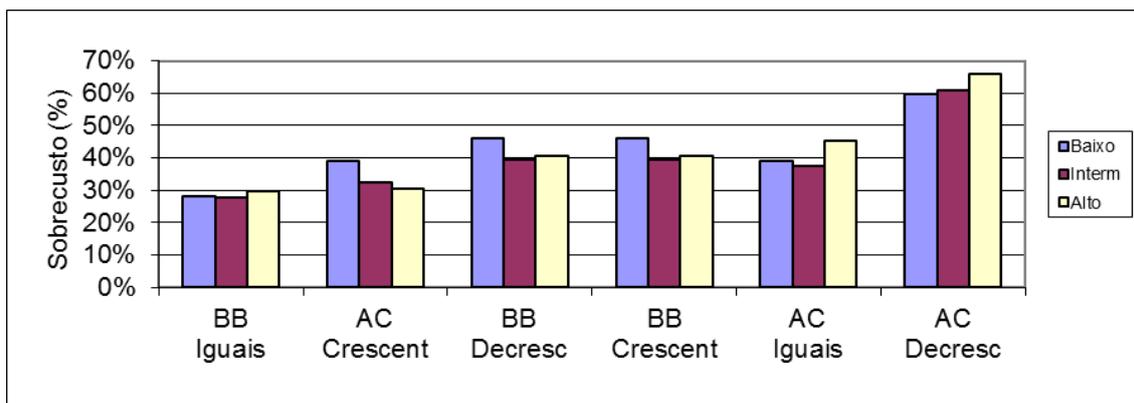


Figura 34: Sobrecusto devido ao passo fixo em função do mix de produtos: Média por nível de demanda

### 8.5.3 Sobrecusto devido ao ponto de pedido

Os “sobrecustos” analisados nesta seção foram calculados como sendo o percentual de aumento do custo fornecido pelo método que mais se aproxima ao proposto nos capítulos anteriores desta tese (método com passo fixo, ponto de pedido, disciplina de fila PMC e parada fixa) sobre o custo fornecido pela “solução ótima com passo fixo”.

As principais conclusões quanto ao sobrecusto devido ao ponto de pedido são:

- Não cresce (ou cresce pouco) conforme cresce o setup.
- Cresce conforme cresce o nível da demanda.
- Decresce com mixes mais desiguais.
- A sensibilidade ao aumento do nível da demanda decresce com mixes mais desiguais

O sobrecusto médio para todas as instâncias foi de 12%. Os valores para cada uma das 54 instâncias estão no Anexo 5. Uma análise detalhada é apresentada a seguir.

#### 8.5.3.1 Variação em função do *setup*

A Figura 35 abaixo mostra o sobrecusto devido ao ponto de pedido em função do *setup* para várias instâncias. Não parece haver um impacto sistemático para quase todas as instâncias. A exceção é a instância de nível de demanda “alto”, mix de demanda “AC” e tempo de operação “crescente”, cujo sobrecusto foi fortemente impactado pelo aumento do *setup*.

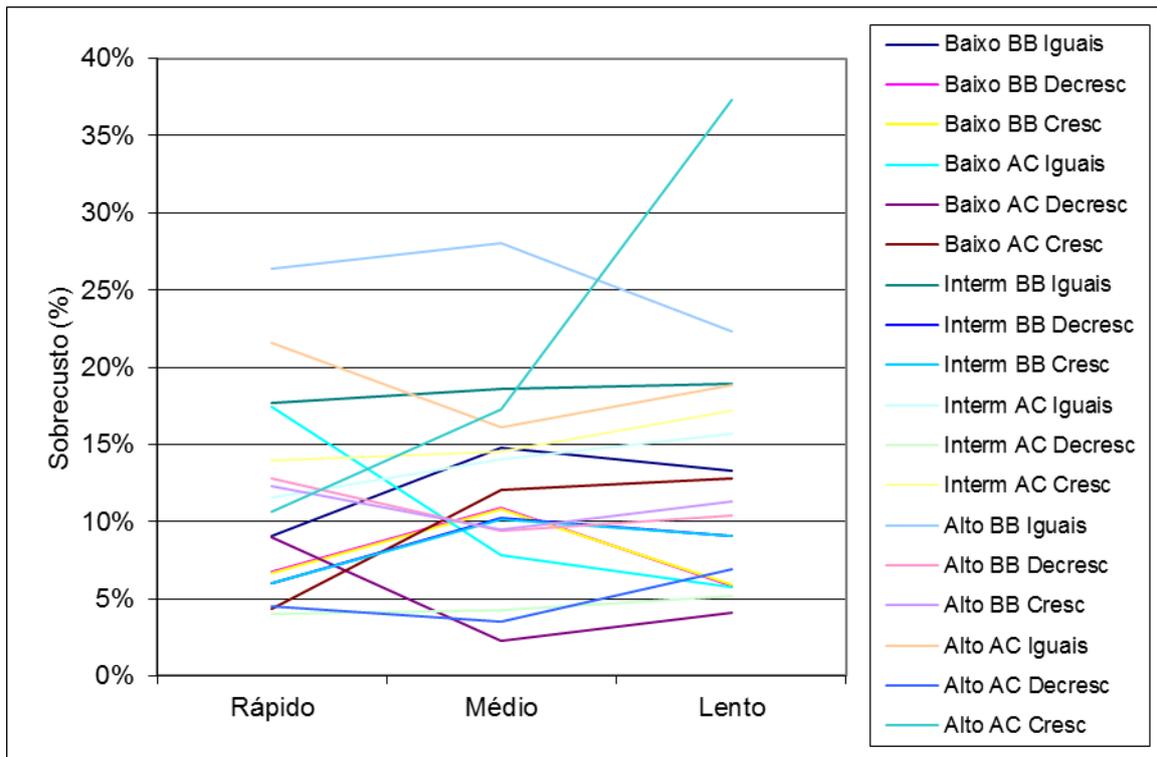


Figura 35: Sobrecusto devido ao ponto de pedido em função do *setup* para várias instâncias

Já as Figuras 36, 37 e 38 mostram o sobrecusto devido ao ponto de pedido em função do *setup* de modo agregado, respectivamente das seguintes maneiras: todas as instâncias agregadas, valores agregados por nível de demanda e valores agregados por mix de produtos. A Figura 36 mostra que este sobrecusto cresce levemente na medida em que cresce o *setup*. A Figura 37 mostra a maior sensibilidade do nível de demanda “alto” ao crescimento do *setup*.

Quanto à análise agregada por mix de produtos (Figura 38), o mix “demanda AC, tempo de operação crescente” é o único afetado sistematicamente pelo aumento do *setup*.

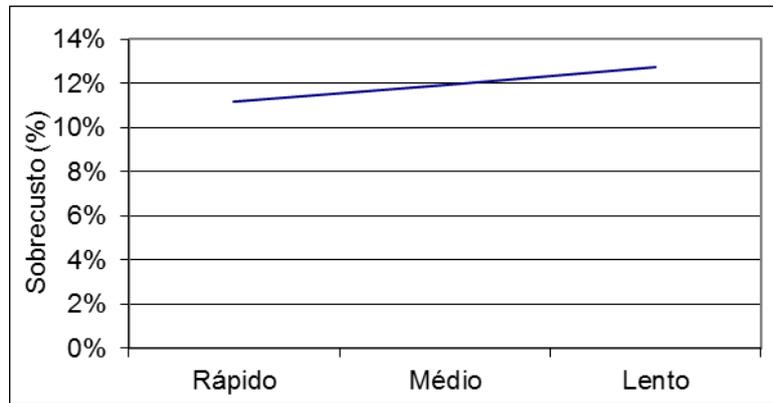


Figura 36: Sobrecusto devido ao ponto de pedido em função do *setup*: Média de todas as instâncias

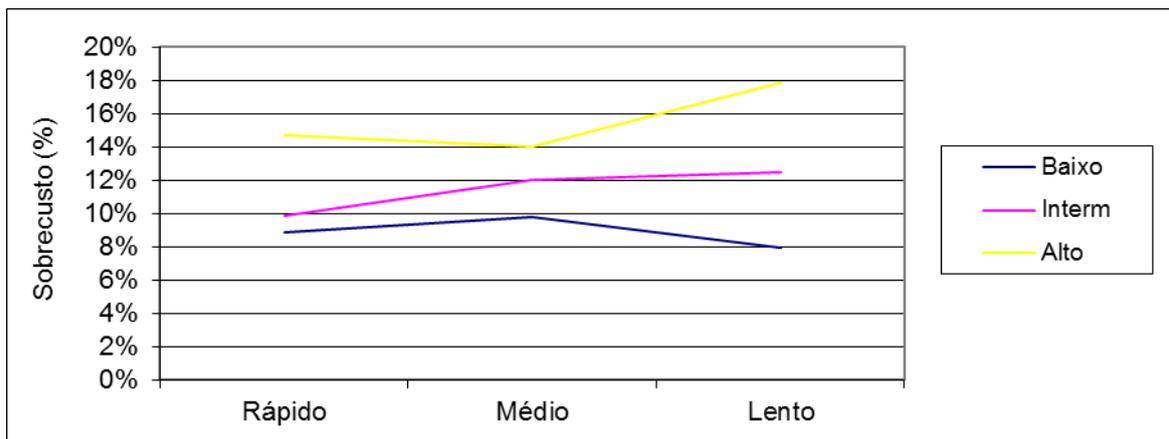


Figura 37: Sobrecusto devido ao ponto de pedido em função do *setup*: Média por nível de demanda

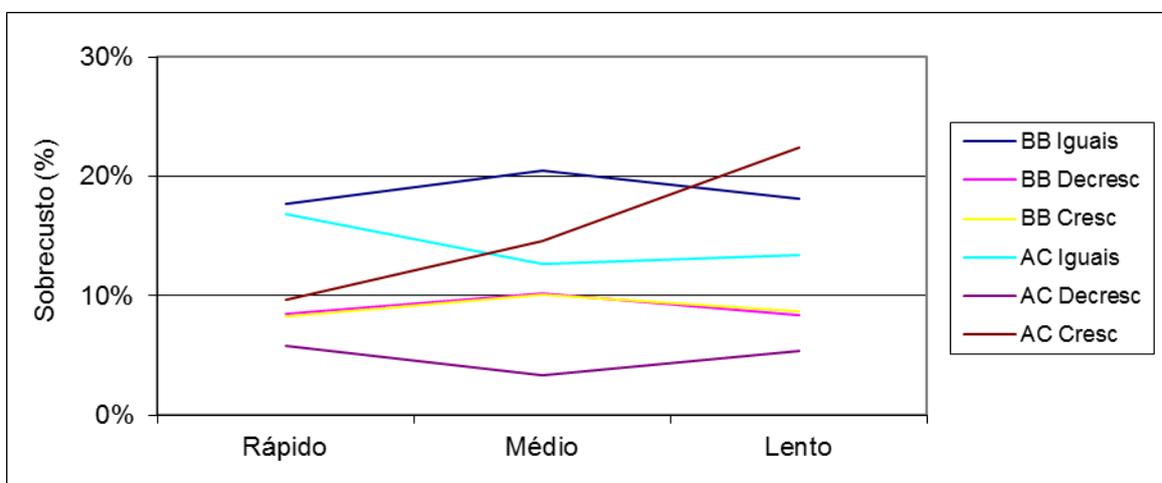


Figura 38: Sobrecusto devido ao ponto de pedido em função do *setup*: Média por mix de produtos

### 8.5.3.2 Variação em função do nível da demanda

A Figura 39 abaixo mostra o sobrecusto devido ao ponto de pedido em função do nível da demanda para várias instâncias. Já a Figura 40 mostra este sobrecusto de modo agregado. Embora o comportamento varie um pouco para instâncias individuais (Figura 39), o gráfico agregado (Figura 40) mostra nitidamente que o sobrecusto devido ao ponto de pedido é crescente em função do nível da demanda.

