

**EDUARDO DE OLIVEIRA PACHECO**

**USANDO DINÂMICA DE SISTEMAS PARA ANÁLISE DE  
ALGORITMOS DE REPOSIÇÃO DE ESTOQUE EM AMBIENTES  
PRODUTIVOS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E  
SISTEMAS DA PONTIFÍCIA  
UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ**

**CURITIBA**

**2004**

**EDUARDO DE OLIVEIRA PACHECO**

**USANDO DINÂMICA DE SISTEMAS PARA ANÁLISE DE  
ALGORITMOS DE REPOSIÇÃO DE ESTOQUE EM  
AMBIENTES PRODUTIVOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Pontifícia Universidade Católica do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas.

*Área de Concentração: Identificação e Controle de Processos*

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Henrique da Costa  
Oliveira

**CURITIBA**

2004

## TERMO DE APROVAÇÃO

**EDUARDO DE OLIVEIRA PACHECO**

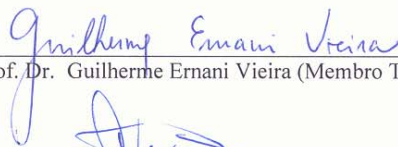
### **USANDO DINÂMICA DE SISTEMAS PARA ANÁLISE DE ALGORITMOS DE REPOSIÇÃO DE ESTOQUE EM AMBIENTES PRODUTIVOS**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, do Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, pela seguinte banca examinadora:



Presidente da Banca

Prof. Dr. Gustavo Henrique da Costa Oliveira (Orientador)



Prof. Dr. Guilherme Ernani Vieira (Membro Titular)



Prof. Dr. Samuel Vieira Conceição (Membro Titular)

Curitiba, 13 de setembro de 2004.



*Dedico a minha esposa Jaqueline e a  
meus filhos Vinícius, Otavio e Daniel pela  
paciência, carinho e confiança.*

## **Agradecimentos**

Ao meu orientador prof. Dr. Gustavo Henrique da Costa Oliveira pela paciência, dedicação, amizade, confiança depositada e por tudo que com ele, pude aprender.

À Coordenadoria para Aperfeiçoamento do Ensino Superior (CAPES) e a PUC-PR pelo apoio concedido, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos meus pais, Aramis e Nilza pela educação, carinho e formação proporcionada.

Aos meus colegas do mestrado PPGEPS - PUC-PR.

Aos professores que participaram da comissão examinadora. E também por dar oportunidade a uma nova forma de ver os fatos.

Aos Srs. Miguel Letenski Neto e Everaldo José Bertão do Grupo Boticário, pelas informações proporcionadas que de algum modo contribuíram neste trabalho.

A todos os professores e funcionários do Departamento pelos ensinamentos e ajuda.

## Resumo

Uma cadeia de suprimentos pode ser definida como o caminho percorrido por um componente ou produto, iniciando, nos fornecedores de matérias-primas, passando pela distribuição no ambiente produtivo, manufatura, montagem e terminando com a distribuição do produto aos centros consumidores. Durante este trajeto, existem estoques de toda natureza que devem ser gerenciados de forma adequada. A gerência de estoques é um elemento fundamental neste trajeto e possui a função de garantir o fluxo de produção ao longo de toda a cadeia de suprimentos. É também um fator relevante na redução dos custos logísticos. A busca é pelo melhor compromisso entre aspectos, muitas vezes conflitantes, como: redução de custo, atendimento ao cliente e manutenção do fluxo de produção.

Por outro lado, desde a década de 60, a metodologia conhecida como *System Dynamics* (SD) vem se destacando como ferramenta para análise da dinâmica de sistemas produtivos. Esta abordagem pode ser definida como a aplicação de conceitos de realimentação em sistemas produtivos e envolve desde a parte de análise estrutural até a definição de políticas de tomada de decisão em um determinado ambiente produtivo. Tem como base a obtenção de modelos para capturar a estrutura organizacional do ambiente produtivo e a análise de seu comportamento dinâmico ao longo do tempo.

Este trabalho tem por objetivo a análise da dinâmica de ambientes produtivos do tipo *Inventory and Order Based Production Control System* (IOBPCS), monocomponente, com um ou mais níveis produtivos e com demanda futura prevista incerta podendo, eventualmente, apresentar picos de mercado. Neste contexto, propõe-se metodologias para reposição ótima de componentes em estoque baseadas em conceitos de sistemas de controle em malha fechada.

Para tanto, faz-se inicialmente uma contextualização do trabalho no ambiente produtivo, na gestão clássica de estoques e na metodologia SD. Em seguida, apresenta-se um modelo de sistemas de estoque em ambiente produtivo monocomponente que será utilizado como base para a proposta e análise dos algoritmos de reposição de estoque. Os algoritmos analisados são o controle ótimo por variância mínima, controle ótimo com horizonte rolante e otimização via programação linear. Resultados de simulação atestam a aplicabilidade dos métodos de controle no contexto de ambientes produtivos.

### **Palavras-Chaves:**

Dinâmica de Sistemas; Gestão de Estoques; Controle Ótimo; Variância Mínima e Horizonte Rolante.

## **Abstract**

A supply chain can be defined as a path roamed about by a component or a product, beginning with the raw materials suppliers, continuing with the distribution in the productive environment, manufacturing, assembly and coming to an end with the product distribution to the consuming centers. During this course, there are stocks of all natures, which must be managed in an adequate manner. The stock management is a vital element within this path and performs the task of assuring the production flow throughout the supply chain. It is also a relevant factor in the logistic costs' decrease. The search addresses the best balance among aspects, many times conflicting, like: cost decrease, client satisfaction and maintenance of the production flow.

On the other hand, since the sixties, the methodology known as Systems Dynamics (SD) stands out as tool for the analysis of the productive systems dynamics. This approach can be defined as the application of feedback concepts in productive systems and involves from the structural analysis part until the definition of decision-making policies, in a specific productive environment. It is based on the obtainment of models in order to capture the organizational structure of the productive environment and the analysis of its dynamic behavior throughout the time.

This work aims the analysis of the productive environment dynamics typical of Inventory and Order Based Production Control System (IOBPCS), mono-component, with one or more productive levels and with uncertain future demand forecast, subject, eventually, to market peaks. Within this context, one proposes methodologies for the optimal replacement of components in stock based upon concepts of the control systems in closed-loop.

In order to achieve its goal, one makes, initially, a contextualization of the work in the productive environment, in the stocks classic management and in the SD methodology. Furthermore, one presents a model of stock systems in a mono-component productive environment, which will be used as ground for the proposal and the analysis of the stock replacement algorithms. The analyzed algorithms are the optimal control by minimum variance, the optimal control with a receding horizon and the optimization via linear programming. Simulation results certificate the applicability of the control methods in a context of the productive environments.

Keywords:

System Dynamics; Inventory Management; Optimal Control; Minimum Variance and Receding Horizon Approach.

## Sumário

|        |                                                                                           |    |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.     |                                                                                           | 1  |
|        | <b>Introdução</b>                                                                         |    |
| 1.1.   | Motivação                                                                                 | 1  |
| 1.2.   | Abordagens Baseadas em Análise Dinâmica para Gestão de Estoques em Cadeias de Suprimentos | 3  |
| 1.3.   | Metodologia de Pesquisa                                                                   | 7  |
| 1.3.1. | Trabalho de Pesquisa                                                                      | 9  |
| 1.4.   | Proposta e Organização do Trabalho                                                        | 10 |
| 2.     |                                                                                           | 12 |
|        | <b>Gestão de Estoques</b>                                                                 |    |
| 2.1.   | Conceitos de Estoque no Ambiente Produtivo                                                | 13 |
| 2.2.   | Conceitos de Estoque na Logística                                                         | 15 |
| 2.3.   | Objetivos de Estoque                                                                      | 18 |
| 2.4.   | Tipos de Estoque                                                                          | 20 |
| 2.5.   | Planejamento e Controle de Estoques                                                       | 21 |
| 2.5.1. | Custo de Estoque                                                                          | 21 |
| 2.5.2. | Curva ABC                                                                                 | 23 |
| 2.5.3. | Demanda Independente e Demanda Dependente                                                 | 24 |
| 2.5.4. | Gráfico Dente de Serra                                                                    | 26 |
| 2.5.5. | Lote Econômico                                                                            | 29 |
| 2.5.6. | Sistema de Reposição Contínua e Reposição Periódica                                       | 31 |
| 2.5.7. | Planejamento das Necessidades Materiais (MRP)                                             | 33 |
| 2.5.8. | Determinação do Estoque de Segurança                                                      | 35 |
| 2.5.9. | Parâmetros não Clássicos na Gestão de Estoques                                            | 36 |
| 3.     |                                                                                           | 38 |
|        | <b>Dinâmica de Sistemas em Ambiente Produtivo</b>                                         |    |
| 3.1.   | Abordagem Dinâmica Industrial / Dinâmica de Sistemas                                      | 41 |
| 3.1.1. | Modelagem do Ambiente Produtivo IOBPCS (Enfoque Tempo Contínuo)                           | 43 |
| 3.2.   | Dinâmica de Sistemas em Cadeias de Suprimentos                                            | 51 |
| 3.2.1. | Simulação do efeito chicote ao longo de uma cadeia de suprimentos de três níveis.         | 54 |
| 3.3.   | Modelo Proposto em Ambiente Produtivo IOBPCS (Enfoque Tempo Discreto)                     | 57 |
| 3.3.1. | Equação de Previsão de um Passo                                                           | 60 |
| 3.3.2. | Equação de Previsão para $j$ Passos                                                       | 62 |
| 4.     |                                                                                           |    |
|        | <b>Técnicas de Reposição Ótima de Componentes em Estoques</b>                             |    |
| 4.1.   | Algoritmo de Reposição com Compensação <i>Feedforward</i>                                 | 66 |
| 4.1.1. | Exemplo                                                                                   | 68 |
| 4.2.   | Algoritmo de Reposição Baseado em Programação Linear                                      | 69 |
| 4.2.1. | Exemplo                                                                                   | 74 |
| 4.3.   | Algoritmo de Reposição Ótima com Variância Mínima                                         | 77 |
| 4.3.1. | Exemplo                                                                                   | 80 |
| 4.3.2. | Exemplo                                                                                   | 82 |
| 4.4.   | Algoritmo de Reposição Ótima com Horizonte Rolante                                        | 87 |
| 4.4.1. | Exemplo                                                                                   | 90 |



|        |                                                                                                                                                                                                 |     |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.4.2. | Análise de Desempenho dos Algoritmos de Reposição Ótima em Estoque                                                                                                                              | 96  |
| 5.     | <b>Conclusões e Trabalhos Futuros</b>                                                                                                                                                           | 99  |
| 5.1.   | Trabalhos Futuros                                                                                                                                                                               | 102 |
| 6.     | <b>Referências Bibliográficas</b>                                                                                                                                                               | 103 |
| 7.     | <b>Anexo A</b><br>Artigo “Análise de cadeias de suprimentos e do efeito chicote usando sistemas dinâmicos”. <i>Anais do XXIV - Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP)</i> , 2004. | 109 |

## Lista de figuras

|             |                                                                                                                                              |    |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1  | Atividades da gestão de estoques                                                                                                             | 13 |
| Figura 2.2  | O estoque serve para compensar a diferença entre ritmo e demanda                                                                             | 14 |
| Figura 2.3  | O objetivo da logística é o atendimento ao cliente                                                                                           | 16 |
| Figura 2.4  | Gráfico da curva <i>ABC</i>                                                                                                                  | 24 |
| Figura 2.5  | Demanda independente e Demanda dependente                                                                                                    | 25 |
| Figura 2.6  | Gráfico dente de serra                                                                                                                       | 26 |
| Figura 2.7  | Gráfico dente de serra com ruptura de estoque                                                                                                | 27 |
| Figura 2.8  | Gráfico dente de serra com estoque mínimo ou de segurança                                                                                    | 28 |
| Figura 2.9  | Gráfico dente de serra com tempo de reposição ( $T^*$ ) e ponto de pedido ( $P_p$ ) para a reposição de componentes em estoque               | 29 |
| Figura 2.10 | Gráfico da composição dos custos para manter o estoque                                                                                       | 30 |
| Figura 2.11 | Gráfico de reposição contínua                                                                                                                | 31 |
| Figura 2.12 | Gráfico de reposição periódica                                                                                                               | 32 |
| Figura 2.13 | Árvore da estrutura do produto                                                                                                               | 34 |
| Figura 2.14 | Operação do MRP com as entradas e saídas do sistema                                                                                          | 35 |
| Figura 3.1  | A estrutura e o diagrama de causa e efeito do fluxo produtivo de um nível IOBPCS                                                             | 43 |
| Figura 3.2  | Diagrama do processo produtivo de um nível IOBPCS                                                                                            | 47 |
| Figura 3.3  | Diagrama de blocos no MATLAB/SIMULINK                                                                                                        | 47 |
| Figura 3.4  | Comportamento do processo produtivo de um nível IOBPCS                                                                                       | 49 |
| Figura 3.5  | Comportamento do processo produtivo de um nível IOBPCS com redução do efeito chicote ( <i>bullwhip</i> )                                     | 50 |
| Figura 3.6  | Efeito chicote na cadeia de suprimentos com três níveis produtivos                                                                           | 51 |
| Figura 3.7  | Cadeia de suprimentos com três níveis produtivos                                                                                             | 54 |
| Figura 3.8  | Demanda varejista, do distribuidor e de fabricação                                                                                           | 56 |
| Figura 3.9  | Comportamento das posições dos estoques                                                                                                      | 56 |
| Figura 3.10 | Redução da amplificação de demanda                                                                                                           | 57 |
| Figura 3.11 | Modelagem do ambiente produtivo                                                                                                              | 58 |
| Figura 3.12 | Modelagem do ambiente produtivo com atraso                                                                                                   | 59 |
| Figura 3.13 | A estrutura e o diagrama de causa e efeito do ambiente produtivo IOBPCS com erro de previsão                                                 | 60 |
| Figura 4.1  | Diagrama de blocos da gestão de estoque                                                                                                      | 69 |
| Figura 4.2  | Comportamento da demanda real, da demanda prevista e do erro de previsão                                                                     | 70 |
| Figura 4.3  | Comportamento do sistema produtivo para a reposição com compensação <i>feedforward</i> sem restrições e <i>lead time</i> produtivo de um mês | 71 |
| Figura 4.4  | Comportamento do sistema produtivo para a reposição com compensação <i>feedforward</i> com restrições e <i>lead time</i> produtivo de um mês | 73 |
| Figura 4.5  | Comportamento do sistema produtivo para reposição por <i>PL</i> sem restrições e com <i>lead time</i> produtivo de um mês                    | 78 |
| Figura 4.6  | Comportamento do sistema produtivo para reposição por <i>PL</i> com <i>lead time</i> produtivo de um mês e restrições produtivas             |    |