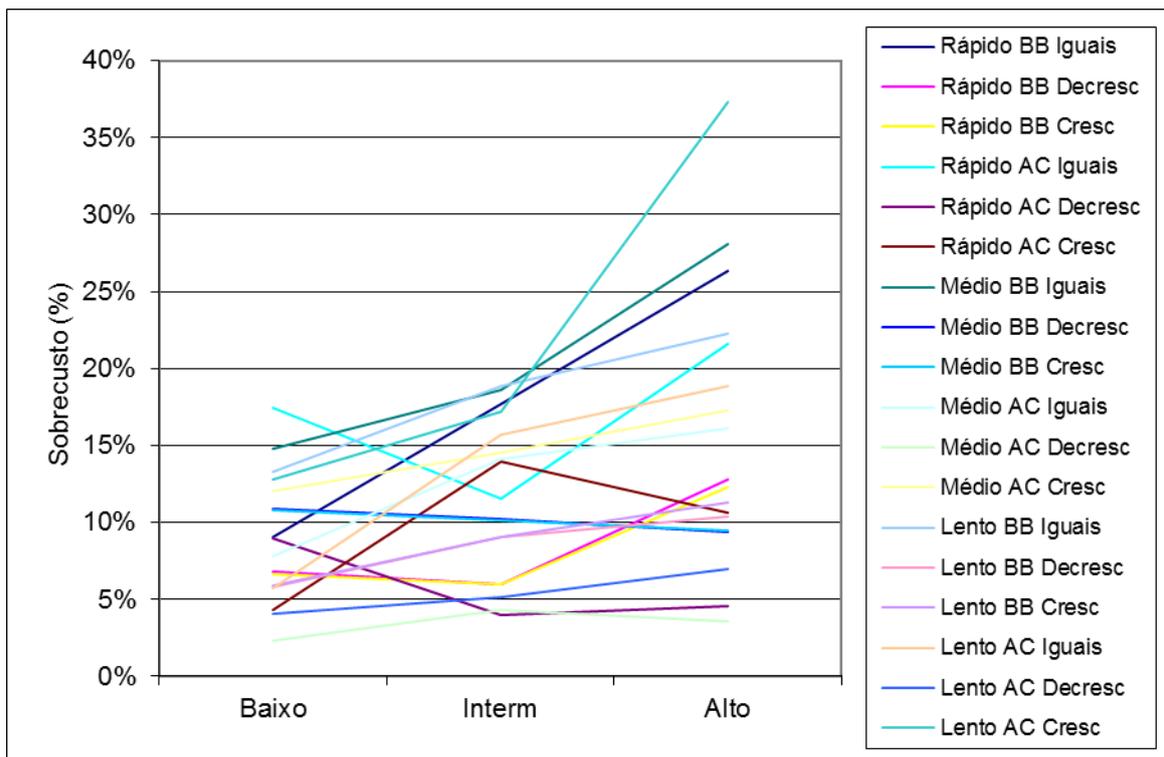


Figura 39: Sobrecusto devido ao ponto de pedido em função do nível da demanda para várias instâncias

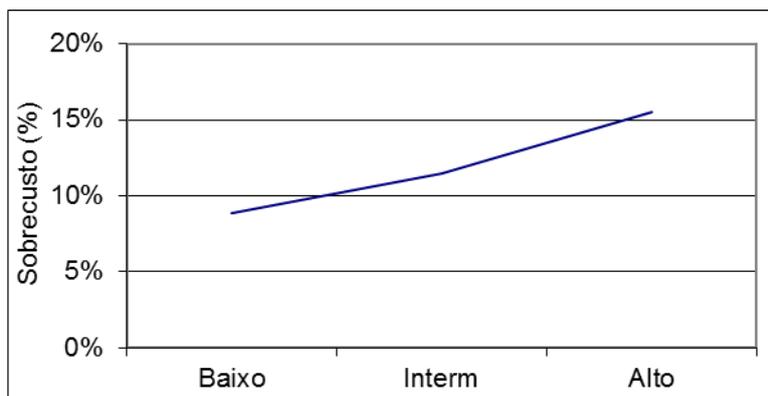


Figura 40: Sobrecusto devido ao ponto de pedido em função do nível da demanda:  
Média de todas as instâncias

Na Figura 41 pode-se ver que o sobrecusto devido ao ponto de pedido em função do nível da demanda não é fortemente afetado por diferentes *setups*.

Diferentemente, a Figura 42 mostra que o crescimento deste sobrecusto varia significativamente por mix de produtos. Enquanto o sobrecusto para o mix mais desigual (“AC Decrescente”) se mostrou indiferente ao crescimento do nível de demanda, o mix mais igual (“BB Iguais”) apresentou a maior sensibilidade ao crescimento do nível de demanda.

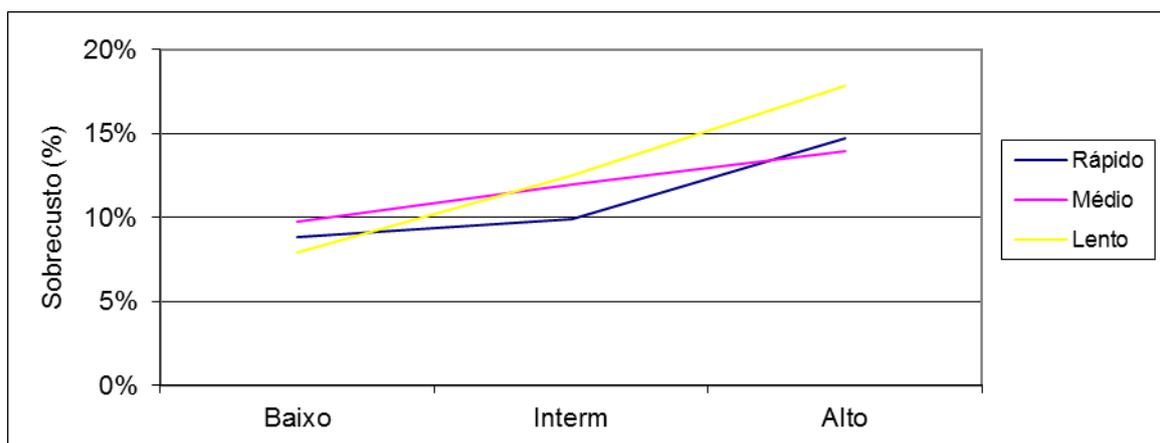


Figura 41: Sobrecusto devido ao ponto de pedido em função do nível da demanda:  
Média por *setup*

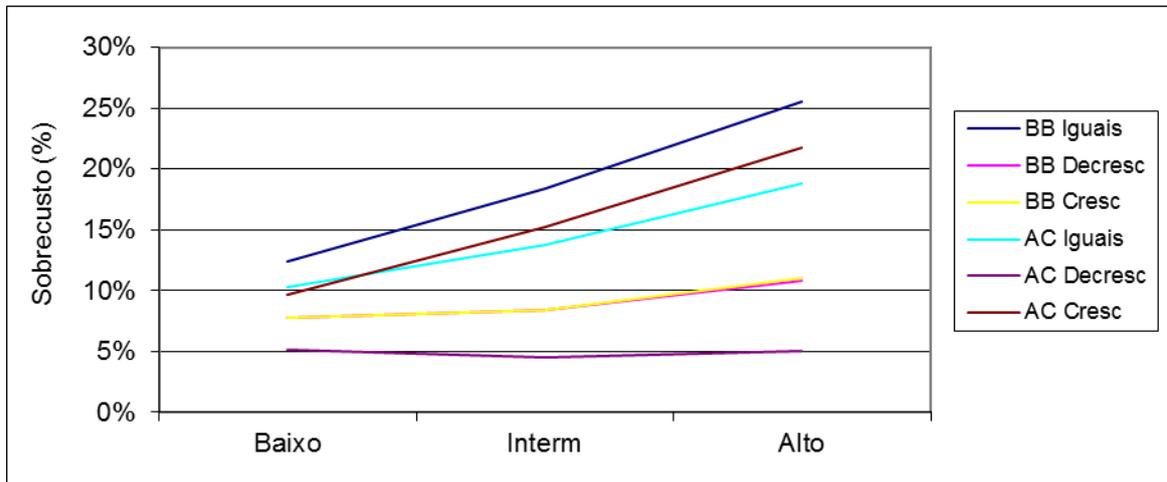


Figura 42: Sobrecusto devido ao ponto de pedido em função do nível da demanda:  
Média por mix de produtos

### 8.5.3.3 Variação em função do mix de produtos

A Figura 43 abaixo mostra o sobrecusto devido ao ponto de pedido em função do mix de produtos para várias instâncias. Já a Figura 44 mostra os valores médios com todas as instâncias agregadas. Vê-se que este sobrecusto varia significativamente dependendo do tipo de mix de produtos. A instância de maior sobrecusto é a de mix mais igualitário (“BB Iguais”) e a de menor sobrecusto é a de mix menos igualitário (“AC Decrescente”).