|             |                                                                                                                                               |    |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.7  | Diagrama de blocos do sistema de controle de estoque sem restrições produtivas                                                                | 79 |
| Figura 4.8  | Comportamento do sistema produtivo para reposição ótima por VM com <i>lead time</i> produtivo de um mês e sem restrições produtivas           | 81 |
| Figura 4.9  | Comportamento do sistema produtivo proposto por (Vassian, 1954)                                                                               | 82 |
| Figura 4.10 | Sistema de controle de estoque composto de duas estratégias                                                                                   | 83 |
| Figura 4.11 | Diagrama de blocos do sistema de reposição de componentes em estoque composto de duas estratégias para prevenção do pico de demanda           | 86 |
| Figura 4.12 | Comportamento do sistema produtivo para reposição ótima por VM com <i>lead time</i> produtivo de um mês e com restrições produtivas           | 86 |
| Figura 4.13 | Comportamento do sistema produtivo utilizando a estratégia de prevenção de falta de componentes                                               | 87 |
| Figura 4.14 | Comportamento do sistema produtivo para reposição ótima com horizonte rolante, <i>lead time</i> produtivo de um mês sem restrições produtivas | 88 |
| Figura 4.15 | Comportamento do sistema produtivo para reposição ótima com horizonte rolante, <i>lead time</i> produtivo de um mês com restrições produtivas | 93 |
|             |                                                                                                                                               | 95 |

## Lista de tabelas

|             |                                                                                                                                                           |    |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 2.1  | Classificação dos estoques                                                                                                                                | 21 |
| Tabela 3.1  | Relação dos níveis de serviço e fator de segurança                                                                                                        | 48 |
| Tabela 4.1  | Custos do sistema com reposição <i>feedforward</i> sem restrições produtivas                                                                              | 72 |
| Tabela 4.2  | Custos do sistema com reposição <i>feedforward</i> com restrições produtivas                                                                              | 73 |
| Tabela 4.3  | Custos do sistema com reposição por <i>PL</i> sem restrições produtiva                                                                                    | 78 |
| Tabela 4.4  | Custos do sistema com reposição por <i>PL</i> e com restrições produtivas                                                                                 | 79 |
| Tabela 4.5  | Custos do sistema com reposição ótima por <i>VM</i> sem restrições produtivas                                                                             | 83 |
| Tabela 4.6  | Custos do sistema com reposição proposta em (Vassian, 1954) sem restrições produtivas                                                                     | 84 |
| Tabela 4.7  | Custos do sistema com reposição ótima por <i>VM</i> com restrições produtivas                                                                             | 88 |
| Tabela 4.8  | Custos do sistema com reposição ótima por <i>VM</i> quando é utilizada a estratégia de prevenção de falta de componentes                                  | 89 |
| Tabela 4.9  | Custos do sistema com reposição ótima por <i>VM</i> quando é utilizada a estratégia de prevenção de falta de componentes e redução do objetivo de estoque | 89 |
| Tabela 4.10 | Custos do sistema para reposição ótima com horizonte rolante, sem restrições produtivas                                                                   | 94 |
| Tabela 4.11 | Custos do sistema para reposição ótima com horizonte rolante, com restrições produtivas                                                                   | 95 |
| Tabela 4.12 | Análise comparativa do desempenho dos algoritmos de reposição em estoque quando não há restrições produtivas                                              | 96 |
| Tabela 4.13 | Análise comparativa do desempenho dos algoritmos de reposição em estoque quando há restrições produtivas                                                  | 97 |

## Nomenclatura

### Dinâmica de Sistemas

|          |                                                                                                  |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| APIOBPCS | Automatic Pipeline IOBPCS                                                                        |
| DYNAMO   | DYNAMIC Models developed at MIT/USA                                                              |
| DYSMAP   | A industrial dynamics language simulation developed at University of Bradford/UK                 |
| ID       | Industrial Dynamics                                                                              |
| IOBPCS   | Inventory and Order Based Production Control System                                              |
| MATLAB   | MATrix LABoratory                                                                                |
| SD       | System Dynamics                                                                                  |
| SIMPLE   | Simulation of Industrial Management Problems with Lots of Equations                              |
| STELLA   | Structural Thinking Experimental Laboratory with Animation                                       |
| VENSIM   | A industrial dynamics language simulation developed by Ventana Systems at Harvard University/USA |
| VMI      | Vendor Managed Inventory                                                                         |

Assembly To Order

#### **ATO**

|     |                   |
|-----|-------------------|
| ETO | Engineer To Order |
| MTO | Make To Order     |
| MTS | Make To Stock     |
| PTO | Purchase To Order |

Planejamento das Necessidades Materiais

#### **MRP**

|     |                                |
|-----|--------------------------------|
| PMP | Plano Mestre de Produção       |
| SHE | Sistema Hierárquico de Estoque |
| PL  | Programação Linear             |
| VM  | Variância Mínima               |

## Controle

### Constantes

|            |                                                                    |
|------------|--------------------------------------------------------------------|
| $A, B, C$  | Componentes de um sistema de armazenagem na concepção da curva ABC |
| $\alpha$   | <b>Fator de ponderação para o alisamento exponencial simples</b>   |
| $d$        | <b>Lead time produtivo</b>                                         |
| $\Delta t$ | Tempo amostrado ou <i>sample time</i>                              |
| $H$        | Matriz dos elementos do polinômio                                  |
| $k$        | Intervalos de tempo discreto                                       |
| $N$        | Período produtivo                                                  |
| $n_d$      | Fator de segurança baseado no nível de serviço                     |

|           |                                                |
|-----------|------------------------------------------------|
| $N_u$     | Horizonte de previsão para o controle          |
| $N_y$     | Horizonte de previsão                          |
| $P_p$     | Ponto de pedido de reposição                   |
| $Q$       | Quantidade reposta em estoque                  |
| $Q^*$     | Lote econômico                                 |
| $Q_o$     | Estoque mínimo ou de segurança                 |
| $Q1^*$    | Posição de estoque para a demanda não atendida |
| $Q_{max}$ | Valor máximo do estoque                        |
| $Q_{res}$ | Valor para o pedido de reposição em estoque    |
| $\sigma$  | Desvio padrão da demanda                       |
| $T^*$     | Tempo de reposição de componentes em estoque   |
| $T1^*$    | Tempo de ruptura de estoque                    |
| $u_{max}$ | Limite superior de manufatura                  |
| $u_{min}$ | Limite inferior de manufatura                  |
| $y_{max}$ | Limite superior para a posição de estoque      |
| $y_{min}$ | Limite inferior para a posição de estoque      |
| $Z$       | Transformada Z                                 |

|            |                                          |
|------------|------------------------------------------|
| <b>Cfc</b> | Custo de fabricação de componentes       |
| $C_{fe}$   | Custo de falta de componentes em estoque |
| $C_t$      | Custo total do sistema produtivo         |
|            | Custo para manter componentes em estoque |

|            |                                                |
|------------|------------------------------------------------|
| <b>Cmc</b> | Parâmetro de controle do nível do distribuidor |
|------------|------------------------------------------------|

|           |                                              |
|-----------|----------------------------------------------|
| <b>Kd</b> | Parâmetro de controle do nível de fabricação |
| $K_f$     | Parâmetro de controle do nível varejista     |
| $K_v$     | Estoque de segurança                         |
| $ss$      | <i>Lead time</i> do nível do distribuidor    |
| $td$      | <i>Lead time</i> do nível de fabricação      |
| $tf$      | <i>Lead time</i> do nível varejista          |
| $tv$      | Constante de tempo do nível do distribuidor  |
| $T_d$     | Constante de tempo do nível de fabricação    |
| $T_f$     | Constante de tempo do nível varejista        |
| $T_v$     | Objetivo de estoque do nível do distribuidor |
| $wd$      | Objetivo de estoque do nível de fabricação   |
| $wf$      | Objetivo de estoque do nível varejista       |
| $wv$      |                                              |

## Sinais

|                          |                                                                                     |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| $c_p(k)$                 | Capacidade produtiva no tempo $k$                                                   |
| $\hat{d}(k), \hat{d}(s)$ | Demanda prevista no tempo $k, t$                                                    |
| $d(k), d(s)$             | Demanda real no tempo $k, t$                                                        |
| $e(k)$                   | Erro de previsão entre a demanda real e a demanda prevista no instante de tempo $k$ |
| $p(k), p(s)$             | Reposição no estoque no tempo $k, t$                                                |
| $P_d(k)$                 | Taxa de correção da referência de estoque                                           |
| $q^{-1}$                 | Operador atraso                                                                     |
| $q$                      | Operador avanço                                                                     |
| $T_x(k)$                 | Taxa de crescimento                                                                 |
| $u(k), u(s)$             | Pedido de reposição no tempo $k, t$                                                 |
| $y(k), y(s)$             | Posição de estoque no intervalo de tempo $k, t$                                     |

|                    |                                                                                     |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| $\hat{y}(k)$       | Valor previsto para a posição de estoque no intervalo de tempo $k$                  |
| $\hat{y}_l(k+j k)$ | Previsão para a posição de estoque, dada a informação disponível até o instante $k$ |
| $w(k), w(s)$       | Objetivo de estoque no tempo $k, t$                                                 |
| $\zeta(k)$         | Variável aleatória relacionada ao erro de previsão                                  |

# 1

## Introdução

### 1.1.

#### Motivação

Os primeiros sistemas de armazenagem surgiram com a necessidade da humanidade de garantir a sobrevivência em épocas de escassez. Em um primeiro momento, o objetivo era simplesmente estocar e consumir. Depois, além da questão da armazenagem propriamente dita, outros aspectos como perdas no sistema (devido à deterioração ou roubo) e garantia de abastecimento foram adicionados ao problema. Deste modo, os primeiros passos para o gerenciamento de estoques estavam sendo dados. Com o crescimento populacional das cidades e o desenvolvimento da manufatura após o advento da revolução industrial, sistemas de estoques cada vez maiores se tornaram necessários para garantir o abastecimento e sua gestão tomou um impulso de grandes proporções.

Atualmente, a gestão de estoques está direcionada para o conceito de cadeia de suprimentos. Cadeia de suprimentos pode ser definida como o caminho percorrido por um componente desde os fornecedores de matéria-prima, passando pela distribuição, manufatura, montagem do componente e, finalmente, distribuição do produto final aos centros consumidores (Ballou, 2001). No contexto de cadeia de suprimentos, a gestão de estoques é um problema de grande importância na obtenção de vantagem competitiva entre as empresas (Jones & Riley, 1985). Existem sistemas de estoques nos diferentes níveis da cadeia de suprimentos que devem ser gerenciados de forma adequada durante o trajeto produtivo e, por isso, a importância cada vez maior dada a eles. Por ser um elemento fundamental neste ambiente, os estoques não são considerados somente uma fonte de investimentos ou despesas, mas possuem também a função de garantir o fluxo de produção ao longo da cadeia produtiva (Ballou, 2001) (Brandolese *et al.*, 2001), conseqüentemente, a produtividade da empresa. Pode-se, portanto, inserir a gestão adequada de estoques como um importante fator para a redução dos custos ao longo de toda a cadeia de suprimentos (Bowersox & Closs, 2001).

Deste modo, muitos esforços e investimentos em pesquisas e tecnologia têm sido feitos na procura do melhor compromisso que satisfaça as necessidades de: redução de custos, atendimento ao cliente e fluxo de produção. Este compromisso deve ser buscado mesmo na presença de



incertezas no ambiente produtivo. Fontes de incertezas estão relacionadas com ocorrências não previstas dentro do sistema que, de algum modo, causam alterações no desempenho do mesmo. Exemplos são: variações nos tempos de entrega de matérias-primas e/ou de produção devido a fatores internos ou externos ao ambiente produtivo, erros na previsão da demanda, entre outros. Assim, reduzindo-se ao mínimo possível a quantidade de componentes armazenados e, ao mesmo tempo, garantindo o fornecimento para o nível posterior da cadeia produtiva, melhora-se o fluxo de produção e aumenta-se a competitividade da empresa no mercado consumidor.