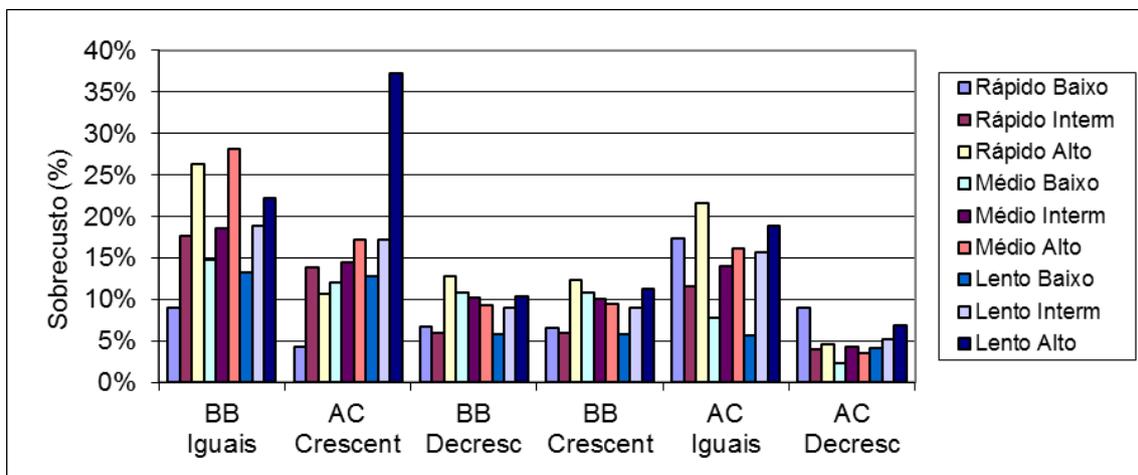


Figura 43: Sobrecusto devido ao ponto de pedido em função do mix de produtos para várias instâncias

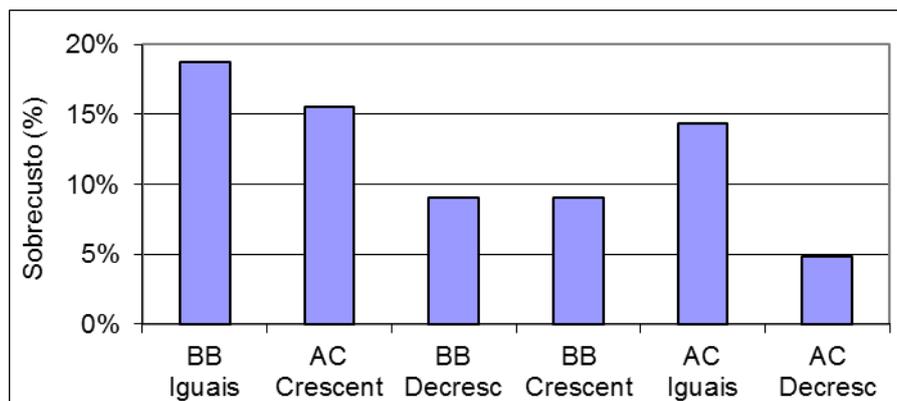


Figura 44: Sobrecusto devido ao ponto de pedido em função mix de produtos: Média de todas as instâncias

A Figura 45 mostra o sobrecusto devido ao ponto de pedido em função do mix de produtos com as instâncias agregadas por *setup*. O mix “AC Crescente” é o único que apresenta sobrecusto crescente na medida em que cresce o *setup*. Os demais aparentam indiferença em relação ao *setup*.

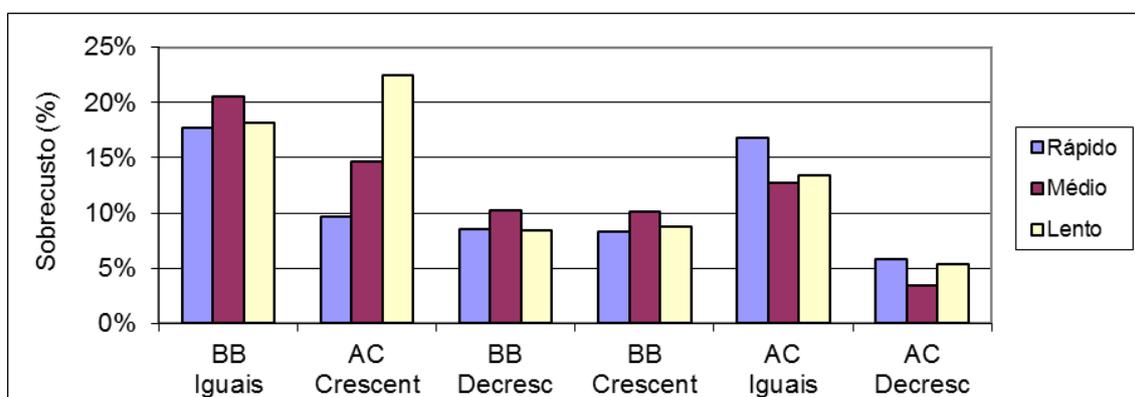


Figura 45: Sobrecusto devido ao ponto de pedido em função do mix de produtos: Média por *setup*

A Figura 46 mostra o sobrecusto devido ao ponto de pedido em função do mix de produtos com instâncias agregadas por nível de demanda. O mix “AC Decrescente”, além de ter os menores sobrecustos, é o único que aparenta clara insensibilidade ao aumento do nível de demanda.

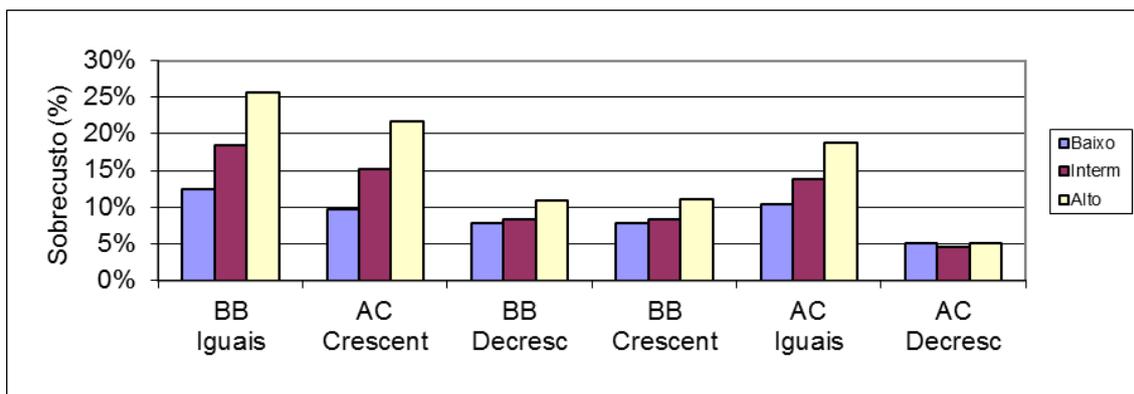


Figura 46: Sobrecusto devido ao ponto de pedido em função do mix de produtos: Média por nível de demanda

#### 8.5.4 Sobrecusto devido a paradas de duração múltipla do passo fixo

Os “sobrecustos” apresentados na Figura 47 foram calculados como sendo o percentual de aumento do custo fornecido pelo método que mais se aproxima ao proposto nos capítulos anteriores desta tese (método com passo fixo, ponto de pedido, disciplina de fila PMC e parada de duração fixa) sobre o custo fornecido por método totalmente similar exceto que eventuais paradas de máquina são de duração flexível.

Conforme pode ser visto na Figura 47, este sobrecusto não é expressivo. O valor médio para todas as instâncias é de 0,2%. Seus valores detalhados para cada uma das 54 instâncias estão no Anexo 5.

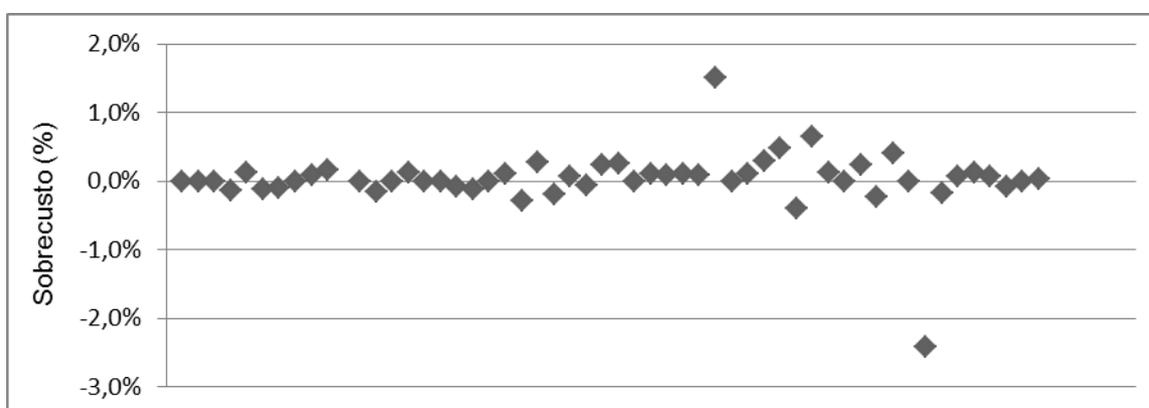


Figura 47: Sobrecusto devido a paradas de duração múltipla do passo fixo

## 9 CONCLUSÕES

A partir da integração de modelos clássicos de estoques e filas, foi proposto um modelo para representar o problema SELSP especializado para o contexto dos sistemas puxados de reposição da abordagem lean manufacturing.

Para resolução do modelo, foi desenvolvido um algoritmo iterativo compatível com diversas disciplinas de filas, através da combinação de rotina de busca unidimensional baseado na seção áurea com rotina de simulação discreta estocástica executada a cada iteração do algoritmo.

Experimentos computacionais mostraram que o algoritmo proposto é suficientemente rápido e estável, de modo a viabilizar o seu uso frequente com instâncias de porte real, em computadores de uso corrente. Estes resultados puderam ser alcançados devido à rápida convergência tanto da rotina de busca unidimensional quanto da rotina de simulação discreta.

Foi construído modelo de fluidos associado ao subproblema de sequenciamento da produção. Resolvido na otimalidade, a solução encontrada (chamada de PMC - produzir primeiro o produto com o maior custo de estocar vezes o tamanho de lote) se aproxima assintoticamente da solução ótima do modelo discreto original.

Comparada com a disciplina PAPS (“primeiro a acabar o estoque, primeiro a ser servido”), que é a alternativa viável estabelecida na literatura e compatível com o problema enfocado, a disciplina PMC produziu as seguintes vantagens:

- Menor custo total de estocar porque requer simultaneamente menores pontos de pedido e menor folga de capacidade (que possibilitam menores tamanhos de lote);
- Melhor atendimento aos níveis de serviço por produto;
- Admite, sem dificuldade adicional, níveis de serviço diferenciados por produto;
- Mais fácil operação, por ser uma regra estática (ao contrário da regra PAPS que a cada início de lote requer a identificação do produto cujo estoque está mais próximo de se esgotar).

Foram desenvolvidos ainda dois outros métodos de solução, viáveis apenas para instâncias de pequeno porte. O primeiro é o método ótimo, que se diferencia do que existe na literatura sobre SELSP por considerar tempos de produção determinísticos

(que resultam em processo estocástico semimarkoviano) e por usar o custo médio de longo prazo como critério de otimalidade (dispensando o uso de taxa para desconto de valores no tempo). O segundo é o método ótimo para um dado passo fixo – sem a utilização de pontos de pedido.

Em conjunto com o método proposto, estes métodos foram usados para avaliar o impacto no custo das seguintes regras práticas do sistema puxado de reposição: passo fixo, ponto de pedido e parada de máquina durante tempo múltiplo do passo fixo.