Problemas que envolvem a gestão de estoques na cadeia de suprimentos têm sido abordados por empresas de diversos ramos e pelo meio acadêmico nos últimos anos. Técnicas de controle de processos (Astrom & Wittenmark, 1997) vêm sendo utilizadas neste contexto, por exemplo, Controle Nebuloso (*Fuzzy*) em (Bojadziev & Bojadziev, 1997) (Buckley *et al.*, 2001), Controle Ótimo em (Khmelnitsky & Gerchak, 2002), Controle com Restrições em (Blanchini *et al.*, 2000) (Blanchini & Pesenti, 2001) (Blanchini *et al.*, 2001).

Uma abordagem para o problema de modelagem, gerenciamento e controle de estoques em cadeias de suprimentos é denominada de Dinâmica Industrial (*ID - Industrial Dynamics*) ou Dinâmica de Sistemas (*SD - System Dynamics*) (Forrester, 1961) (Towill, 1982) (Towill & Del Vecchio, 1994) (Khator & Deshmukh, 2002). Esta abordagem está baseada na análise do comportamento dinâmico dos estoques (número de componentes armazenados em estoque) ao longo dos vários níveis da cadeia de suprimentos frente a sinais de entrada e/ou de perturbações e/ou incertezas presentes no sistema. Nesta abordagem, a tomada de decisão é realizada com o propósito de influenciar uma variável controlada do ambiente, por exemplo, a quantidade de componentes em estoque, cuja reposição ao estímulo irá influenciar as decisões futuras em um ciclo conhecido como sistema em malha fechada ou sistema com realimentação. Desta forma, a abordagem *ID/SD* pode ser definida como a aplicação de conceitos de realimentação em sistemas produtivos e envolve desde a parte de análise estrutural até a definição de políticas de tomada de decisão em um determinado ambiente produtivo. Isto se deve ao fato de que o processo de decisão é diretamente afetado pelas decisões tomadas anteriormente, gerando uma dinâmica que não pode ser representada por sistema em malha aberta. Conceitos relacionados com *ID/SD* podem ser aplicados em diferentes aspectos do sistema produtivo, desde a análise da influência de flutuações na demanda (Towill, 1982) por exemplo, a influência de propaganda no ambiente produtivo

(Forrester, 1959). Outros campos de aplicação relacionados com análise de modelos dinâmicos são: modelos de política pública e urbana (Alfeld & Graham, 1976), modelos de gerenciamento (Coyle, 1977) (Roberts, 1978) (Morecroft, 1988), modelos econômicos (Forrester, 1989), modelos para comércio de drogas ilegais (Gardiner & Shreckengost, 1987), entre outros.

A seguir neste Capítulo, um resumo com os principais trabalhos relacionados com *ID/SD* é apresentado. A sequência é dada descrevendo a metodologia deste trabalho de pesquisa e o Capítulo termina com a proposta e organização deste trabalho.

## 1.2.

### **Abordagens Baseadas em Análise Dinâmica para Gestão de Estoques em Cadeias de Suprimentos**

Desde a década de 50, trabalhos relacionados com a metodologia *ID/SD* vêm sendo abordados na literatura. Esta seção descreve alguns destes em aspectos como: *i)* o projeto de algoritmos de controle de estoque; *ii)* a análise do comportamento de ambiente produtivos nos casos de demanda contínua e instantânea; *iii)* a análise do comportamento dinâmico de sistema de armazenagem com controle de produção baseado em demanda (*IOBPCS – Inventory and Order Based Production Control System*) e *APIOBPCS (Automatic Pipeline IOBPCS)*, mononível ou multinível; *iv)* o fenômeno de amplificação da demanda em cadeia de suprimentos (o efeito chicote ou *bullwhip effect*); *v)* a utilização da Transformada de Laplace e da Transformada Z; *vi)* a aplicação em sistemas de distribuição e produção fortemente acoplados (*close-coupled production distribution systems*) e cadeias de suprimentos com VMI (*Vendor Managed Inventory*); *vii)* a análise e projeto de estoques de segurança e estratégico na presença de fatores como incertezas ou erros na previsão da demanda, incertezas nos tempos de produção e limites de capacidade produtivos; *viii)* o ambiente de simulação computacional.

Um dos primeiros trabalhos que tratam do problema de gestão de estoques através da análise do comportamento dinâmico do sistema de armazenagem é descrito em (Vassian, 1954). Neste trabalho, a análise e projeto de um algoritmo para controle de estoque, isto é, reposição de componentes em um armazém, é feita sob o ponto de vista de projeto de controle para servomecanismos. A teoria da dinâmica de sistemas em tempo discreto é então utilizada devido à característica essencialmente discreta das variáveis envolvidas no ambiente produtivo analisado, isto é, pedidos de produção, posição de

componentes em estoque, demanda, etc. O ambiente produtivo e de armazenagem é modelado através de equações a diferenças e, baseado na hipótese que o sistema muda de estado em intervalos fixos de tempo (coleta de dados e reposição de componentes periódica), uma estratégia de controle de estoque é proposta. Conceitos similares aos apresentados em (Vassian, 1954), porém baseados em sistemas em tempo contínuo, são descritos em (Simon, 1952).

Aspectos de controle de estoque para demanda contínua e instantânea são também abordados em (Eilon, 1961). Neste trabalho, descreve-se o comportamento do ambiente produtivo frente a incertezas em relação à demanda futura de componentes. Assume-se um intervalo de tempo ao final do qual o estoque volta ao nível desejado e estuda-se o comportamento do sistema durante este intervalo sob o ponto de vista de custo de armazenagem e de não fornecimento de componentes ao consumidor. Não há projeto de um sistema de controle para reposição de componentes, somente o comportamento dinâmico é analisado.

O termo Dinâmica Industrial (*Industrial Dynamics*) foi proposto por J. W. Forrester em (Forrester, 1961) e está relacionado com o objetivo de abordar problemas de sistemas de operações usando métodos matemáticos apropriados para análise de modelos dinâmicos. J. W. Forrester define o termo como sendo o estudo das características da atividade industrial na presença de fluxo de informações (sinais) com realimentação e a demonstração de como a estrutura organizacional e as políticas interagem para influenciar o sucesso da empresa (Ansoff & Slevin, 1968). O termo engloba também questões relativas à interação entre fluxo de informação, dinheiro, ordens de produção, materiais, pessoas e equipamentos em uma empresa, na indústria ou na economia de um modo geral. Esta idéia pode ser generalizada como sendo a ciência de sistemas sociais com realimentação. Assim, deste os primeiros trabalhos, a ligação entre *ID* e a teoria de sistemas com realimentação é ressaltada (Forrester, 1968) assim como a distinção entre *ID* e técnicas de simulação, sendo esta última considerada uma metodologia para análise de resultados. Portanto, uma vez que a abordagem *ID* engloba a simulação de equações que modelam o ambiente produtivo, alguns pacotes de simulação foram construídos para este fim. Pode-se destacar, por exemplo, o SIMPLE (*Simulation of Industrial Management Problems with Lots of Equations*), o DYNAMO (*Dynamic Models*), desenvolvido no MIT/USA, o DYSMAP de Bradford/UK, o STELLA (*Structural Thinking Experimental Laboratory With Animation*) e o VENSIM de Harvard/MA/USA. Estes pacotes

representam os subsistemas (e suas interconexões) presentes na modelagem de ambientes produtivos e possuem a característica de utilizarem o jargão gerencial. O trabalho de (Richmond, 1985) descreve uma evolução histórica destes pacotes de simulação com jargão gerencial mas, por outro lado, outros pacotes genéricos de simulação da dinâmica de sistemas podem também ser utilizados, como por exemplo, o MATLAB/SIMULINK.

Mais recentemente, isto é, após a década de 70, a abordagem *ID* passou a ser conhecida pelo nome Dinâmica do Gerenciamento (*Management Dynamics*), como por exemplo, em (Coyle, 1977) ou através do termo genérico *System Dynamics*, como por exemplo, em (Towill, 1982) (Towill & Del Vecchio, 1994) (Kathor & Deshmukh, 2002). Em todas as denominações está presente o objetivo comum de estudar e simular o comportamento das equações que descrevem o comportamento dinâmico do ambiente produtivo, ou seja, a análise da dinâmica do ambiente produtivo.

Uma vez que o termo *System Dynamics* pode ser aplicado deste a um pequeno motor elétrico até a toda rede elétrica de um país, passando por robôs, transformadores de energia elétrica, colunas de destilação na indústria petroquímica, caldeiras na indústria siderúrgica, etc. Por isso, neste trabalho, a menos que se especifique o contrário, o termo *System Dynamics* ou Dinâmica de Sistemas (*SD*) com letras iniciais maiúsculas está relacionado com a denominação da abordagem discutida nesta seção, e *system dynamics* ou dinâmica de sistemas com letras iniciais minúsculas está relacionado com um modelo ou operador matemático que descreve a dinâmica de um sistema qualquer, por exemplo, o motor elétrico ou um sistema de armazenagem presente em um ambiente produtivo.

Ambientes produtivos IOBPCS também podem ser analisados sob a ótica de *System Dynamics* como, por exemplo, em (Towill, 1982). Este ambiente produtivo é definido como sendo um sistema onde a ordem de produção para o próximo período é função da demanda prevista e do déficit ou superávit (em relação a um valor de referência) de componentes no estoque. O estágio de produção é considerado um sistema que determina um deslocamento no tempo em relação à ordem de produção (duração do processo de produção ou *lead time*). Este estágio de produção pode ser também relacionado a manufatura, montagem, distribuição, etc. Em (Towill, 1982), dois aspectos do comportamento dinâmico de IOBPCS são analisados. A regulação da posição de estoque em relação a mudanças bruscas, porém determinísticas, na demanda (diminuindo riscos de falta de produtos em estoque) e a sensibilidade do sistema a flutuações

aleatórias na demanda. Em (Edghill *et al.*, 1988), o caso de ambientes produtivos formados por *close-coupled production distribution system* é abordado seguindo os mesmos conceitos.

A linha de trabalho descrita no parágrafo anterior é estendida em (Towill & Del Vecchio, 1994) (Towill, 1996) (Disney *et al.*, 2000) e (Disney & Towill, 2002) para a análise da dinâmica de cadeias de suprimentos. O trabalho (Towill & Del Vecchio, 1994) contém, em particular, a análise do fenômeno de amplificação da demanda ao longo da cadeia de suprimentos, fenômeno este conhecido como “lei da dinâmica industrial” (Burbidge, 1984) ou efeito *bullwhip*. Este problema é então analisado sob o ponto de vista de sistemas de controle em tempo contínuo (i.e., baseado em Transformada de Laplace) e um exemplo de cadeia de suprimentos com três níveis produtivos ilustra a abordagem apresentada. O efeito *bullwhip* é também tratado em (Khator & Desmukh, 2002), trabalho este que contém a análise de uma cadeia de suprimentos através de *SD* utilizando o software de simulação STELLA. Mostra-se a validade desta abordagem para a redução das amplificações entre os estágios.

Em (Disney *et al.*, 2000) e (Disney & Towill, 2002), todo o ambiente produtivo é modelado usando diagramas de blocos com funções de transferência em tempo discreto (i.e., baseado em Transformada Z). No primeiro trabalho citado, um único nível produtivo, então denominado de APIOBPCS (*Automatic Pipeline IOBPCS*), é analisado. Algoritmos Genéticos (Man *et al.*, 1996) são então utilizados para otimizar o desempenho do sistema no que diz respeito à redução do efeito *bullwhip*. No segundo trabalho, isto é, em (Disney & Towill, 2002), o caso de cadeias de suprimentos com VMI é abordado. As vantagens da utilização de transformadas e de diagramas de blocos no contexto de cadeias de suprimentos são também destacadas, dentre elas, a existência de uma metodologia de análise já consolidada na literatura, por exemplo, apresentada em (Franklin *et al.*, 1994) e (Franklin *et al.*, 1997).

A análise e a simulação de sistemas produtivos multiníveis e multiprodutos usando a teoria de sistemas de controle em tempo discreto são abordadas em (Poppellwell & Bonney, 1987). Exemplos de simulação ilustram o comportamento de um sistema de Planejamento das Necessidades Materiais (*MRP – Materials Requirements Planning*) controlando a montagem de dois produtos formados por diversos componentes. Os resultados permitem observar a evolução da quantidade armazenada em estoque de cada componente para diversas classes de demanda.

O dimensionamento do estoque estratégico e/ou de segurança em *MRP* na presença de incertezas ou erros na previsão da demanda é um problema relevante na manutenção do fluxo produtivo e na garantia de fornecimento de produtos ao mercado consumidor. Em (Caridi & Cigolini, 2002) este problema é abordado para os casos de *MTS (Make To Stock)*, *ATO (Assembly To Order)*, *MTO (Make To Order)* e *PTO (Purchase To Order)*. Já a relação entre capacidade de produção, *lead time*, nível de serviço do ambiente é analisada em (Mapes, 1992) (Lagodimos & Anderson, 1993) (Evers, 1999). Em (Brandolese & Cigolini, 1999) descreve-se uma metodologia para determinação do estoque estratégico mínimo de um ambiente produtivo com restrições de capacidade necessário para suprir o mercado consumidor na presença de uma variação brusca de demanda (picos de demanda) sem apresentar falta de produtos em estoque. A dinâmica do ambiente produtivo (monoproduto e mononível) é modelada usando equações à diferenças e diagramas de bloco formados por funções de transferência na variável complexa  $Z$  (i.e., a Transformada  $Z$ ).

### **1.3. Metodologia de Pesquisa**

Em (Gil, 2002), define-se pesquisa como um procedimento racional e sistemático com o objetivo de descobrir respostas aos problemas propostos. Isto sugere que a pesquisa é requerida quando não há informação suficiente para encontrar uma resposta ao problema ou quando a informação disponível se encontra em tal estado de desordem que não possa ser relacionada ao problema. De um modo geral, existem várias razões que determinam a necessidade de se iniciar uma pesquisa, entretanto, cita-se apenas duas. A primeira está relacionada ao desejo puro e simples de conhecimento (ordem intelectual), a segunda com o objetivo de melhorar algo (ordem prática), ou seja, torná-lo mais eficiente ou eficaz. Já o sucesso da pesquisa depende de como será conduzida e das qualidades apresentadas pelo pesquisador. Estas qualidades podem ser descritas através da curiosidade, da criatividade, do conhecimento do assunto, da perseverança, da paciência, do raciocínio lógico entre outros. Em sua fase inicial, como toda a atividade que envolve raciocínio e sistemática, a pesquisa necessita de um planejamento para a sua condução. Este planejamento envolve formulação do problema, as especificações, objetivos, construção de hipóteses, conceitos e etc (Contandriopoulos *et al.*, 1999) (Rudio, 2000) (Gil, 2002).

Tendo como base os objetivos gerais da pesquisa científica, esta pode ser classificada ou dividida em três grupos principais: exploratórias, descritivas e explicativas (Gil, 2002).

1. Exploratórias têm como objetivo principal proporcionar maior integração com o problema. Visando a facilitar a construção de hipóteses e tornar o problema mais explícito (aprimorando as idéias). Em sua maioria são baseadas em levantamentos bibliográficos, entrevistas com pessoas que possuem experiência no assunto pesquisado e análise de exemplos. Por apresentar flexibilidade, geralmente assume a forma de pesquisa bibliográfica ou de estudo de caso.
2. Descritivas têm como objetivo principal a descrição do comportamento ou da característica de um fenômeno ou população, relacionando-as através de variáveis. Geralmente são utilizadas na coleta de dados (questionários ou observações comportamentais de um fenômeno) por exemplo, idade, sexo, grau de instrução de uma determinada população. Geralmente assumem a forma de levantamentos de informações e em conjunto com as exploratórias são as mais requisitadas pelos pesquisadores sociais, instituições de ensino, empresas comerciais entre outros.
3. Explicativas têm como principal objetivo a identificação dos fatores que determinam ou influenciam a ocorrência de fenômenos. Este tipo de pesquisa é considerado o que mais aproxima o conhecimento da realidade ao explicar o porquê das coisas. Com isto, torna-se o mais complexo e vulnerável a cometer erros. De um modo geral o conhecimento científico está baseado nos resultados obtidos pelos estudos explicativos. Porém, isto não implica que as pesquisas bibliográficas e descritivas tenham menor importância, já que a pesquisa explicativa pode ser a continuação de uma descritiva ou exploratória (Gil, 2002). Pode-se dizer também que as pesquisas explicativas são experimentais, ou seja, valem-se do resultado de experimentos para explicar a ocorrência dos fenômenos.

Ao se determinar os objetivos gerais de uma pesquisa está se estabelecendo o seu marco teórico, ou seja, possibilitando uma aproximação conceitual. Porém o que se necessita é confrontar a informação real com a

teórica e neste caso há necessidade de se traçar um modelo conceitual e operativo de pesquisa (Gil, 2002). Este modelo recebe o nome de delineamento e se refere ao planejamento da pesquisa em sua forma mais ampla (envolve diagramação, previsão de análise e interpretação de dados). Os elementos mais importantes para a identificação do delineamento são os procedimentos a serem adotados para a coleta das informações (dados). Assim pode-se definir o delineamento em dois grupos principais: os que utilizam fontes de consulta (pesquisa bibliográfica e documental) e utilizam fonte de dados (pesquisa experimental).

A pesquisa bibliográfica se desenvolve basicamente em materiais já elaborados (livros e artigos científicos), já a pesquisa documental se baseia em materiais que ainda não receberam um tratamento analítico ou que podem ser reelaborados. A pesquisa experimental consiste basicamente em se determinar um objeto de estudo, fazer a seleção das variáveis que influenciam o estudo, definir as formas de controle e observar os efeitos que as variáveis produzem no objeto.

### **1.3.1. Trabalho de Pesquisa**

Analisando o contexto deste trabalho de pesquisa, que está baseado em cadeias de suprimentos, conceitos de controle e modelagem do sistema de armazenagem, simulação, há a necessidade inicial de se construir as idéias, definir objetivos, determinar os limites do problema, construir as hipóteses e então validar o método de gestão de estoque proposto utilizando experimentos.

Usando as descrições anteriores sobre pesquisa, tem-se que a metodologia implementada neste trabalho é composta da pesquisa exploratória (pela presença de levantamento bibliográfico e estudos de casos) e da pesquisa explicativa (pela proposta de soluções para o problema de gestão de estoque e comparação através de experimentos). Pretende-se dizer de que modo ou por que causas um determinado fenômeno presente em sistemas de estoque é produzido. Para isto será necessário definir, inicialmente, objetivos e obter maiores informações sobre o assunto. Neste nível, a pesquisa é realizada através de estudos bibliográficos (para explicar o fenômeno a partir de referências teóricas publicadas em documentos, analisando as contribuições científicas do passado sobre o assunto). Na seqüência, através de construção de hipóteses e soluções, obtendo assim uma nova percepção do mesmo e descobrir novas idéias, aqui se faz à pesquisa explicativa (experimental).



#### 1.4.

#### **Proposta e Organização do Trabalho**

O objetivo deste trabalho é a análise e o desenvolvimento de métodos para gestão de ambientes produtivos compostos por sistemas de armazenagem sob a ótica da abordagem conhecida como *System Dynamics*. A proposta do trabalho está dividida em duas partes principais: i) a modelagem do ambiente produtivo e ii) os algoritmos para reposição de componentes em estoque (controle de estoque). Na parte de modelagem, propõe-se uma descrição de ambientes produtivos tipo IOBPCS onde o valor futuro de demanda de componentes é decomposto em duas partes: demanda prevista e erro de previsão. Desta forma, a análise de sensibilidade do ambiente frente a incertezas ou erros de previsão na demanda de mercado é realizada de forma independente da gestão da demanda. Na parte de controle, propõe-se e analisa-se o comportamento dinâmico de dois algoritmos de controle para determinação da ordem para reposição de componentes em estoque. Os algoritmos consideram um ambiente IOBPCS com restrição de capacidade de produção e incertezas na demanda futura, que pode ser do tipo sazonal ou conter variações abruptas (picos). O primeiro algoritmo determina a ordem de reposição baseado na minimização de um critério de custo que considera o desvio da posição de estoque em relação a um objetivo de estoque. Uma metodologia para evitar falta de componentes em estoque para este algoritmo é também proposta. O segundo algoritmo está baseado na estratégia de horizonte rolante (Clarke, 1994) e pode ser visto como uma extensão da utilização de programação linear para planejamento agregado de produção (Moreira, 1993) e (Barchet *et al.*, 1993).

Este trabalho está organizado em cinco capítulos.

No Capítulo 2, os principais conceitos sobre a gestão de estoques na logística e no ambiente produtivo são revistos. Na logística, destacam-se fatores operacionais, isto é, o investimento financeiro e a integração entre os processos. No ambiente produtivo, destacam-se as principais ferramentas utilizadas na política clássica de gerenciamento de estoque. Estas ferramentas são: análise dos custos incorridos no gerenciamento, curva ABC, análise do padrão de consumo dos itens presentes no estoque, gráfico tipo dente de serra, dimensionamento do lote econômico, seleção do sistema de reposição (contínuo ou periódico) para o padrão de demanda independente e determina-se o estoque de segurança. Além disso, discute-se a função do *MRP* no sistema de reposição para demanda dependente e também dos parâmetros não clássicos na gestão de estoques.

No Capítulo 3, a modelagem e a análise da dinâmica de ambientes produtivos e de cadeia de suprimentos são abordadas. Após uma revisão de conceitos relacionados com *SDs* implementa-se um ambiente produtivo IOBPCS mononível e monocomponente em tempo contínuo utilizando estes conceitos. Uma cadeia de suprimentos multinível e monocomponente é analisada posteriormente sob o aspecto de amplificação da demanda. A modelagem de um ambiente produtivo IOBPCS mononível e monocomponente com a caracterização explícita do erro de previsão é realizada e, finalmente, equações de previsão para o comportamento futuro do sistema são derivadas.

No Capítulo 4, algoritmos de controle para a reposição de componentes em estoque são propostos e analisados. Os algoritmos trabalham em tempo discreto e são aplicados em um ambiente produtivo IOBPCS. O IOBPCS considera limites na capacidade de produção e está sujeito a incertezas, erros de previsão e demanda sazonal ou com variações abruptas. Tendo como parâmetro de comparação um critério de custo total de produção, quatro métodos são analisados e exemplos de simulação ilustram o desempenho do sistema de armazenamento em diferentes situações do ambiente produtivo.

No Capítulo 5, encontram-se as descrições dos principais resultados, das conclusões e apresentação de propostas para trabalhos futuros.

## 2

### Gestão de Estoques

***Este capítulo descreve os conceitos básicos sobre a gestão de estoques em ambiente produtivo e na logística. Na logística, destaca-se o seu papel operacional, isto é, de investimento financeiro e de integração. No ambiente produtivo, destacam-se os principais parâmetros utilizados na política clássica de gerenciamento de estoque em ambiente produtivo. Estes parâmetros são: custos incorridos no seu gerenciamento, ferramentas de controle como curva ABC, padrão de consumo de componente, gráfico tipo dente de serra, lote econômico, sistemas de reposição para o padrão de demanda independente e determina-se o estoque de segurança. Além disso, discute-se a função do MRP no sistema de reposição para demanda dependente e também dos parâmetros não clássicos na gestão de estoques.***

Segundo (Corrêa *et al.*, 2001), um dos principais aspectos presentes na administração da produção é o conceito de estoques, uma vez que trata-se de um elemento fundamental no gerenciamento das empresas na atualidade. Isto não ocorre somente dentro do ambiente produtivo, mas ao longo de todos os níveis que compõem a cadeia de suprimentos de uma determinada empresa.

No gerenciamento, busca-se a otimização do número de componentes em estoque através da redução de custos e investimentos financeiros, visando atender sempre às necessidades da produção e dos clientes. Inicialmente, deseja-se obter uma estratégia que otimize o número de componentes em estoque (gestão de estoque) em função de alguns fatores: compreensão das funções e objetivos do armazenamento, conhecimento do organismo gestor, determinação de sua localização e grau de comprometimento dentro da cadeia de suprimentos e, por fim, a determinação das ferramentas de planejamento e controle necessárias a seu funcionamento. Posteriormente, faz-se a análise da estratégia definida inicialmente, através de indicadores de planejamento e controle, tais como:

- Investimento financeiro e custo de gerenciamento.
- Quantidade de matéria-prima no abastecimento.
- Pedido de abastecimento.
- Precisão dos dados de demanda prevista.
- Incertezas do mercado.

- Duração das fases de produção e abastecimento.
- Objetivo e posição de estoque.

Finalmente, busca-se um ponto de operação que integre a estratégia de otimização composta das ferramentas de planejamento e controle com a informação operacional a fim de satisfazer às necessidades do cliente, com o menor custo de produção e transporte. Neste ponto, o estoque assume a sua real importância que é a de garantir o fluxo produtivo operando com baixa quantidade de componentes e auxiliar na redução dos custos e investimentos financeiro. A Figura 2.1 contém alguns dos processos descritos neste capítulo que contribuem para execução de uma boa gestão de estoques.

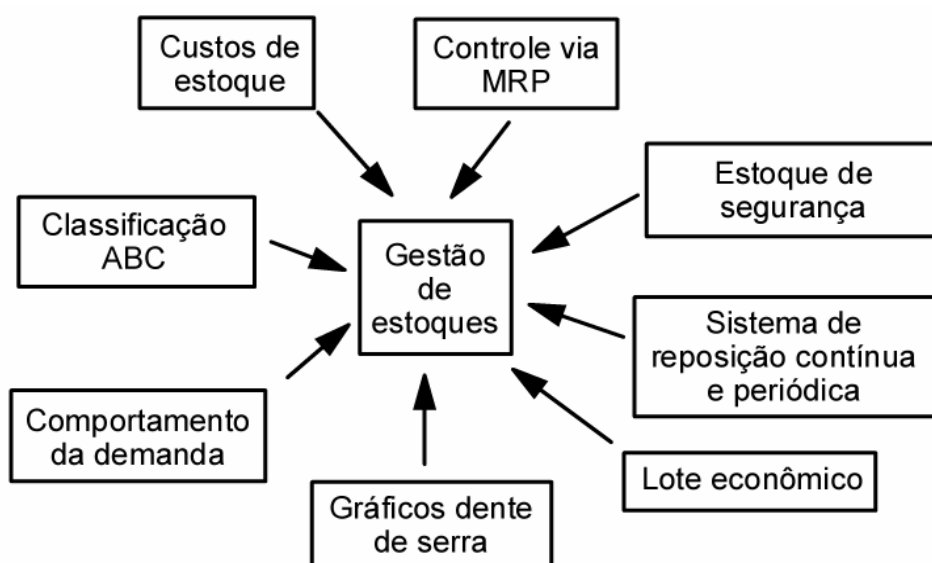


Figura 2.1: Atividades da gestão de estoques.