O impacto destas regras de controle nos custos foi avaliada segundo várias dimensões, a saber: tempo setup, nível de demanda e mix de produtos, este último compreendido como sendo a variação na demanda e no tempo de operação de cada produto individual. Esta avaliação pode apoiar a decisão de se adotar ou não o sistema puxado de reposição nas indústrias.

## 9.1 DESDOBRAMENTOS E TRABALHOS FUTUROS

O trabalho realizado pode ser desdobrado em novas pesquisas, dentre as quais destacamos:

- 1) Aperfeiçoamento do método proposto através de uma melhor transição da política ótima do modelo de fluido para a política do modelo discreto de sequenciamento. Cabe notar que esta medida provavelmente traria melhores resultados apenas para instâncias que contenham produtos cujo número médio de lotes aguardando processamento na fila seja maior que 1,5 (MEYN,1997).

- 2) Aperfeiçoamento do método proposto através da substituição da rotina de simulação discreta do algoritmo proposto na Seção 5.5 por método aproximativo que além de estabelecer a política de sequenciamento estabeleça também o critério de parada de máquina. Este critério poderia ser do tipo “ponto de pedido” (para compatibilidade com o sistema puxado de reposição) ou não.

- 3) Quanto ao desempenho computacional do método proposto, ele pode ser ainda melhorado através da determinação prévia dos tamanhos de amostras da demanda durante o tempo de reposição, colhidas durante a simulação estocástica. Esse tamanho de amostra deveria ser grande apenas o suficiente para garantir intervalos de confiança desejados.

- 4) Alterar o modelo apresentado do Capítulo 5 para que a sua função objetivo incorpore os custos do estoque adicional que é gerado na cadeia de suprimentos, na medida em que se aumenta o lote de produção.
- 5) Alterar o modelo apresentado do Capítulo 5 para que incorpore o dimensionamento da capacidade como uma variável de decisão.
- 6) Testar o modelo proposto através da sua efetiva implantação em plantas industriais.

## REFERÊNCIAS

ALTIOK, T.; SHIUE, G. A. Single-stage, multi-product production/inventory systems with backorders. **IIE Transactions**, v. 26, n. 2, p. 52 - 61, 1994.

\_\_\_\_\_. Single-stage, multi-product production/inventory systems with lost sales. **Naval Research Logistics (NRL)**, v. 42, n. 6, p. 889-913, 1995.

\_\_\_\_\_. Pull-type manufacturing systems with multiple product types. **IIE Transactions**, v. 32, n. 2, p. 115-124, 2000.

ANUPINDI, R.; TAYUR, S. Managing Stochastic Multiproduct Systems: Model, Measures, and Analysis. **Operations Research**, v. 46, n. 3-Supplement-3, p. 14, May 1, 1998 1998.

AXSÄTER, S. Supply Chain Operations: Serial and Distribution Inventory Systems. In: GRAVES, S. C. e KOK, A. G. (Ed.). **Supply Chain Management: Design, Coordination and Operation**: Elsevier, v.11, 2003. cap. 10, p.525-559. (Handbooks in Operations Research and Management Science). ISBN 978-0-444-51328-1.

\_\_\_\_\_. **Inventory Control**. 2nd. Berlin: Springer, 2006. 352 ISBN 9780387333311.

BAZARAA, M. S.; SHERALI, H. D.; SHETTY, C. M. **Nonlinear programming: Theory and algorithms**. 3rd. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.

BERTOLINI, M. et al. Extending value stream mapping: the synchro-MRP case. **International Journal of Production Research**, v. 51, n. 18, p. 5499-5519, 2014/02/27 2013.

BJORK, K.-M. A multi-item fuzzy economic production quantity problem with a finite production rate. **International Journal of Production Economics**, v. 135, p. 702-707, 2012.

BOMBERGER, E. E. A Dynamic Programming Approach to a Lot Size Scheduling Problem. **Management Science**, v. 12, n. 11, p. 778-784, July 1, 1966 1966.

BOURLAND, K. E.; YANO, C. A. The Strategic Use of Capacity Slack in the Economic Lot Scheduling Problem with Random Demand. **Management Science**, v. 40, n. 12, p. 1690-1704, December 1, 1994 1994.

BRADLEY, J. R.; CONWAY, R. W. Managing cyclic inventories. **Production and Operations Management**, v. 12, n. 4, p. 464-479, 2003.

BRANDER, P.; FORSBERG, R. Determination of safety stocks for cyclic schedules with stochastic demands. **International Journal of Production Economics**, v. 104, n. 2, p. 271-295, 2006.

BRANDER, P.; LEVÉN, E.; SEGERSTEDT, A. Lot sizes in a capacity constrained facility - a simulation study of stationary stochastic demand. **International Journal of Production Economics**, v. 93-94, p. 375-386, 2005.

CAO, X.-R. et al. A time aggregation approach to Markov decision processes. **Automatica**, v. 38, n. 6, p. 929-943, 2002.

CARRERAS, P. I. V.; SABATER, J. P. G. **El Problema de la Programación del Lote Económico (ELSP): Una revisión de la literatura.** X Congreso de Ingeniería de Organización. Valencia. 10 2006.

CHANDRASEKARAN, C. et al. Metaheuristics for solving economic lot scheduling problems (ELSP) using time-varying lot-sizes approach. **European Journal of Industrial Engineering**, v. 1, n. 2, p. 152-181, 2007.

CHATFIELD, D. C. The economic lot scheduling problem: A pure genetic search approach. **Computers & Operations Research**, v. 34, n. 10, p. 2865-2881, 2007.

CHEN, H.; MANDELBAUM, A. Discrete flow networks: bottleneck analysis and fluid approximations. **Mathematics of Operations Research**, v. 16, n. 2, p. 408-446, 1991.

COSTA, R. S.; JARDIM, E. G. M. Os cinco passos do pensamento enxuto. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: < <http://www.trilhaprojetos.com.br/home/node/114> >. Acesso em: 11 jan 2014.

DE SCHRIJVER, S. K.; AGHEZZAF, E.-H.; VANMAELE, H. Aggregate constrained inventory systems with independent multi-product demand: Control practices and theoretical limitations. **International Journal of Production Economics**, v. 143, p. 416-423, 2013.

DOLL, C. L.; WHYBARK, D. C. An iterative procedure for the single-machine multi-product lot scheduling problem. **Management Science**, v. 20, n. 1, p. 50-55, 1973.

EISENSTEIN, D. D. Recovering Cyclic Schedules Using Dynamic Produce-Up-To Policies. **Operations Research**, v. 53, n. 4, p. 675-688, July 1, 2005 2005.

ELMAGHRABY, S. E. The Economic Lot Scheduling Problem (ELSP): Review and Extensions. **Management Science**, v. 24, n. 6, p. 587-598, February 1, 1978 1978.

FEDERGRUEN, A.; KATALAN, Z. Customer waiting-time distributions under base-stock policies in single-facility multi-item production systems. **Naval Research Logistics (NRL)**, v. 43, n. 4, p. 533-548, 1996a.

\_\_\_\_\_. The Stochastic Economic Lot Scheduling Problem: Cyclical Base-Stock Policies with Idle Times. **Management Science**, v. 42, n. 6, p. 783-796, June 1, 1996 1996b.

\_\_\_\_\_. Determining Production Schedules Under Base-Stock Policies in Single Facility Multi-Item Production Systems. **Operations Research**, v. 46, n. 6, p. 883-898, November 1, 1998 1998.

FOGLIATTI, M. C.; MATTOS, N. M. C. **Teoria de filas**. Rio de Janeiro: Interciência, 2007.

FRANSOO, J. C. Demand management and production control in process industries. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 12, n. 7/8, p. 10, 1992.

FRANSOO, J. C.; SRIDHARAN, V.; BERTRAND, J. W. M. A hierarchical approach for capacity coordination in multiple products single-machine production systems with stationary stochastic demands. **European Journal of Operational Research**, v. 86, n. 1, p. 57-72, 1995.

GALLEGO, G. Scheduling the Production of Several Items with Random Demands in a Single Facility. **Management Science**, v. 36, n. 12, p. 1579-1592, December 1, 1990.

\_\_\_\_\_. When is a base stock policy optimal in recovering disrupted cyclic schedules? **Naval Research Logistics (NRL)**, v. 41, n. 3, p. 317-333, 1994.

GARCIA, E. S. et al. **Gestão de estoques: Otimizando a logística e a cadeia de suprimentos**. Rio de Janeiro: E-Papers Serviços Editoriais, 2006.

GASCON, A.; LEACHMAN, R. C.; LEFRANÇOIS, P. Multi-item, single-machine scheduling problem with stochastic demands: a comparison of heuristics. **International Journal of Production Research**, v. 32, n. 3, p. 583 - 596, 1994.

GLOCK, C. H. The joint economic lot size problem: A review. **International Journal of Production Economics**, v. 135, p. 671-686, 2012.

GUPTA, S.; JAIN, S. K. A literature review of lean manufacturing. **International Journal of Management Science and Engineering Management**, v. 8, n. 4, p. 241-249, 2014/02/20 2013.

HAJEK, B. Optimal control of two interacting service stations. **Automatic Control, IEEE Transactions on**, v. 29, n. 6, p. 491-499, 1984.

HAN, J.; KAMBER, M.; PEI, J. **Data mining: concepts and techniques**. Morgan kaufmann, 2006. ISBN 0080475582.

HANSSMANN, F. **Operations research in production and inventory control**. Wiley, 1962.

HARRIS, F. W. How many parts to make at once. **Factory, The Magazine of Management**, v. 10, n. 2, p. 135–136, 1913.

HARRISON, J. M. Dynamic scheduling of a multiclass queue: Discount optimality. **Operations Research**, v. 23, n. 2, p. 270-282, 1975.

HAYKIN, S. **Neural networks: a comprehensive foundation**. Prentice Hall, 1994. ISBN 0023527617.

KHOUJA, M.; MICHALEWICZ, Z.; WILMOT, M. The use of genetic algorithms to solve the economic lot size scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v. 110, n. 3, p. 509-524, 1998.

KRIEG, G. N.; KUHN, H. Production planning of multi-product kanban systems with significant setup times. In: FLEISCHMANN, B.; LASCH, R., *et al* (Ed.). **Operations Research Proceedings**. Berlin: Springer, v.2000, 2001. p.316-321. (Operations Research Proceedings).

\_\_\_\_\_. A decomposition method for multi-product kanban systems with setup times and lost sales. **IIE Transactions**, v. 34, n. 7, p. 613-625, 2002.

\_\_\_\_\_. Analysis of Multi-Product Kanban Systems with State-Dependent Setups and Lost Sales. **Annals of Operations Research**, v. 125, n. 1, p. 141-166, 2004.