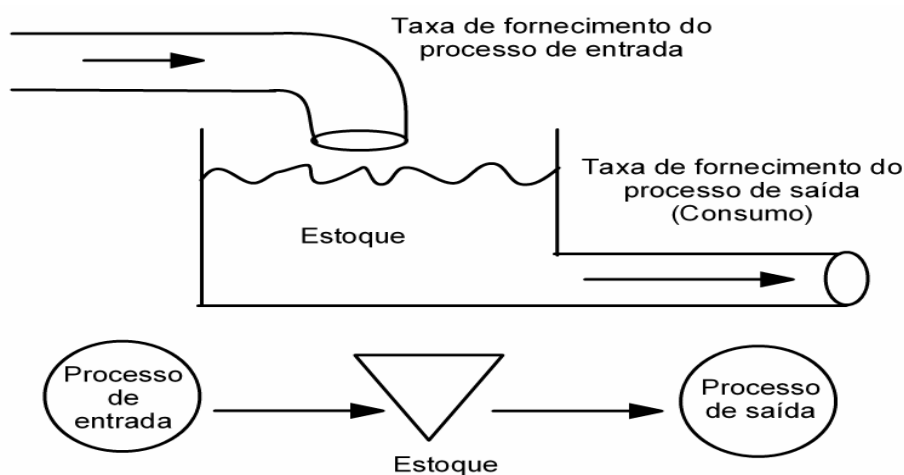
Assim sendo, neste capítulo aborda-se o gerenciamento de estoque dentro dos enfoques produtivo e logístico conforme apresentado a seguir. Na Seção 2.1, descreve-se conceitos básicos sobre gestão de estoque em ambiente produtivo. Na Seção 2.2, descreve-se os conceitos básicos de gestão de estoque na logística. Na Seção 2.3, apresentam-se os objetivos operacionais da gerência de estoque dentro do ambiente produtivo. Na Seção 2.4, enumera-se os tipos de estoques mais utilizados no ambiente produtivo e na logística. Finalmente, na Seção 2.5, apresenta-se ferramentas de planejamento e controle.

## 2.1.

### Conceitos de Estoque no Ambiente Produtivo

Os estoques podem ser definidos como acúmulos de recursos materiais em fase específicas do processo de transformação (Corrêa *et al.*, 2000). Nesta

definição, entende-se que estoque não está relacionado somente a uma fase do processo produtivo, mas todo o recurso a ser armazenado. Dentro da concepção de produção, pode-se entender que estoques posicionados estrategicamente entre fases produtivas (de produção ou montagem), funcionam como elementos necessários para se evitar interrupções indesejáveis e proporcionando independência entre as fases. Em outra definição os estoques são caracterizados como recursos materiais distribuídos em fases específicas do processo produtivo (Slack *et al.*, 1999). Observa-se nesta definição que não há importância quanto ao seu posicionamento durante as operações produtivas, a sua existência se deve a uma diferença entre a quantidade produzida, quando baseada em uma demanda prevista e a demanda real por um produto ou componente. Caso a produção consiga suprir toda a demanda não há necessidade de estoques.



Fonte: (Slack *et al.*, 1999).

Figura 2.2: O estoque serve para compensar a diferença entre ritmo e demanda.

A Figura 2.2 ilustra, através da comparação de um ambiente produtivo com um sistema de fluxo de água com armazenagem, a necessidade de estoques e seu gerenciamento. Para se manter um determinado nível de água por exemplo, definido a priori, algumas informações relevantes devem ser consideradas tais como: taxa de fornecimento de água na entrada, taxa de consumo de água na saída e nível inicial de água. São formuladas três hipóteses para explicar a funcionalidade do estoque: taxa de fornecimento igual, menor e maior que a taxa de demanda. Na primeira hipótese, o nível de água permanece constante igual ao valor definido inicialmente. Na segunda hipótese, com o passar do tempo, o tanque se esvaziará. Na terceira hipótese, tem-se a tendência do tanque transbordar. Ao se fazer está analogia entre um ambiente produtivo e o fluxo de

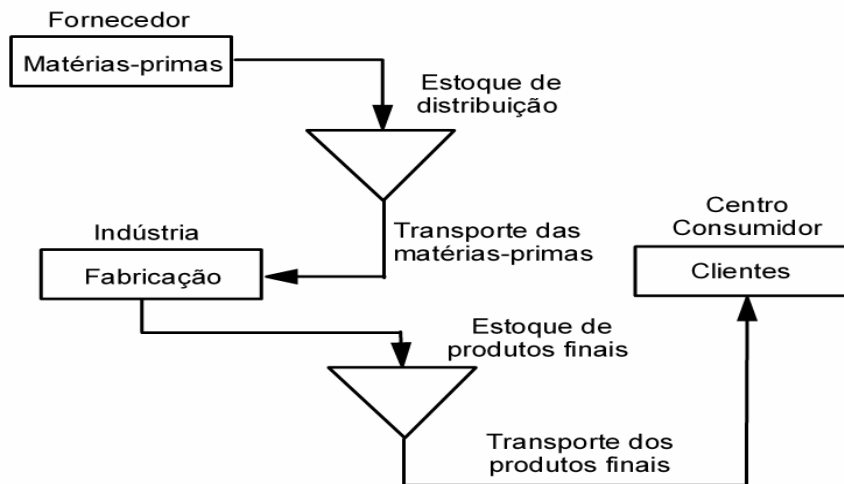
água através do tanque, a posição de estoque está sujeita a um fluxo de fornecimento de componentes no estoque e a um fluxo de demanda do estoque. De forma semelhante se a demanda por um determinado componente ou produto for maior que a taxa de reposição, haverá a ruptura ou esvaziamento do estoque implicando em prejuízos na produção, atendimento ao cliente, vendas e etc. Entretanto se o estoque não for bem dimensionado poderá haver excesso de componente e extrapolação de seu valor máximo, com isto trará prejuízos reais aos investimentos financeiros.

## **2.2.**

### **Conceitos de Estoque na Logística**

Em (Bowersox & Closs, 2001) define-se que, sob a ótica da logística, todas as decisões que envolvem estoques são de alto risco e de grande impacto. Com isto, toda a atividade que comprometer um determinado sistema de estoque ou a liberação de produtos para o mercado consumidor no sentido de antecipar vendas futuras acarreta em atividades de logística. Assim, se um sistema de estoque não for adequado, as vendas feitas pelo departamento de marketing não poderão atender as necessidades dos clientes e com isto as perdas são inevitáveis. Por outro lado, o planejamento de estoque pode-se tornar crítico para a produção. A falta de componentes em estoque pode parar a produção ou interferir na programação da produção, com implicação direta nos custos e aumento da possibilidade de falta do produto acabado. Pode também gerar um “não atendimento” ao cliente, com danos ao planejamento de marketing bem como à produção. Porém o excesso de estoque implica em problemas, tais como: aumento dos custos ao longo de toda a cadeia de suprimentos, redução dos lucros devido à imobilização do capital investido, obsolescência e custo de seguro.

Uma definição sobre a função de sistemas de armazenagem na logística é encontrada em (Ballou, 2001). “Os estoques são pilhas de matérias primas, insumos, componentes, produtos em processo e produtos acabados que são distribuídos ao longo de todos os canais logísticos e de produção”. O objetivo deste tipo de sistema vai além da diminuição de custos com os investimentos ou garantia do processo de produção e de transporte. O objetivo maior é o atendimento ao cliente. A Figura 2.3, ilustra de forma simplificada o trajeto descrito por um produto desde o seu fornecedor de matérias-primas até a sua distribuição aos consumidores.



Fonte: (Ballou, 2001).

Figura 2.3: O objetivo da logística é o atendimento ao cliente.

Além da visão do cliente como o centro da logística, o prisma financeiro e de investimento também possui grande importância. Segundo as informações das grandes empresas (ou indústrias), os valores investidos em estoques muitas vezes chegam a 40% de todo o seu faturamento anual (Ballou, 2001). Neste sentido, toda a decisão a ser tomada que envolva estoque deve ser cercada de todo o cuidado, pois um erro no dimensionamento pode levar a perda de competitividade de mercado. Deste modo, nos últimos anos, a manutenção e os investimentos em estoques têm sido criticados sob a alegação de desperdício. As principais razões para estas críticas são:

- O super dimensionamento dos estoques para facilitar o gerenciamento da produção, ou seja, justifica-se mais facilmente o seu excesso do que a sua falta.
- A manutenção de estoques ao longo da cadeia de suprimentos absorvem grandes investimentos que poderiam ser destinados a outras atividades da indústria, como melhorias na produção ou na competitividade.
- Os estoques podem mascarar problemas na qualidade. Se as devidas correções a serem feitas na qualidade utilizarem um tempo longo, os estoques são utilizados para proteger o fluxo de produção e o capital investido.

Por outro lado, pode-se citar pontos positivos que explicam a necessidade de estoques:

- Os estoques podem proporcionar economias na produção e o desacoplamento entre a produção e a demanda, funcionando como sistema que amortece variações bruscas entre ambas.
- Devido aos estoques, o setor de compras pode comprar além das quantidades imediatas necessárias à empresa, utilizando descontos nos preços em função da quantidade adquirida ou da época do ano.
- No setor de transportes, pode-se reduzir os preços de fretes em função da quantidade a ser transportada. Normalmente, quanto maior for esta quantidade, menor é o custo por unidade neste caso o estoque absorve o excesso.
- Variações do tempo de produção e de transporte podem afetar em muito o desempenho das empresas, implicando em um aumento considerável nos seus custos. Os estoques reduzem os impactos destas influências nos custos.
- Greves inesperadas de trabalhadores, fatores naturais, variações bruscas de demanda ou quaisquer medidas políticas que afetam diretamente a produção. Os estoques reduzem os impactos destas influências na produção.

Conceitos de logística presentes em (Dias, 1993) incluem: “Para melhorar a estrutura industrial é necessário dinamizar o sistema logístico, que engloba o suprimento de materiais e componentes, a movimentação e o controle de produtos e o apoio ao esforço de vendas dos produtos finais, até a colocação do produto acabado no consumidor”. Está claro que há uma preocupação crescente com o conhecimento da cadeia logística, já que o enfoque tradicional era “produza, estoque e venda” está sendo alterado para atender uma nova visão que é “definição de mercado, planejamento de produto e apoio logístico”. Além destes novos enfoques, os gerentes de suprimentos estão reconhecendo que devem também coordenar suprimentos, produção, embalagem, transporte, comercialização e finanças em uma atividade global de modo a tornar o sistema logístico cada vez mais eficiente (menor custo de operação) e com menor capital investido. Assim, cita-se razões pelas quais há um grande interesse na logística:

- Crescentes custos relativos a serviços, transporte e armazenagem.
- Alterações nos canais de distribuição para os bens de consumo, o estoque de matérias-primas localizados no fornecedor são gerenciados pelos consumidores, por exemplo à indústria.



- Complexidade dos sistemas de distribuição em toda a cadeia de suprimento.
- Desenvolvimento de novas tecnologias para atender a demanda crescente de questões relacionadas com a logística e etc.

Deste modo, conclui-se que os processos que integram o sistema logístico possuem custos e objetivos que em sua maioria são independentes entre si. Com isto, ao longo do sistema logístico os custos relativos a cada processo podem interferir nos processos subsequentes e afetar o seu desempenho. Por exemplo, tem-se o departamento de marketing de uma indústria que está intimamente ligado às vendas e necessita de estoques abarrotados para as negociações no mercado. Por outro lado, o departamento financeiro necessita que o sistema de logística opere com custos e investimentos reduzidos, com isto gerando conflitos de interesse quanto a minimização dos custos.

### **2.3.**

#### **Objetivos de Estoque**

De um modo geral, os estoques existem para absorver problemas do sistema de produção, distribuição, armazenagem, etc. Os atrasos proporcionados por problemas gerados na entrega das matérias-primas têm sempre uma solução factível, mas os causados por fatores sazonais são em maioria insolúveis. Os estoques não agregam valor ao produto, assim sendo, sua eficiência pode ser medida em termos de sua posição operacional, ou seja, quanto menor for o estoque de modo que permita o sistema produtivo continuar operando, mais eficiente será o sistema. Na atualidade, apesar da relevância do problema de administração de estoques existem diversos exemplos onde este tem sido tratado com pouca importância (Tubino, 2000). O que se observa são sistemas produtivos com baixo grau de eficiência e uma quantidade considerável de estoques em processamento, acarretando altos custos de produção e estocagem. A partir de pontos de estocagem, produção e tempo de entrega entre outros, há uma série de funções para as quais os estoques são criados, cita-se a seguir as principais:

- Garantir a independência entre as etapas produtivas: o posicionamento dos estoques entre etapas produtivas funciona como amortecedores de produção ou na distribuição da cadeia de suprimentos, tornando-as independentes entre si. Qualquer problema que uma etapa apresentar não afetará o funcionamento das

subseqüentes. O exemplo de estoques acabados esclarece estes comentários. Quando uma indústria não possui capacidade de produção para atender um crescimento inesperado na demanda, o estoque posicionado estrategicamente entre produção e vendas garantirá o abastecimento do mercado.

- Possibilitar o uso de lotes econômicos: em algumas etapas do sistema produtivo, só se permite a utilização de lotes fixos que são maiores que as necessidades imediatas para completar a produção. Com isto, tem-se um excedente de produção que precisa ser administrado com uma certa eficiência. Um exemplo, é o caso de máquinas com alto tempo de preparação para o processo de produção (*setup*). Nesta situação, tem-se a necessidade de produzir grandes lotes para compensar o custo de produção.
- Permitir uma produção constante: existem sistemas produtivos que estão sujeitos a efeitos sazonais, ou seja, variações periódicas de demanda em função da época do ano. Neste caso, o armazenamento de produtos acabados ou matérias-primas tem o objetivo de evitar que o ritmo de produção seja sobrecarregado durante períodos de alta demanda. Logo, ao se evitar a falta de produtos em períodos de demanda alta, necessita-se de estoques gerados durante o período de demanda baixa para que o ritmo de produção não seja afetado. No caso de matérias-primas sazonais, a armazenagem deve ser feita em períodos de alta oferta para que a produção continue a trabalhar quando a oferta cair.
- Redução dos tempos de produção: estoques intermediários posicionados dentro do ambiente produtivo permitem que os prazos de entrega dos produtos sejam reduzidos, não havendo a necessidade de se esperar pela produção ou compra de um componente.
- Obtenção de vantagens de preço: as indústrias compram grandes quantidades para estoque. Isto é feito para obter descontos nos preços quando detectam que seus produtos acabados irão aumentar de preço. Assim conseguem obter vantagens nas vendas.
- Fator de segurança: geralmente são utilizados estoques de segurança para evitar a falta de produtos ou de componentes quando há variações de demanda ou erros na previsão. Na produção, utiliza-se este fator para prevenir situações como: quebra de equipamentos,

absenteísmo, má qualidade dos produtos, falha na entrega de produtos ou matérias-primas por parte dos fornecedores, entre outros.

## **2.4.**

### **Tipos de Estoque**

Geralmente, o desequilíbrio existente entre a reposição de estoque e demanda em vários pontos do ambiente produtivo, fazem surgir à necessidade de estoques (Slack *et al.*, 1999) (Towill, 1982). Para isto, é necessário haver manutenção de estoque que implica em risco de investimento e a possibilidade de obsolescência (Bowersox & Closs, 2001) (Ballou, 2001). Estes estoques podem ser categorizados segundo uma definição clássica, conforme a seguir:

- Estoque no canal (de distribuição): a sua existência se dá quando o tempo de deslocamento entre o ponto de fornecimento e o ponto de demanda não é instantâneo, assim considera-se todo o estoque em trânsito como estoque de canal (Slack *et al.*, 1999).
- Estoque de especulação: são os estoques formados para a especulação de preços. São formados geralmente, em períodos além das necessidades da operação da produção e fazem parte do estoque total que deverá ser gerenciado (Ballou, 2001).
- Estoque de ciclo ou regulador: são os estoques que têm a função de cobrir a demanda entre duas reposições sucessivas. Sua dependência é grande em relação ao tamanho do lote de produção, das limitações do espaço físico do estoque, dos custos de manter os estoques e das relações existentes entre preço e quantidade (Ballou, 2001).
- Estoque de segurança ou isolador: são os estoques formados com o objetivo de garantir o fluxo de produção e o atendimento ao cliente. Sua formação se deve às incertezas relacionadas com variações nos tempos para a reposição de componentes, erros na previsão da demanda do mercado, problemas na produção ocasionados por quebra de equipamento entre outros.

Os estoques também podem ser classificados segundo um critério baseado em sua localização na cadeia de suprimentos (Towill, 1982). Podem ser:

- Matéria-prima
- Em processo
- Produto final

- Distribuidor ou Atacadista
- Varejista

Os processos produtivos de entrada e saída do estoque são apresentados na Tabela 2.1

| Classe | Estoques        | Reposição  | Demanda    |
|--------|-----------------|------------|------------|
| I      | Matéria-prima   | Fornecedor | Produção   |
| II     | Em processo     | Produção   | Produção   |
| III    | Produtos finais | Produção   | Atacadista |
| IV     | Atacadista      | Manufatura | Varejista  |
| V      | Varejista       | Atacadista | Clientes   |

Fonte : (Towill, 1982)

Tabela 2.1: Classificação dos estoques.

## 2.5. Planejamento e Controle de Estoques

### 2.5.1. Custo de Estoque

Quando se deseja armazenar qualquer tipo de material, pensa-se primeiramente em custos para geri-lo. Neste sentido, os custos mais importantes são juros, depreciação, aluguel, deterioração ou seguros. Estes custos podem ser agrupados em quatro principais modalidades: custos de capital, custo de pessoal, custo de edificação e custo de manutenção. Dentro do contexto de quanto pode ser gasto para gerir um armazém, determina-se dois pontos importantes: o tempo de permanência e as quantidades em estoque de um determinado componente. Ao se utilizar grandes quantidades em estoque, necessita-se de uma considerável quantidade de equipamentos e/ou de mão de obra qualificada para movimentá-lo. Nestes casos, tem-se custos elevados com pessoal e com manutenção dos equipamentos. No caso de estoques superdimensionados, espera-se uma venda muito acima da habitual e algumas indústrias fazem grandes investimentos em edificações e equipamentos. Nestes casos, tem-se custos elevados com edificação, capital e manutenção (Dias, 1993).

Para os gerentes de produção, três questões são importantes no momento da tomada de decisão relativa à necessidade de reposição de estoque: o quanto pedir, quando pedir e como controlar o sistema. O quanto: dimensionar a quantidade de reposição em estoque. O quando: em que momento ou em qual posição (i.e., a quantidade de componentes mínima que dispara um pedido de

reposição) o pedido de reposição deve ser colocado. O como controlar: quais são as prioridades, procedimentos e rotinas que devem ser executadas para facilitar as tomadas de decisão sobre os estoques. Deste modo, os gerentes de produção tentam identificar quais são os custos que serão afetados por suas decisões (do quando pedir, quanto pedir e como controlar) e quais são as margens de erro possíveis que não prejudicam a produção (Slack *et al.*, 1999). Os custos mais relevantes relacionados com as questões citadas acima são:

- Custo de colocação de pedido: quando se faz um pedido para reposição de estoque, são necessárias algumas transações que representam custos para a indústria tais como gastos com escritórios, documentação e gastos gerais para gerenciar toda a informação.
- Custos de desconto de preço: os fornecedores geralmente oferecem descontos sob o preço normal de compra quando esta é feita em grande quantidade. Por outro lado, podem impor custos extras quando os pedidos são realizados em quantidades reduzidas.
- Custo de falta de estoque: se os cálculos feitos para reposição de estoques forem conservadores, corre-se o risco da falta de componentes. Isto implica em custos e penalidades devido à falta de atendimento aos consumidores.
- Custo de armazenagem: estão associados ao espaço físico comprometido com o armazém propriamente dito. São questões tais como: locação, iluminação, temperatura ambiente ou segurança.
- Custo de obsolescência: se a política de reposição privilegiar a aquisição de grandes quantidades de componentes, pode ocorrer a situação onde os componentes permanecem em estoque durante muito tempo. Com isto, tem-se o risco de deterioração ou obsolescência (ex.: componentes eletrônicos).
- Custo de ineficiência de produção: quando uma indústria possui grandes quantidades em estoque pode-se estar mascarando problemas na produção ou qualidade. Em alguns casos, isto é, este custo só será identificado quando o componente for para o mercado consumidor (ex.: recall feito pela montadora de automóveis).
- Custo de capital de giro: quando se faz um pedido de reposição, a indústria emite notas de pagamentos de seus bens. Ao vender os produtos emite-se também notas que devem ser pagas pelos consumidores. Durante este intervalo entre pagar e receber, o caixa

da indústria fica descoberto e, por isto, deve-se ter algum fundo para cobrir esta diferença. Este fundo é tratado no meio financeiro como capital de giro, isto é, o capital necessário para movimentar o estoque e a ele é incluído o custo associado ao mercado financeiro.

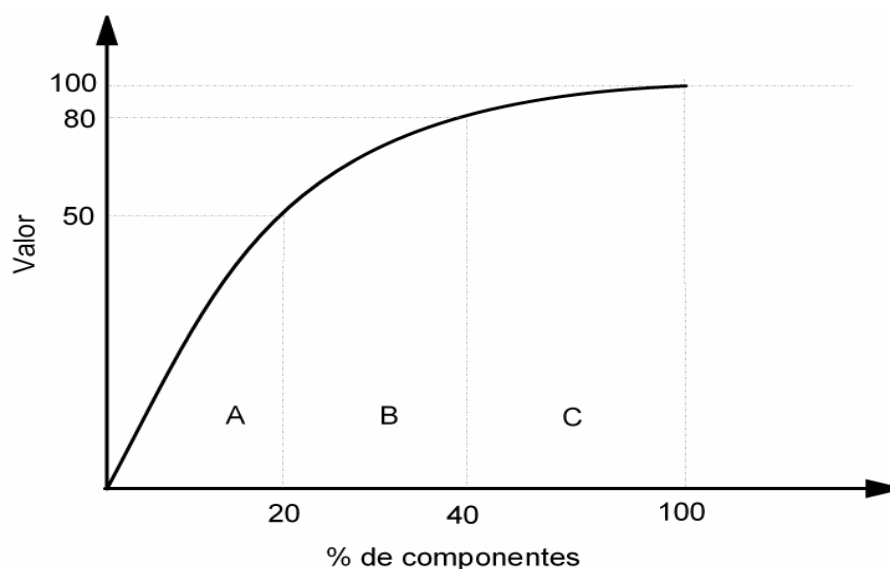
### **2.5.2. Curva ABC**

Na atualidade, muitas indústrias estão tendo que trabalhar com uma grande diversidade de componentes em seus estoques com o objetivo de atender a uma variedade cada vez maior de produtos finais. O gerenciamento destes componentes requer uma atenção especial, pois implicam em investimentos. Para isso, é necessário adotar um critério que classifique os componentes pela sua importância e investimento.

Assim os componentes que demandam altos investimentos dentro de um período devem ter uma atenção especial, porque qualquer economia obtida no estoque destes componentes pode ser revertida em investimentos em outras áreas. Nesta análise, não é somente o lado financeiro que deve ser considerado, mas sim todos os critérios que também influenciam a produção podem ser considerados como a importância técnica dos componentes. Deste modo, a aplicação da metodologia denominada *ABC* é utilizada em qualquer caso de classificação de componentes, seja qual for a natureza e o critério utilizado (Moreira, 1993).

A metodologia *ABC* está baseada em dividir a composição dos componentes em estoque nas classes *A*, *B* e *C*, em função de sua importância em termos de custos e quantidades. Estas três classes são as mais encontradas entretanto outras classificações podem ser utilizadas. Os componentes da classe *A* são os mais importantes e devem receber especial atenção na fase inicial do estudo pois podem variar de 50% a 70% do valor total investido e de 10% a 20% da quantidade total de componentes em estoque. Os componentes da classe *B* são tratados posteriormente ao dimensionamento dos componentes da classe *A*, é a classe intermediária. Na sua classificação, podem variar de 20% a 30% do valor total investido e de 20% a 30% da quantidade total de componentes em estoque. Os componentes da classe *C* são os de menor importância. Embora representem uma quantidade muito grande de componentes, possuem pouca importância sobre o valor total investido. Na sua classificação, podem variar de 10% a 20% do valor total investido e de 50% a 70% da quantidade total de componentes em estoque. Observa-se que a gestão exercida sobre os

componentes da classe A é a mais rigorosa e recai sobre uma pequena parcela da quantidade de componentes. Para medir os seus custos, geralmente utilizam-se as seguintes informações sobre: armazenagem e reposição, precisão na demanda, estoques de segurança entre outros. No caso dos componentes da classe C tem-se que sua gestão é mais superficial pois seus custos seriam altos em função da quantidade de componentes a ser avaliada. Neste caso, procura-se gerir os componentes baseados em informações aproximadas por exemplo, da quantidade de componentes nos estoques de segurança entre outras. Na classe B usa-se para a gestão de estoque um meio termo baseado nas classes A e C (Pozo, 2001) (Tubino, 2000). A Figura 2.4 contém um exemplo de curva ABC. Nesta curva, percebe-se a relevância de cada classe em termos de valor e percentual de componentes em estoque.



Fonte: (Tubino, 2000).

Figura 2.4: Gráfico da Curva ABC.

### 2.5.3.

#### **Demanda Independente e Demanda Dependente**

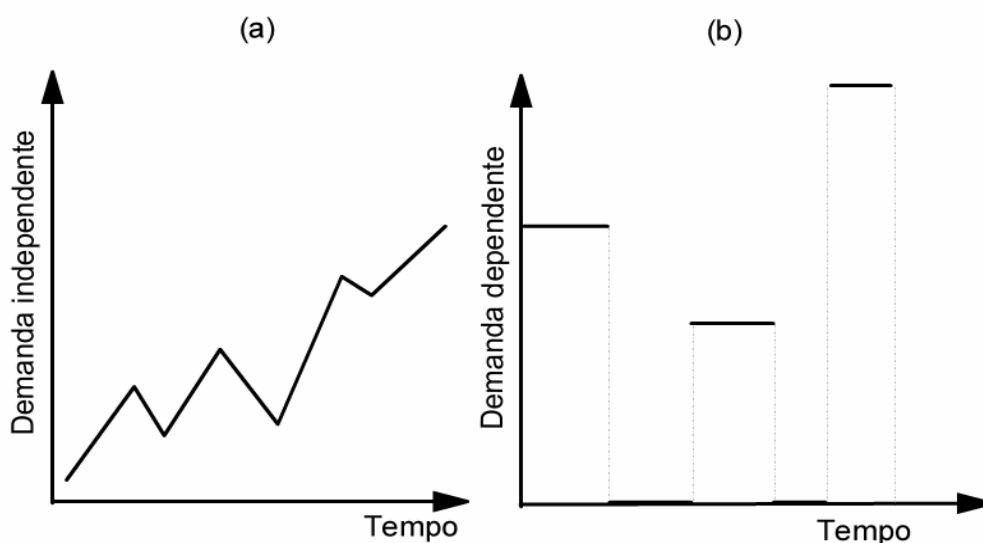
Dentro de um processo produtivo, existem dois padrões básicos para o consumo de um componente durante um período de produção. O primeiro é chamado de demanda independente e o segundo de demanda dependente. A partir do entendimento deste dois padrões, são implementadas estratégias diferenciadas para a gestão de estoques (Moreira, 1993).