LAGE JUNIOR, M.; GODINHO FILHO, M. Adaptações ao sistema kanban: revisão, classificação, análise e avaliação. **Gestão & Produção**, v. 15, n. 1, p. 173-188, 2008.

LEACHMAN, R. C.; GASCON, A. A Heuristic Scheduling Policy for Multi-Item, Single-Machine Production Systems with Time-Varying, Stochastic Demands. **Management Science**, v. 34, n. 3, p. 377-390, March 1, 1988 1988.

LEACHMAN, R. C. et al. Note: An Improvement to the Dynamic Cycle Lengths Heuristic for Scheduling the Multi-Item, Single-Machine. **Management Science**, v. 37, n. 9, p. 1201-1205, September 1, 1991 1991.

LEE, H. L.; PADMANABHAN, V.; WHANG, S. Information distortion in a supply chain: the bullwhip effect. v. 43, n. 4, p. 546-558, 1997.

LEIZAROWITZ, A.; SHWARTZ, A. Exact finite approximations of average-cost countable Markov decision processes. **Automatica**, v. 44, n. 6, p. 1480-1487, 2008.

LEVEN, E.; SEGERSTEDT, A. A scheduling policy for adjusting economic lot quantities to a feasible solution. **European Journal of Operational Research**, v. 179, n. 2, p. 414-423, 2007.

LIAN, Y. H.; VAN LANDEGHEM, H. Analysing the effects of Lean manufacturing using a value stream mapping-based simulation generator. **International Journal of Production Research**, v. 45, n. 13, p. 3037-3058, 2014/02/27 2007.

LUENBERGER, D. G.; YE, Y. **Linear and Nonlinear Programming**. 3rd. New York: Springer Science, 2008.

MARKOWITZ, D. M.; REIMAN, M. I.; WEIN, L. M. The Stochastic Economic Lot Scheduling Problem: Heavy Traffic Analysis of Dynamic Cyclic Policies. **Operations Research**, v. 48, n. 1, p. 136-154, January 1, 2000 2000.

MARODIN, G. A.; SAURIN, T. A. Implementing lean production systems: research areas and opportunities for future studies. **International Journal of Production Research**, v. 51, n. 22, p. 6663-6680, 2014/02/27 2013.

MEYN, S. Stability and optimization of queueing networks and their fluid models. In: YIN, G. e ZHANG, Q. (Ed.). **Mathematics of Stochastic Manufacturing Systems: AMS-SIAM Summer Seminar in Applied Mathematics**. Williamsburg: American Mathematical Society, v.33, 1997. p.175-200. ISBN 0075-8485.

NARASIMHA KAMATH, B.; BHATTACHARYA, S. **Lead time minimization of a multi-product, single-processor system: A comparison of cyclic policies**. Working paper series. Kolkata, India: Indian Institute of Management Calcutta: 21 p. 2005.

NILSSON, K.; SEGERSTEDT, A. Corrections of costs to feasible solutions of economic lot scheduling problems. **Computers & Industrial Engineering**, v. 54, n. 1, p. 155-168, 2008.

PAIK, S.-K.; BAGCHI, P. K. Understanding the causes of the bullwhip effect in a supply chain. **International Journal of Retail & Distribution Management**, v. 35, n. 4, p. 308 - 324, 2007.

PATERNINA-ARBOLEDA, C. D.; DAS, T. K. A multi-agent reinforcement learning approach to obtaining dynamic control policies for stochastic lot scheduling problem. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 13, n. 5, p. 389-406, 2005.

PHILIPOOM, P. R. et al. A mathematical programming approach for determining workcentre lotsizes in a just-in-time system with signal kanbans. **International Journal of Production Research**, v. 28, n. 1, p. 1--5, 1990.

PUTERMAN, M. L. **Markov decision processes: discrete stochastic dynamic programming**. New Jersey: Wiley-Interscience, 2009. ISBN 0470317728.

QIU, J.; LOULOU, R. Multiproduct production/inventory control under random demands. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 40, n. 2, p. 350-356, 1995.

RAZA, A. S.; AKGUNDUZ, A. A comparative study of heuristic algorithms on Economic Lot Scheduling Problem. **Computers & Industrial Engineering**, v. 55, n. 1, p. 94-109, 2008.

ROTHER, M.; SHOOK, J. **Aprendendo a enxergar: mapeando o fluxo de valor para agregar valor e eliminar o desperdício: manual de trabalho de uma ferramenta enxuta.** Lean Institute Brasil, 2003. ISBN 9788588874022.

SEGERSTEDT, A. Lot sizes in a capacity constrained facility with available initial inventories. **International Journal of Production Economics**, v. 59, n. 1-3, p. 469-475, 1999.

SHINGO, S. **Sistema de troca rápida de ferramenta: Uma revolução nos sistemas produtivos.** Porto Alegre: Bookman, 1985.

SMALLEY, A. **Creating level pull: a lean production-system improvement guide for production-control, operations, and engineering professionals.** Cambridge: Lean Enterprise Institute, 2004. 114 ISBN 9780974322506.

SOX, C. R. et al. A review of the stochastic lot scheduling problem. **International Journal of Production Economics**, v. 62, n. 3, p. 181-200, 1999.

SUTTON, R. S.; BARTO, A. G. **Reinforcement learning: An introduction.** Cambridge Univ Press, 1998.

TAKAGI, H. Queuing analysis of polling models. v. 20, n. 1, p. 5-28, 1988.

TAO, S.; QIANCHUAN, Z.; LUH, P. B. Incremental Value Iteration for Time-Aggregated Markov-Decision Processes. **Automatic Control, IEEE Transactions on**, v. 52, n. 11, p. 2177-2182, 2007.

THUN, J.-H.; DRÜKE, M.; GRÜBNER, A. Empowering Kanban through TPS-principles – an empirical analysis of the Toyota Production System. **International Journal of Production Research**, v. 48, n. 23, p. 7089-7106, 2014/02/27 2010.

VAN DER MEI, R. D.; WINANDS, E. M. M. Heavy traffic analysis of polling models by mean value analysis. **Performance Evaluation**, v. 65, n. 6-7, p. 400-416, 2008.

VAN VUUREN, M.; WINANDS, E. M. M. Iterative approximation of k-limited polling systems. **Queueing Systems**, v. 55, n. 3, p. 161-178, 2007.

VAUGHAN, T. S. Cyclical schedules vs. dynamic sequencing: Replenishment dynamics and inventory efficiency. **International Journal of Production Economics**, v. 107, n. 2, p. 518-527, 2007.

VEATCH, M. H. Fluid analysis of arrival routing. **Automatic Control, IEEE Transactions on**, v. 46, n. 8, p. 1254-1257, 2001.

VERGIN, R. C.; LEE, T. N. Scheduling rules for the multiple product single machine system with stochastic demand. **INFOR Information systems and operational research**, v. 16, n. 1, p. 64-73, 1978.

VRIES, J. D. The influence of power and interest on designing inventory management systems. **International Journal of Production Economics**, v. 143, p. 233-241, 2013.

WAGNER, M.; SMITS, S. R. A local search algorithm for the optimization of the stochastic economic lot scheduling problem. **International Journal of Production Economics**, v. 90, n. 3, p. 391-402, 2004.

WANKE, P. F. **Gestão de estoques na cadeia de suprimento: decisões e modelos quantitativos**. 3ª. Atlas, 2011. 384 ISBN 9788522462155.

WINANDS, E. M. M. **Polling, Production & Priorities**. 2007. (Ph.D.). Eindhoven University of Technology, Eindhoven.

\_\_\_\_\_. Branching-type polling systems with large setups. **OR Spectrum**, v. in press, 2010.

WINANDS, E. M. M.; ADAN, I. J. B. F.; VAN HOUTUM, G. J. The stochastic economic lot scheduling problem: A survey. **European Journal of Operational Research**, v. 210, n. 1, p. 1-9, 2011.

WINANDS, E. M. M. et al. A state-dependent polling model with k-limited service. **Probability in the Engineering and Informational Sciences**, v. 23, n. 02, p. 385-408, 2009.

WINANDS, E. M. M.; KOK, A. G. D.; TIMPE, C. Case study of a batch-production/inventory system. **Interfaces**, v. 39, n. 6, p. 552, 2009.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T. **A mentalidade enxuta nas empresas Lean Thinking: elimine o desperdício e crie riqueza**. Elsevier Editora, 2004. ISBN 8535212701.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T.; ROOS, D. **A máquina que mudou o mundo**. Rio de Janeiro: Campus, 2004. ISBN 9788535212693.

ZHENG, Y.-S.; ZIPKIN, P. A Queueing Model to Analyze the Value of Centralized Inventory Information. **Operations Research**, v. 38, n. 2, p. 296-307, 1990.

ZIPKIN, P. H. Models for Design and Control of Stochastic, Multi-Item Batch Production Systems. **Operations Research**, v. 34, n. 1, p. 91-104, January 1 1986.

\_\_\_\_\_. **Foundations of Inventory Management**. Singapore: McGraw-Hill, 2000. ISBN 9780256113792.

### ANEXO 1: INSTÂNCIAS DE TESTE

Identificação da Instância				Dados da Instância										
Tempo Setup	Nível de Demanda	Mix Demanda	Tempo Operação	Demanda		Setup (min)		Tempo Operação (min)		Tempo Operação – Carga (%)			Tempo Operação - Mix (%)	
				Prod 1	Prod 2	Prod 1	Prod 2	Prod 1	Prod 2	Prod 1	Prod 2	Total	Prod 1	Prod 2
Rápido	Baixo	BB	Iguais	8,40	8,40	1	1	10	10	17,5	17,5	35	50,0	50,0
Rápido	Baixo	BB	Decrescente	8,40	8,40	1	1	15	5	26,3	8,8	35	75,0	25,0
Rápido	Baixo	BB	Crescente	8,40	8,40	1	1	5	15	8,8	26,3	35	25,0	75,0
Médio	Baixo	BB	Iguais	8,40	8,40	4	4	10	10	17,5	17,5	35	50,0	50,0
Médio	Baixo	BB	Decrescente	8,40	8,40	4	4	15	5	26,3	8,8	35	75,0	25,0
Médio	Baixo	BB	Crescente	8,40	8,40	4	4	5	15	8,8	26,3	35	25,0	75,0
Lento	Baixo	BB	Iguais	8,40	8,40	16	16	10	10	17,5	17,5	35	50,0	50,0
Lento	Baixo	BB	Decrescente	8,40	8,40	16	16	15	5	26,3	8,8	35	75,0	25,0
Lento	Baixo	BB	Crescente	8,40	8,40	16	16	5	15	8,8	26,3	35	25,0	75,0
Rápido	Baixo	AC	Iguais	15,12	1,68	1	1	10	10	31,5	3,5	35	90,0	10,0
Rápido	Baixo	AC	Decrescente	10,80	1,20	1	1	15	5	33,8	1,3	35	96,4	3,6
Rápido	Baixo	AC	Crescente	25,20	2,80	1	1	5	15	26,3	8,8	35	75,0	25,0
Médio	Baixo	AC	Iguais	15,12	1,68	4	4	10	10	31,5	3,5	35	90,0	10,0
Médio	Baixo	AC	Decrescente	10,80	1,20	4	4	15	5	33,8	1,3	35	96,4	3,6
Médio	Baixo	AC	Crescente	25,20	2,80	4	4	5	15	26,3	8,8	35	75,0	25,0
Lento	Baixo	AC	Iguais	15,12	1,68	16	16	10	10	31,5	3,5	35	90,0	10,0