A demanda de um componente será considerada independente quando ela depender somente das condições de mercado, ou seja, o consumo de um outro componente qualquer não tem influência nesta demanda. Tipicamente, pode-se citar como um componente de demanda independente o componente fabricado

por uma indústria que, normalmente, depende somente do comportamento de mercado (Corrêa *et al.*, 2001).

A demanda de um componente será considerada dependente quando esta for programada internamente e utilizada na composição de outros componentes do processo produtivo. Esta demanda é programada em função das expectativas do mercado (previsão de demanda dos componentes independentes). Por exemplo, são componentes de demanda dependente as matérias-primas, componentes ou peças para montagem (Moreira, 1993).

A diferença básica entre os dois tipos de demanda está na forma como devem ser previstos os seus valores e as reposições. No caso de componentes com demanda independente, a previsão está baseada na demanda futura do mercado consumidor e a reposição de componentes finais em estoque. Por outro lado o consumo do componente de demanda dependente não necessita ser previsto, pois o seu consumo está baseado na demanda de outro componente e a sua reposição na abordagem de requisição (Moreira, 1993).



Fonte: (Moreira, 1993).

Figura 2.5: (a) Demanda independente e (b) Demanda dependente.

Os sinais típicos no tempo que representam as duas demandas ilustradas na Figura 2.5 são bem distintos. Isto se deve ao fato de que, para os componentes e peças de reposição a demanda independente apresenta características de mercado. Por um outro lado as matérias primas e peças para montagem têm um comportamento do tipo: produz-se ou não, característico da produção em lote e representados pela demanda dependente. Este tipo de comportamento, pode ser interpretado como intervalo de tempo entre o pedido

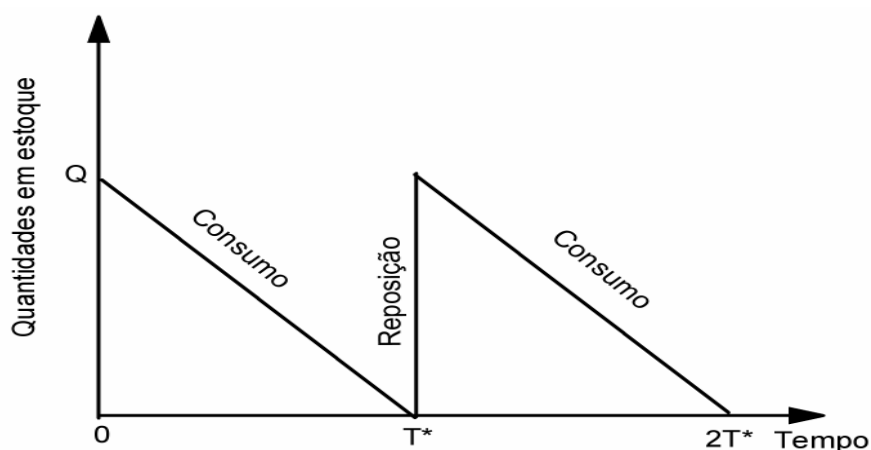


de reposição e a entrega, ou seja, o tempo de produção. Durante um determinado período da fase produtiva não há produção caracterizando que nenhum pedido de reposição foi efetuado (Moreira, 1993).

#### 2.5.4.

##### Gráfico Dente de Serra

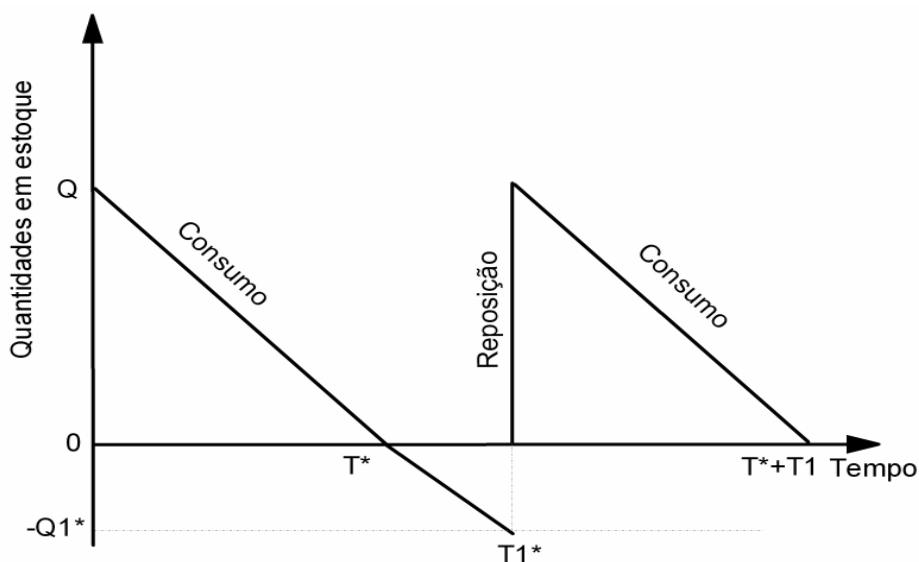
O gráfico denominado dente de serra tem como objetivo mostrar a evolução, ao longo de um período produtivo, da quantidade de entrada e saída de componentes em estoque. Na composição do gráfico tem-se, na ordenada, a quantidade de componentes em estoque, na abscissa, a variável “tempo”. A Figura 2.6 contém um exemplo de gráfico tipo dente de serra. A forma dente de serra é tipicamente obtida nas situações discutidas a seguir. Assume-se que o estoque tem um valor inicial  $Q$  (esta quantidade pode assumir o valor do lote econômico que minimiza os custos em estoque, e será discutido a seguir) e os componentes são consumidos uniformemente durante um período de produção até chegar ao valor zero (estoque sem componentes). A partir de um determinado tempo ( $T^*$ ), chamado tempo de reposição, o estoque será abastecido com a mesma quantidade  $Q$  instantaneamente, com isto o número de componentes retornará ao seu valor máximo, este ciclo de consumo e reposição será sempre repetido periodicamente se as seguintes condições forem atendidas: ausência de alterações de consumo durante o tempo, ausência de falhas administrativas que provoquem um problema na solicitação de compra, ausência de atraso na entrega de componentes pelo fornecedor e ausência de problemas relativos à qualidade dos componentes entregue pelo fornecedor.



Fonte: (Dias, 1993).

Figura 2.6: Gráfico dente de serra.

Na prática estas quatro condições nem sempre ocorrem, isto é, o consumo de componentes varia no tempo e os prazos de entrega nem sempre são cumpridos pelo fornecedor. O controle de qualidade, ocasionalmente, rejeita parcialmente ou totalmente os componentes entregues. Todos estes fatores são suficientes para alterar o comportamento de consumo dos componentes dentro de um estoque, com isto, a Figura 2.6 não expressa a realidade da variação no tempo do número de componentes em estoque.



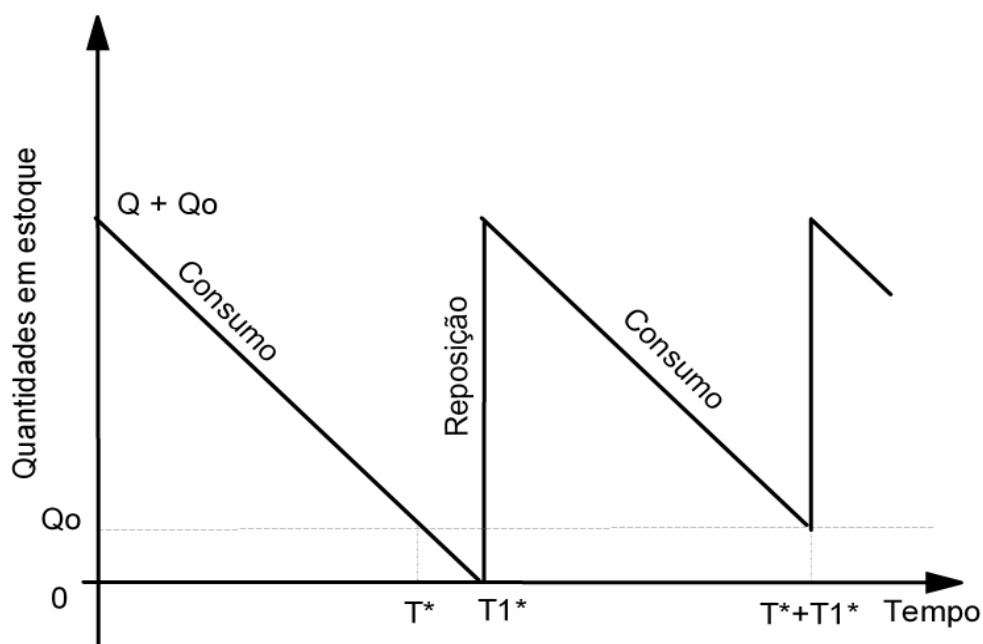
Fonte: (Dias, 1993).

Figura 2.7: Gráfico dente de serra com ruptura do estoque.

Se, por algum dos motivos descritos anteriormente, o estoque não puder ser repostado por uma determinada quantidade  $Q$  no tempo  $T^*$ , a sua ruptura, isto é, a falta de componentes em estoque, é inevitável. Em outras palavras, deixa-se de atender a uma quantidade  $Q1^*$  que deveria ser consumida no intervalo de tempo entre  $T^*$  até  $T1^*$ . Este fato é ilustrado na Figura 2.7.

O gerenciamento de estoque tem como objetivo evitar esta ocorrência, procurando uma solução alternativa que, neste caso, pode ser o aumento da posição de estoque. Nem sempre esta solução é a mais viável devido aos investimentos e obsolescência, porém é a mais usual. A Figura 2.8 contém esta situação. Nesta figura, a posição de estoque inicial é incrementada de uma quantidade ( $Q_0$ ) de modo que o sistema de armazenamento consegue lidar com atrasos na reposição de componentes sem a ocorrência de ruptura de estoque.

Desta forma, tem-se um aumento na probabilidade de atendimento à demanda de componentes.



Fonte: (Dias, 1993).

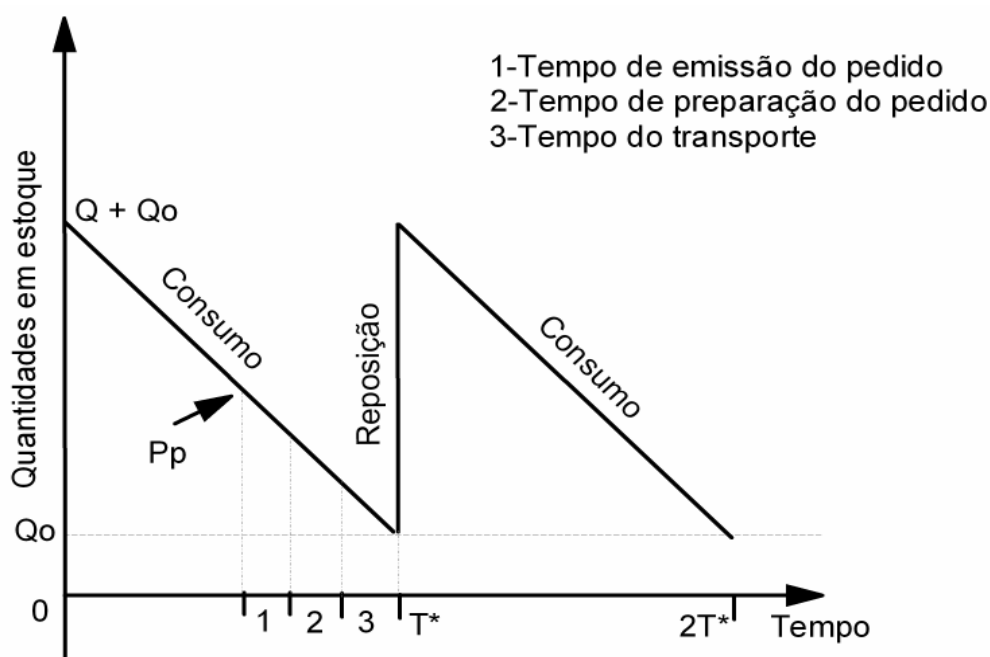
Figura 2.8: Gráfico dente de serra com estoque mínimo ou de segurança.

Através da Figura 2.8, verifica-se que, na ausência de incertezas relativas à reposição de componentes, uma posição de estoque ( $Q_0$ ) não nula estará presente durante todo o período produtivo. Portanto, deve-se ter bom senso para prever seu dimensionamento, pois representa capital investido e inoperante (Dias, 1993).