Identificação da Instância				Dados da Instância										
Tempo Setup	Nível de Demanda	Mix Demanda	Tempo Operação	Demanda		Setup (min)		Tempo Operação (min)		Tempo Operação – Carga (%)			Tempo Operação – Mix (%)	
				Prod 1	Prod 2	Prod 1	Prod 2	Prod 1	Prod 2	Prod 1	Prod 2	Total	Prod 1	Prod 2
Lento	Baixo	AC	Decrescente	10,80	1,20	16	16	15	5	33,8	1,3	35	96,4	3,6
Lento	Baixo	AC	Crescente	25,20	2,80	16	16	5	15	26,3	8,8	35	75,0	25,0
Rápido	Intermediário	BB	Iguais	12,00	12,00	1	1	10	10	25,0	25,0	50	50,0	50,0
Rápido	Intermediário	BB	Decrescente	12,00	12,00	1	1	15	5	37,5	12,5	50	75,0	25,0
Rápido	Intermediário	BB	Crescente	12,00	12,00	1	1	5	15	12,5	37,5	50	25,0	75,0
Médio	Intermediário	BB	Iguais	12,00	12,00	4	4	10	10	25,0	25,0	50	50,0	50,0
Médio	Intermediário	BB	Decrescente	12,00	12,00	4	4	15	5	37,5	12,5	50	75,0	25,0
Médio	Intermediário	BB	Crescente	12,00	12,00	4	4	5	15	12,5	37,5	50	25,0	75,0
Lento	Intermediário	BB	Iguais	12,00	12,00	16	16	10	10	25,0	25,0	50	50,0	50,0
Lento	Intermediário	BB	Decrescente	12,00	12,00	16	16	15	5	37,5	12,5	50	75,0	25,0
Lento	Intermediário	BB	Crescente	12,00	12,00	16	16	5	15	12,5	37,5	50	25,0	75,0
Rápido	Intermediário	AC	Iguais	21,60	2,40	1	1	10	10	45,0	5,0	50	90,0	10,0
Rápido	Intermediário	AC	Decrescente	15,43	1,71	1	1	15	5	48,2	1,8	50	96,4	3,6
Rápido	Intermediário	AC	Crescente	36,00	4,00	1	1	5	15	37,5	12,5	50	75,0	25,0
Médio	Intermediário	AC	Iguais	21,60	2,40	4	4	10	10	45,0	5,0	50	90,0	10,0
Médio	Intermediário	AC	Decrescente	15,43	1,71	4	4	15	5	48,2	1,8	50	96,4	3,6
Médio	Intermediário	AC	Crescente	36,00	4,00	4	4	5	15	37,5	12,5	50	75,0	25,0

Identificação da Instância				Dados da Instância										
Tempo Setup	Nível de Demanda	Mix Demanda	Tempo Operação	Demanda		Setup (min)		Tempo Operação (min)		Tempo Operação – Carga (%)			Tempo Operação – Mix (%)	
				Prod 1	Prod 2	Prod 1	Prod 2	Prod 1	Prod 2	Prod 1	Prod 2	Total	Prod 1	Prod 2
Lento	Intermediário	AC	Iguais	21,60	2,40	16	16	10	10	45,0	5,0	50	90,0	10,0
Lento	Intermediário	AC	Decrescente	15,43	1,71	16	16	15	5	48,2	1,8	50	96,4	3,6
Lento	Intermediário	AC	Crescente	36,00	4,00	16	16	5	15	37,5	12,5	50	75,0	25,0
Rápido	Alto	BB	Iguais	15,60	15,60	1	1	10	10	32,5	32,5	65	50,0	50,0
Rápido	Alto	BB	Decrescente	15,60	15,60	1	1	15	5	48,8	16,3	65	75,0	25,0
Rápido	Alto	BB	Crescente	15,60	15,60	1	1	5	15	16,3	48,8	65	25,0	75,0
Médio	Alto	BB	Iguais	15,60	15,60	4	4	10	10	32,5	32,5	65	50,0	50,0
Médio	Alto	BB	Decrescente	15,60	15,60	4	4	15	5	48,8	16,3	65	75,0	25,0
Médio	Alto	BB	Crescente	15,60	15,60	4	4	5	15	16,3	48,8	65	25,0	75,0
Lento	Alto	BB	Iguais	15,60	15,60	16	16	10	10	32,5	32,5	65	50,0	50,0
Lento	Alto	BB	Decrescente	15,60	15,60	16	16	15	5	48,8	16,3	65	75,0	25,0
Lento	Alto	BB	Crescente	15,60	15,60	16	16	5	15	16,3	48,8	65	25,0	75,0
Rápido	Alto	AC	Iguais	28,08	3,12	1	1	10	10	58,5	6,5	65	90,0	10,0
Rápido	Alto	AC	Decrescente	20,06	2,23	1	1	15	5	62,7	2,3	65	96,4	3,6
Rápido	Alto	AC	Crescente	46,80	5,20	1	1	5	15	48,8	16,3	65	75,0	25,0
Médio	Alto	AC	Iguais	28,08	3,12	4	4	10	10	58,5	6,5	65	90,0	10,0
Médio	Alto	AC	Decrescente	20,06	2,23	4	4	15	5	62,7	2,3	65	96,4	3,6

Identificação da Instância				Dados da Instância										
Tempo Setup	Nível de Demanda	Mix Demanda	Tempo Operação	Demanda		Setup (min)		Tempo Operação (min)		Tempo Operação – Carga (%)			Tempo Operação – Mix (%)	
				Prod 1	Prod 2	Prod 1	Prod 2	Prod 1	Prod 2	Prod 1	Prod 2	Total	Prod 1	Prod 2
Médio	Alto	AC	Crescente	46,80	5,20	4	4	5	15	48,8	16,3	65	75,0	25,0
Lento	Alto	AC	Iguais	28,08	3,12	16	16	10	10	58,5	6,5	65	90,0	10,0
Lento	Alto	AC	Decrescente	20,06	2,23	16	16	15	5	62,7	2,3	65	96,4	3,6
Lento	Alto	AC	Crescente	46,80	5,20	16	16	5	15	48,8	16,3	65	75,0	25,0

**ANEXO 2: RESULTADOS DO MÉTODO ÓTIMO**

Identificação da Instância				Custo Médio (\$)
Tempo Setup	Nível de Demanda	Mix Demanda	Tempo Operação	
Rápido	Baixo	BB	Iguais	4,49
Rápido	Baixo	BB	Decrescente	4,69
Rápido	Baixo	BB	Crescente	4,69
Médio	Baixo	BB	Iguais	5,24
Médio	Baixo	BB	Decrescente	5,32
Médio	Baixo	BB	Crescente	5,32
Lento	Baixo	BB	Iguais	6,97
Lento	Baixo	BB	Decrescente	7,11
Lento	Baixo	BB	Crescente	7,11
Rápido	Baixo	AC	Iguais	4,15
Rápido	Baixo	AC	Decrescente	4,11
Rápido	Baixo	AC	Crescente	4,98
Médio	Baixo	AC	Iguais	4,58
Médio	Baixo	AC	Decrescente	4,32
Médio	Baixo	AC	Crescente	5,36
Lento	Baixo	AC	Iguais	6,07
Lento	Baixo	AC	Decrescente	5,46
Lento	Baixo	AC	Crescente	7,56
Rápido	Intermediário	BB	Iguais	6,15
Rápido	Intermediário	BB	Decrescente	6,58
Rápido	Intermediário	BB	Crescente	6,58
Médio	Intermediário	BB	Iguais	7,09
Médio	Intermediário	BB	Decrescente	7,43
Médio	Intermediário	BB	Crescente	7,43
Lento	Intermediário	BB	Iguais	9,73
Lento	Intermediário	BB	Decrescente	9,87
Lento	Intermediário	BB	Crescente	9,87
Rápido	Intermediário	AC	Iguais	6,05
Rápido	Intermediário	AC	Decrescente	5,89
Rápido	Intermediário	AC	Crescente	6,43
Médio	Intermediário	AC	Iguais	6,63

Identificação da Instância				Custo Médio (\$)
Tempo Setup	Nível de Demanda	Mix Demanda	Tempo Operação	
Médio	Intermediário	AC	Decrescente	6,16
Médio	Intermediário	AC	Crescente	7,32
Lento	Intermediário	AC	Iguais	8,32
Lento	Intermediário	AC	Decrescente	7,55
Lento	Intermediário	AC	Crescente	10,29
Rápido	Alto	BB	Iguais	8,96
Rápido	Alto	BB	Decrescente	9,48
Rápido	Alto	BB	Crescente	9,48
Médio	Alto	BB	Iguais	10,42
Médio	Alto	BB	Decrescente	10,83
Médio	Alto	BB	Crescente	10,83
Lento	Alto	BB	Iguais	14,45
Lento	Alto	BB	Decrescente	14,53
Lento	Alto	BB	Crescente	14,53
Rápido	Alto	AC	Iguais	8,76
Rápido	Alto	AC	Decrescente	8,73
Rápido	Alto	AC	Crescente	8,97
Médio	Alto	AC	Iguais	9,43
Médio	Alto	AC	Decrescente	9,45
Médio	Alto	AC	Crescente	10,20
Lento	Alto	AC	Iguais	11,72
Lento	Alto	AC	Decrescente	10,99
Lento	Alto	AC	Crescente	14,12

### ANEXO 3: RESULTADOS DO MÉTODO ÓTIMO COM PASSO FIXO

Identificação da Instância				Solução Ótima com Passo Fixo						
Tempo Setup	Nível de Demanda	Mix Demanda	Tempo Operação	Custo Médio (\$)	Sobrecusto s/ Ótimo (%)	Passo (min)	Setup (%)	Folga (%)	Tamanho de Lote	
									Prod. 1	Prod. 2
Rápido	Baixo	BB	Iguais	5,72	27	11	3,5	61,5	1	1
Rápido	Baixo	BB	Decrescente	6,63	41	16	2,3	62,7	1	3
Rápido	Baixo	BB	Crescente	6,63	41	16	2,3	62,7	3	1
Médio	Baixo	BB	Iguais	6,30	20	14	14,0	51,0	1	1
Médio	Baixo	BB	Decrescente	7,52	41	19	9,3	55,7	1	3
Médio	Baixo	BB	Crescente	7,52	41	19	9,3	55,7	3	1
Lento	Baixo	BB	Iguais	9,57	37	36	28,0	37,0	2	2
Lento	Baixo	BB	Decrescente	11,03	55	46	18,7	46,3	2	6
Lento	Baixo	BB	Crescente	11,03	55	46	18,7	46,3	6	2
Rápido	Baixo	AC	Iguais	5,17	25	11	3,5	61,5	1	1
Rápido	Baixo	AC	Decrescente	5,92	44	16	2,3	62,7	1	3
Rápido	Baixo	AC	Crescente	6,67	34	16	2,3	62,7	3	1
Médio	Baixo	AC	Iguais	6,39	40	14	14,0	51,0	1	1
Médio	Baixo	AC	Decrescente	6,58	52	19	9,3	55,7	1	3
Médio	Baixo	AC	Crescente	7,32	37	19	9,3	55,7	3	1
Lento	Baixo	AC	Iguais	9,27	53	46	18,7	46,3	3	3

Identificação da Instância				Solução Ótima com Passo Fixo						
Tempo Setup	Nível de Demanda	Mix Demanda	Tempo Operação	Custo Médio (\$)	Sobrecusto s/ Ótimo (%)	Passo (min)	Setup (%)	Folga (%)	Tamanho de Lote	
									Prod. 1	Prod. 2
Lento	Baixo	AC	Decrescente	10,00	83	46	18,7	46,3	2	6
Lento	Baixo	AC	Crescente	11,08	47	46	18,7	46,3	6	2
Rápido	Intermediário	BB	Iguais	7,12	16	11	5,0	45,0	1	1
Rápido	Intermediário	BB	Decrescente	8,34	27	16	3,3	46,7	1	3
Rápido	Intermediário	BB	Crescente	8,34	27	16	3,3	46,7	3	1
Médio	Intermediário	BB	Iguais	9,08	28	24	10,0	40,0	2	2
Médio	Intermediário	BB	Decrescente	9,79	32	19	13,3	36,7	1	3
Médio	Intermediário	BB	Crescente	9,79	32	19	13,3	36,7	3	1
Lento	Intermediário	BB	Iguais	13,60	40	56	20,0	30,0	4	4
Lento	Intermediário	BB	Decrescente	15,73	59	61	17,8	32,2	3	9
Lento	Intermediário	BB	Crescente	15,73	59	61	17,8	32,2	9	3
Rápido	Intermediário	AC	Iguais	7,10	17	11	5,0	45,0	1	1
Rápido	Intermediário	AC	Decrescente	7,72	31	16	3,3	46,7	1	3
Rápido	Intermediário	AC	Crescente	8,24	28	16	3,3	46,7	3	1
Médio	Intermediário	AC	Iguais	8,95	35	24	10,0	40,0	2	2
Médio	Intermediário	AC	Decrescente	9,55	55	19	13,3	36,7	1	3
Médio	Intermediário	AC	Crescente	9,27	27	19	13,3	36,7	3	1

Identificação da Instância				Solução Ótima com Passo Fixo						
Tempo Setup	Nível de Demanda	Mix Demanda	Tempo Operação	Custo Médio (\$)	Sobrecusto s/ Ótimo (%)	Passo (min)	Setup (%)	Folga (%)	Tamanho de Lote	
									Prod. 1	Prod. 2
Lento	Intermediário	AC	Iguais	13,36	61	56	20,0	30,0	4	4
Lento	Intermediário	AC	Decrescente	14,88	97	61	17,8	32,2	3	9
Lento	Intermediário	AC	Crescente	14,72	43	46	26,7	23,3	6	2
Rápido	Alto	BB	Iguais	10,58	18	11	6,5	28,5	1	1
Rápido	Alto	BB	Decrescente	11,23	18	16	4,3	30,7	1	3
Rápido	Alto	BB	Crescente	11,23	18	16	4,3	30,7	3	1
Médio	Alto	BB	Iguais	13,32	28	34	8,7	26,3	3	3
Médio	Alto	BB	Decrescente	15,00	39	34	8,7	26,3	2	6
Médio	Alto	BB	Crescente	15,00	39	34	8,7	26,3	6	2
Lento	Alto	BB	Iguais	20,73	43	86	14,9	20,1	7	7
Lento	Alto	BB	Decrescente	23,97	65	76	17,3	17,7	4	12
Lento	Alto	BB	Crescente	23,97	65	76	17,3	17,7	12	4
Rápido	Alto	AC	Iguais	10,61	21	21	3,3	31,8	2	2
Rápido	Alto	AC	Decrescente	11,21	28	16	4,3	30,7	1	3
Rápido	Alto	AC	Crescente	10,54	18	16	4,3	30,7	3	1
Médio	Alto	AC	Iguais	13,39	42	34	8,7	26,3	3	3
Médio	Alto	AC	Decrescente	14,90	58	34	8,7	26,3	2	6

Identificação da Instância				Solução Ótima com Passo Fixo						
Tempo Setup	Nível de Demanda	Mix Demanda	Tempo Operação	Custo Médio (\$)	Sobrecusto s/ Ótimo (%)	Passo (min)	Setup (%)	Folga (%)	Tamanho de Lote	
									Prod. 1	Prod. 2
Médio	Alto	AC	Crescente	13,94	37	34	8,7	26,3	6	2
Lento	Alto	AC	Iguais	20,23	73	96	13,0	22,0	8	8
Lento	Alto	AC	Decrescente	23,32	112	91	13,9	21,1	5	15
Lento	Alto	AC	Crescente	19,34	37	91	13,9	21,1	15	5

**ANEXO 4: RESULTADOS DO MÉTODO COM PASSO FIXO, PONTO DE PEDIDO, DISCIPLINA “PMC” E PARADA FLEXÍVEL**

Identificação da Instância				Solução do Método “PMCFlex”									
Tempo Setup	Nível de Demanda	Mix Demanda	Tempo Operação	Custo Médio (\$)	Sobrecustos/ÓtimoPF (%)	Sobrecustos/ Ótimo (%)	Passo (min)	Setup (%)	Folga (%)	Tamanho de Lote		Ponto de Pedido	
										Prod. 1	Prod. 2	Prod. 1	Prod. 2
Rápido	Baixo	BB	Iguais	6,24	9	39	11	3,5	61,5	1	1	1	2
Rápido	Baixo	BB	Decrescente	7,08	7	51	16	2,3	62,7	1	3	2	2
Rápido	Baixo	BB	Crescente	7,07	7	51	16	2,3	62,7	3	1	1	2
Médio	Baixo	BB	Iguais	7,24	15	38	14	14,0	51,0	1	1	2	3
Médio	Baixo	BB	Decrescente	8,33	11	57	19	9,3	55,7	1	3	2	2
Médio	Baixo	BB	Crescente	8,34	11	57	19	9,3	55,7	3	1	1	3
Lento	Baixo	BB	Iguais	10,85	13	56	46	18,7	46,3	3	3	3	4
Lento	Baixo	BB	Decrescente	11,67	6	64	46	18,7	46,3	2	6	4	4
Lento	Baixo	BB	Crescente	11,67	6	64	46	18,7	46,3	6	2	3	4
Rápido	Baixo	AC	Iguais	6,06	17	46	11	3,5	61,5	1	1	2	0
Rápido	Baixo	AC	Decrescente	5,99	1	46	16	2,3	62,7	1	3	2	0
Rápido	Baixo	AC	Crescente	6,96	4	40	16	2,3	62,7	3	1	3	1
Médio	Baixo	AC	Iguais	6,9	8	51	14	14,0	51,0	1	1	3	1
Médio	Baixo	AC	Decrescente	6,73	2	56	19	9,3	55,7	1	3	3	0
Médio	Baixo	AC	Crescente	8,19	12	53	19	9,3	55,7	3	1	3	1
Lento	Baixo	AC	Iguais	9,8	6	61	46	18,7	46,3	3	3	5	1

Identificação da Instância				Solução do Método “PMCFlex”									
Tempo Setup	Nível de Demanda	Mix Demanda	Tempo Operação	Custo Médio (\$)	Sobrecustos/ÓtimoPF (%)	Sobrecustos/ Ótimo (%)	Passo (min)	Setup (%)	Folga (%)	Tamanho de Lote		Ponto de Pedido	
										Prod. 1	Prod. 2	Prod. 1	Prod. 2
Lento	Baixo	AC	Decrescente	10,41	4	91	46	18,7	46,3	2	6	5	1
Lento	Baixo	AC	Crescente	12,51	13	65	46	18,7	46,3	6	2	6	2
Rápido	Intermediário	BB	Iguais	8,39	18	36	11	5,0	45,0	1	1	2	4
Rápido	Intermediário	BB	Decrescente	8,84	6	34	16	3,3	46,7	1	3	3	4
Rápido	Intermediário	BB	Crescente	8,83	6	34	16	3,3	46,7	3	1	2	4
Médio	Intermediário	BB	Iguais	10,8	19	52	24	10,0	40,0	2	2	3	4
Médio	Intermediário	BB	Decrescente	10,76	10	45	34	6,7	43,3	2	6	4	5
Médio	Intermediário	BB	Crescente	10,8	10	45	19	13,3	36,7	3	1	2	5
Lento	Intermediário	BB	Iguais	16,16	19	66	56	20,0	30,0	4	4	5	7
Lento	Intermediário	BB	Decrescente	17,16	9	74	61	17,8	32,2	3	9	6	9
Lento	Intermediário	BB	Crescente	17,11	9	73	61	17,8	32,2	9	3	5	7
Rápido	Intermediário	AC	Iguais	7,9	11	31	11	5,0	45,0	1	1	4	1
Rápido	Intermediário	AC	Decrescente	8,03	4	36	16	3,3	46,7	1	3	4	1
Rápido	Intermediário	AC	Crescente	9,38	14	46	16	3,3	46,7	3	1	4	1
Médio	Intermediário	AC	Iguais	10,2	14	54	24	10,0	40,0	2	2	5	1
Médio	Intermediário	AC	Decrescente	9,95	4	62	34	6,7	43,3	2	6	5	1
Médio	Intermediário	AC	Crescente	10,61	14	45	19	13,3	36,7	3	1	5	2

Identificação da Instância				Solução do Método “PMCFlex”									
Tempo Setup	Nível de Demanda	Mix Demanda	Tempo Operação	Custo Médio (\$)	Sobrecustos/ÓtimoPF (%)	Sobrecustos/ Ótimo (%)	Passo (min)	Setup (%)	Folga (%)	Tamanho de Lote		Ponto de Pedido	
										Prod. 1	Prod. 2	Prod. 1	Prod. 2
Lento	Intermediário	AC	Iguais	15,23	14	83	56	20,0	30,0	4	4	8	2
Lento	Intermediário	AC	Decrescente	15,65	5	107	61	17,8	32,2	3	9	8	2
Lento	Intermediário	AC	Crescente	17,23	17	67	46	26,7	23,3	6	2	10	4
Rápido	Alto	BB	Iguais	13,33	26	49	21	3,3	31,8	2	2	3	6
Rápido	Alto	BB	Decrescente	12,61	12	33	31	2,2	32,8	2	6	5	9
Rápido	Alto	BB	Crescente	12,66	13	34	16	4,3	30,7	3	1	2	7
Médio	Alto	BB	Iguais	16,95	27	63	34	8,7	26,3	3	3	4	8
Médio	Alto	BB	Decrescente	16,39	9	51	49	5,8	29,2	3	9	6	11
Médio	Alto	BB	Crescente	16,42	9	52	34	8,7	26,3	6	2	4	8
Lento	Alto	BB	Iguais	25,29	22	75	86	14,9	20,1	7	7	8	12
Lento	Alto	BB	Decrescente	26,52	11	83	121	9,9	25,1	7	21	11	14
Lento	Alto	BB	Crescente	26,56	11	83	76	17,3	17,7	12	4	7	14
Rápido	Alto	AC	Iguais	12,9	22	47	21	3,3	31,8	2	2	6	2
Rápido	Alto	AC	Decrescente	12,01	7	38	31	2,2	32,8	2	6	7	2
Rápido	Alto	AC	Crescente	11,68	11	30	16	4,3	30,7	3	1	6	3
Médio	Alto	AC	Iguais	15,54	16	65	44	6,5	28,5	4	4	9	3
Médio	Alto	AC	Decrescente	15,41	3	63	49	5,8	29,2	3	9	9	2

Identificação da Instância				Solução do Método “PMCFlex”									
Tempo Setup	Nível de Demanda	Mix Demanda	Tempo Operação	Custo Médio (\$)	Sobrecustos/ÓtimoPF (%)	Sobrecustos/ Ótimo (%)	Passo (min)	Setup (%)	Folga (%)	Tamanho de Lote		Ponto de Pedido	
										Prod. 1	Prod. 2	Prod. 1	Prod. 2
Médio	Alto	AC	Crescente	16,34	17	60	34	8,7	26,3	6	2	10	3
Lento	Alto	AC	Iguais	24,07	19	105	96	13,0	22,0	8	8	15	4
Lento	Alto	AC	Decrescente	24,94	7	127	106	11,6	23,4	6	18	13	4
Lento	Alto	AC	Crescente	26,55	37	88	76	17,3	17,7	12	4	18	6

**ANEXO 5: RESULTADOS DO MÉTODO COM PASSO FIXO, PONTO DE PEDIDO, DISCIPLINA “PMC” E PARADA FIXA**

Identificação da Instância				Solução do Método “PMC”										
Tempo Setup	Nível de Demanda	Mix Demanda	Tempo Operação	Custo Médio (\$)	Sobrecustos/PMC Flex (%)	Sobrecustos/Ótimo PF (%)	Sobrecustos/Ótimo (%)	Passo (min)	Setup (%)	Folga (%)	Tamanho de Lote		Ponto de Pedido	
											Prod. 1	Prod. 2	Prod. 1	Prod. 2
Rápido	Baixo	BB	Iguais	6,24	0,0	9	39	11	3,5	61,5	1	1	1	2
Rápido	Baixo	BB	Decrescente	7,08	0,0	7	51	16	2,3	62,7	1	3	2	2
Rápido	Baixo	BB	Crescente	7,07	0,0	7	51	16	2,3	62,7	3	1	1	2
Médio	Baixo	BB	Iguais	7,23	-0,1	15	38	14	14,0	51,0	1	1	2	3
Médio	Baixo	BB	Decrescente	8,34	0,1	11	57	19	9,3	55,7	1	3	2	2
Médio	Baixo	BB	Crescente	8,33	-0,1	11	57	19	9,3	55,7	3	1	1	3
Lento	Baixo	BB	Iguais	10,84	-0,1	13	56	46	18,7	46,3	3	3	3	4
Lento	Baixo	BB	Decrescente	11,67	0,0	6	64	46	18,7	46,3	2	6	4	4
Lento	Baixo	BB	Crescente	11,68	0,1	6	64	46	18,7	46,3	6	2	3	4
Rápido	Baixo	AC	Iguais	6,07	0,2	17	46	11	3,5	61,5	1	1	2	0
Rápido	Baixo	AC	Decrescente	6,45	7,7	9	57	16	2,3	62,7	1	3	2	0
Rápido	Baixo	AC	Crescente	6,96	0,0	4	40	16	2,3	62,7	3	1	3	1
Médio	Baixo	AC	Iguais	6,89	-0,1	8	50	14	14,0	51,0	1	1	3	1
Médio	Baixo	AC	Decrescente	6,73	0,0	2	56	19	9,3	55,7	1	3	3	0
Médio	Baixo	AC	Crescente	8,20	0,1	12	53	19	9,3	55,7	3	1	3	1

Identificação da Instância				Solução do Método “PMC”										
Tempo Setup	Nível de Demanda	Mix Demanda	Tempo Operação	Custo Médio (\$)	Sobrecustos/PMC Flex (%)	Sobrecustos/Ótimo PF (%)	Sobrecustos/ Ótimo (%)	Passo (min)	Setup (%)	Folga (%)	Tamanho de Lote		Ponto de Pedido	
											Prod. 1	Prod. 2	Prod. 1	Prod. 2
Lento	Baixo	AC	Iguais	9,80	0,0	6	61	46	18,7	46,3	3	3	5	1
Lento	Baixo	AC	Decrescente	10,41	0,0	4	91	46	18,7	46,3	2	6	5	1
Lento	Baixo	AC	Crescente	12,50	-0,1	13	65	46	18,7	46,3	6	2	6	2
Rápido	Intermediário	BB	Iguais	8,38	-0,1	18	36	11	5,0	45,0	1	1	2	4
Rápido	Intermediário	BB	Decrescente	8,84	0,0	6	34	16	3,3	46,7	1	3	3	4
Rápido	Intermediário	BB	Crescente	8,84	0,1	6	34	16	3,3	46,7	3	1	2	4
Médio	Intermediário	BB	Iguais	10,77	-0,3	19	52	24	10,0	40,0	2	2	3	4
Médio	Intermediário	BB	Decrescente	10,79	0,3	10	45	34	6,7	43,3	2	6	4	5
Médio	Intermediário	BB	Crescente	10,78	-0,2	10	45	19	13,3	36,7	3	1	2	5
Lento	Intermediário	BB	Iguais	16,17	0,1	19	66	56	20,0	30,0	4	4	5	7
Lento	Intermediário	BB	Decrescente	17,15	-0,1	9	74	61	17,8	32,2	3	9	6	9
Lento	Intermediário	BB	Crescente	17,15	0,2	9	74	61	17,8	32,2	9	3	5	7
Rápido	Intermediário	AC	Iguais	7,92	0,3	12	31	11	5,0	45,0	1	1	4	1
Rápido	Intermediário	AC	Decrescente	8,03	0,0	4	36	16	3,3	46,7	1	3	4	1
Rápido	Intermediário	AC	Crescente	9,39	0,1	14	46	16	3,3	46,7	3	1	4	1
Médio	Intermediário	AC	Iguais	10,21	0,1	14	54	24	10,0	40,0	2	2	5	1

Identificação da Instância				Solução do Método “PMC”										
Tempo Setup	Nível de Demanda	Mix Demanda	Tempo Operação	Custo Médio (\$)	Sobrecustos/PMC Flex (%)	Sobrecustos/Ótimo PF (%)	Sobrecustos/ Ótimo (%)	Passo (min)	Setup (%)	Folga (%)	Tamanho de Lote		Ponto de Pedido	
											Prod. 1	Prod. 2	Prod. 1	Prod. 2
Médio	Intermediário	AC	Decrescente	9,96	0,1	4	62	34	6,7	43,3	2	6	5	1
Médio	Intermediário	AC	Crescente	10,62	0,1	15	45	19	13,3	36,7	3	1	5	2
Lento	Intermediário	AC	Iguais	15,46	1,5	16	86	66	16,0	34,0	5	5	8	2
Lento	Intermediário	AC	Decrescente	15,65	0,0	5	107	61	17,8	32,2	3	9	8	2
Lento	Intermediário	AC	Crescente	17,25	0,1	17	68	46	26,7	23,3	6	2	10	4
Rápido	Alto	BB	Iguais	13,37	0,3	26	49	21	3,3	31,8	2	2	3	6
Rápido	Alto	BB	Decrescente	12,67	0,5	13	34	31	2,2	32,8	2	6	5	10
Rápido	Alto	BB	Crescente	12,61	-0,4	12	33	16	4,3	30,7	3	1	2	7
Médio	Alto	BB	Iguais	17,06	0,6	28	64	34	8,7	26,3	3	3	4	8
Médio	Alto	BB	Decrescente	16,41	0,1	9	52	49	5,8	29,2	3	9	6	11
Médio	Alto	BB	Crescente	16,42	0,0	9	52	34	8,7	26,3	6	2	4	8
Lento	Alto	BB	Iguais	25,35	0,2	22	75	96	13,0	22,0	8	8	9	11
Lento	Alto	BB	Decrescente	26,46	-0,2	10	82	121	9,9	25,1	7	21	11	14
Lento	Alto	BB	Crescente	26,67	0,4	11	84	76	17,3	17,7	12	4	7	14
Rápido	Alto	AC	Iguais	12,90	0,0	22	47	21	3,3	31,8	2	2	6	2
Rápido	Alto	AC	Decrescente	11,72	-2,4	5	34	16	4,3	30,7	1	3	8	3

Identificação da Instância				Solução do Método "PMC"										
Tempo Setup	Nível de Demanda	Mix Demanda	Tempo Operação	Custo Médio (\$)	Sobrecustos/PMC Flex (%)	Sobrecustos/Ótimo PF (%)	Sobrecustos/ Ótimo (%)	Passo (min)	Setup (%)	Folga (%)	Tamanho de Lote		Ponto de Pedido	
											Prod. 1	Prod. 2	Prod. 1	Prod. 2
Rápido	Alto	AC	Crescente	11,66	-0,2	11	30	16	4,3	30,7	3	1	6	3
Médio	Alto	AC	Iguais	15,55	0,1	16	65	44	6,5	28,5	4	4	9	3
Médio	Alto	AC	Decrescente	15,43	0,1	4	63	49	5,8	29,2	3	9	9	2
Médio	Alto	AC	Crescente	16,35	0,1	17	60	34	8,7	16,3	6	2	10	3
Lento	Alto	AC	Iguais	24,05	-0,1	19	105	96	13,0	22,0	8	8	15	4
Lento	Alto	AC	Decrescente	24,94	0,0	7	127	106	11,6	23,4	6	18	13	4
Lento	Alto	AC	Crescente	26,56	0,0	37	88	76	17,3	17,7	12	4	18	6