Para dimensionar o estoque mínimo citado acima deve-se ter sempre as informações básicas de tempo de reposição, isto é, o tempo entre o pedido e a chegada efetiva de componentes no estoque. Este tempo de reposição pode ser descrito como a soma dos seguintes tempos:

- Tempo de emissão do pedido: é o intervalo de tempo entre a emissão do pedido de compra pela empresa até o pedido chegar ao fornecedor.
- Tempo de preparação do pedido: é o intervalo de tempo que o fornecedor leva para fabricar, separar e emitir o faturamento dos pedidos até deixá-los em condições de transporte. O tempo de preparação não necessariamente está posicionado após o tempo de emissão conforme apresentado na Figura 2.9.
- Tempo do transporte: é o intervalo de tempo entre a saída do fornecedor até o recebimento dos pedidos.

Estes tempos estão representados no gráfico dente de serra através da Figura 2.9.



Fonte: (Dias, 1993).

Figura 2.9: Gráfico dente de serra com tempo de reposição ( $T^*$ ) e ponto de pedido ( $P_p$ ) para a reposição de componentes em estoque.

### 2.5.5. Lote Econômico

Para se determinar o tamanho do lote de compra ou de fabricação necessário para suprir a demanda prevista durante o período de produção é necessário analisar os custos envolvidos no sistema de reposição de componentes em estoque. O melhor lote de reposição, conhecido como lote econômico, será aquele que minimiza os custos totais de estoque. No seu cálculo, comumente, utilizam-se as situações descritas a seguir:

- A entrega do lote de componentes é feita de uma única vez.
- A entrega do lote é feita de forma parcelada.

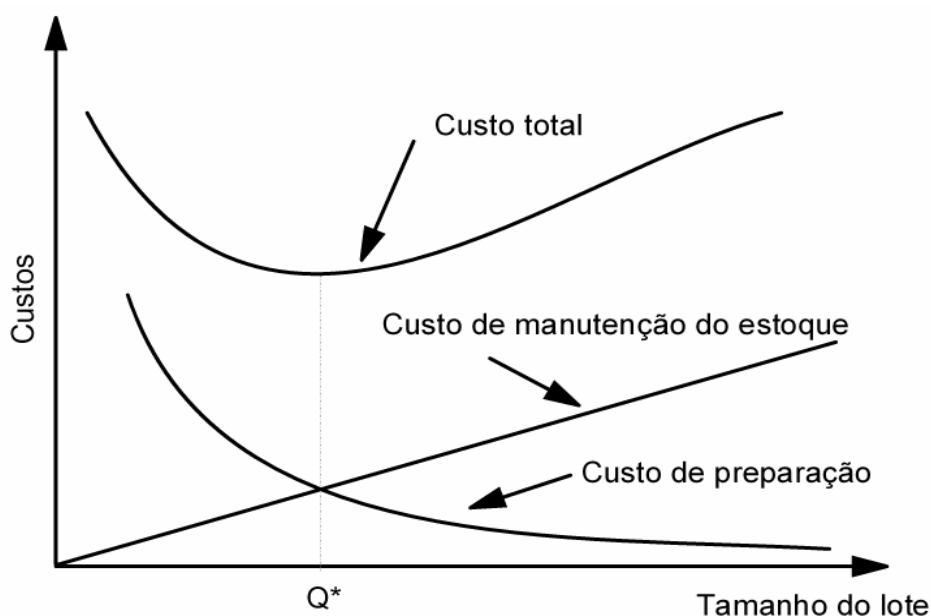
Os custos relacionados ao lote de reposição de componentes para compra, fabricação ou armazenagem, irão determinar o tamanho do lote econômico adequado (Tubino, 2000). Estes custos são definidos como:

- Custo de Preparação: são os custos relacionados com o processo de reposição de componentes através da compra ou fabricação do lote de componentes. A sua composição é feita pelos seguintes custos: de materiais, de equipamentos e mão de obra utilizados na confecção de ordens de compra ou fabricação, custos indiretos do departamento de

compras, custos administrativos. No caso da fabricação de componentes, adiciona-se o custo relativo à preparação dos equipamentos produtivos.

- Custo de manutenção do estoque: são custos que têm sua origem no sistema produtivo, isto é, quando há necessidade de se estocar componentes para manter o fluxo de produção. Estes custos estão relacionados com: deterioração e obsolescência dos componentes em estoque, mão-de-obra para armazenagem e manutenção dos componentes, capital investido e gasto administrativo com estoque.

Na Figura 2.10, observa-se que o melhor lote de reposição (lote econômico) será aquele definido pelo ponto  $Q^*$  onde o custo total da quantidade de componentes pedida ou fabricada é mínimo. Nesta figura, consideram-se as hipóteses argumentadas na subseção 2.5.4, ou seja, a demanda e o custo unitário de fabricação ou de compra é fixo, não há incertezas nas operações produtivas, a reposição do estoque é feita de uma única vez e considera-se somente um período produtivo. Através dos argumentos mencionados pode-se concluir que, a reposição de componentes em estoque ( $Q$ ) existente no gráfico dente de serra é o próprio lote econômico.



Fonte: (Tubino, 2000).

Figura 2.10: Gráfico de composição dos custos para manter o estoque.

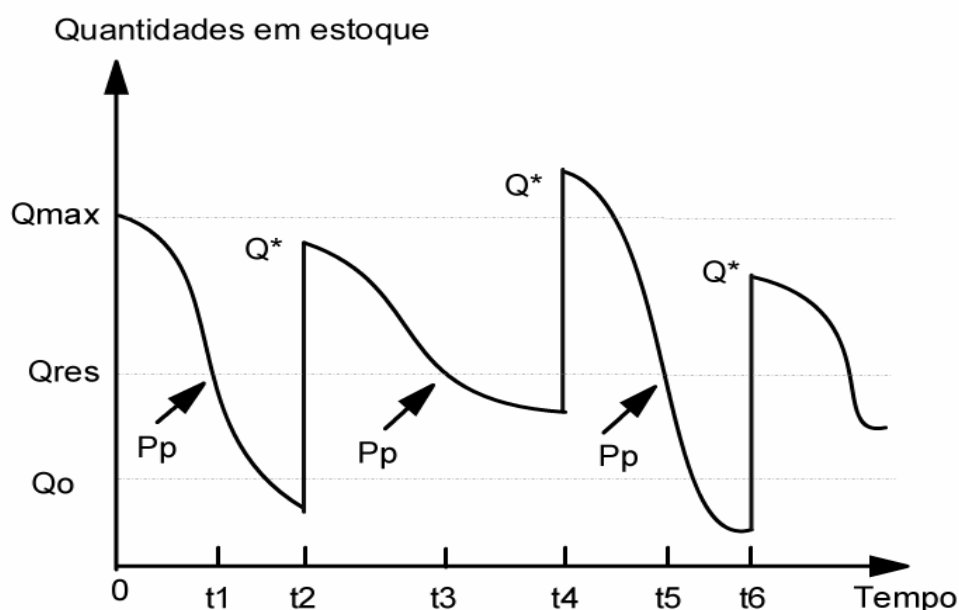
### 2.5.6.

#### Sistema de Reposição Contínua e Reposição Periódica

O controle de estoque baseado no sistema de reposição contínua apresenta as seguintes características:

- Os componentes em estoque têm monitoramento contínuo.
- O pedido para reposição através de fabricação ou compra é feito toda vez que o estoque atinge o ponto de pedido ( $P_p$ ).
- A quantidade de componentes para a reposição (exemplificada na Figura 2.11) é sempre constante, geralmente assumida igual ao lote econômico.

Por necessitar de um acompanhamento constante da posição de estoque, o seu custo administrativo é alto e com isto, a sua utilização é justificada quando o estoque possuir muitos componentes de alto custo relativo, como os da classe A e B no Custo ABC.



Fonte: (Moreira, 1993).

Figura 2.11: Gráfico de reposição contínua.

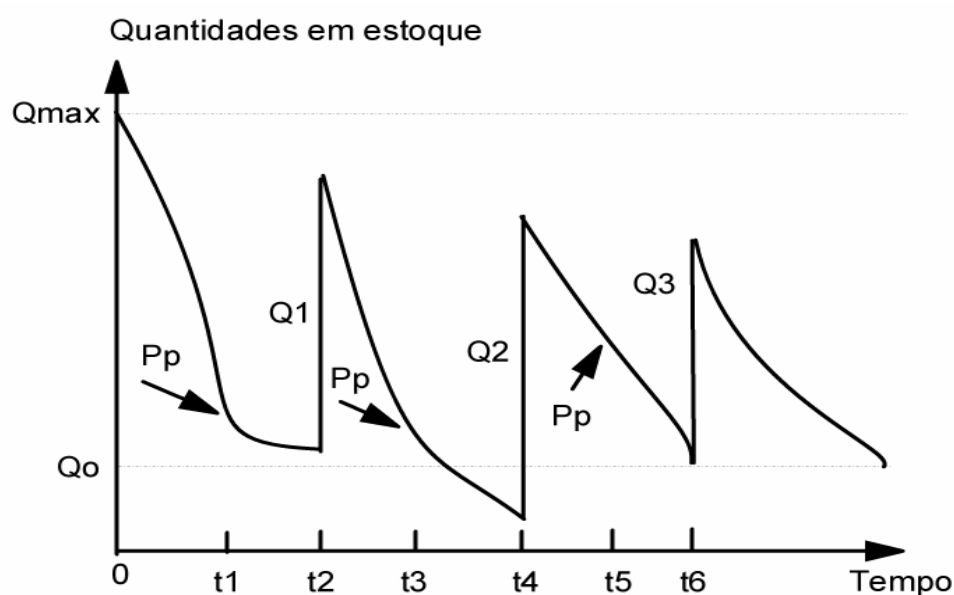
A Figura 2.11 apresenta um exemplo do sistema de reposição contínua. Nesta figura,  $Q_0$  é o estoque de segurança ou mínimo,  $Q_{res}$  é o valor para o pedido de reposição em estoque,  $Q^*$  é o lote econômico e a sua reposição em estoque é feita de uma única vez com valor constante,  $Q_{max}$  é o valor máximo para o estoque e  $P_p$  é o ponto de pedido de reposição. Através deste gráfico, verificam-se alguns aspectos relacionados com a gestão de estoques. Nos intervalos de tempo  $[t_1, t_2]$  e  $[t_5, t_6]$  nota-se uma queda acentuada na posição de

estoque devido a uma grande demanda após o ponto de reposição. Neste caso, a presença do estoque de segurança é importante para evitar a ruptura de estoque. No intervalo  $[t_3, t_4]$  nota-se um aumento no tempo de entrega de produtos. Neste mesmo período (e neste exemplo) nota-se uma diminuição da demanda. As duas ocorrências simultâneas levarão à não necessidade de utilização do estoque de segurança. Entretanto, o valor máximo de estoque foi ultrapassado implicando em custos adicionais para manter o estoque.

A seguir, aborda-se o controle de estoque baseado no sistema de reposição periódica. Este sistema apresenta como característica o monitoramento periódico da posição de estoque em função do tempo, ou seja, estabelecendo-se datas em que são analisados os estoques e o comportamento da demanda. Três características definem este tipo de sistema:

- A revisão e a reposição do estoque é realizada em intervalos fixos.
- A quantidade do lote de reposição deve ser suficiente para satisfazer a demanda até a próxima revisão mais o tempo de reposição do estoque.
- Uma certa quantidade variável de reposição é pedida, de modo a levar a posição de estoque a um valor máximo.

Por necessitar de acompanhamento em intervalos de tempo definidos seu custo administrativo é baixo se comparado com a reposição contínua. Com isto, a sua utilização é justificada quando em estoque possuir componentes de baixo custo relativo, como o da classe C no Custo ABC.



Fonte: (Moreira, 1993).

Figura 2.12: Gráfico de reposição periódica.

A Figura 2.12 contém um exemplo do sistema de reposição periódica. Nesta figura,  $Q_0$  é o estoque de segurança ou mínimo,  $Q_i$  com  $i = 1, 2, 3$  é a reposição de componentes em estoque que pode assumir valores distintos em função do tamanho do lote de reposição e  $P_p$  é o ponto de pedido de reposição. Através deste gráfico, verificam-se alguns aspectos relacionados com a gestão de estoques. Nota-se os pontos de pedido de reposição  $t_1$ ,  $t_3$  e  $t_5$  estão eqüidistantes. O valor da reposição  $Q_i$  pode apresentar variação. Por isso, não há lote econômico. O seu cálculo está baseado na diferença entre o valor máximo de estoque e a posição de estoque no momento em que é feito o pedido. No intervalo  $[t_3, t_4]$  nota-se um aumento no tempo de entrega de produtos em relação a  $[t_1, t_2]$  e  $[t_5, t_6]$ . Neste mesmo período (e neste exemplo) nota-se uma pequena diminuição da demanda. As duas ocorrências simultâneas levarão à necessidade de utilização do estoque de segurança evitando assim a ruptura do mesmo.

### 2.5.7.

#### Planejamento das Necessidades Materiais (*MRP*)

O *MRP* (*Planejamento das Necessidades Materiais*) tem como objetivo fazer a conversão da previsão de demanda de um componente de estoque com demanda independente em uma programação das necessidades, isto é, datas e quantidades de componentes de demanda dependente em relação ao componente anterior. O ponto de partida é a data e a quantidade da demanda do produto final. Esta desagregação ou decomposição do produto final em suas partes componentes é chamado de explosão das necessidades materiais. As quantidades de componentes necessários para a produção do produto final devem ser compradas, fabricadas ou montadas em uma determinada data tal que, estejam disponíveis no momento exato de sua utilização.

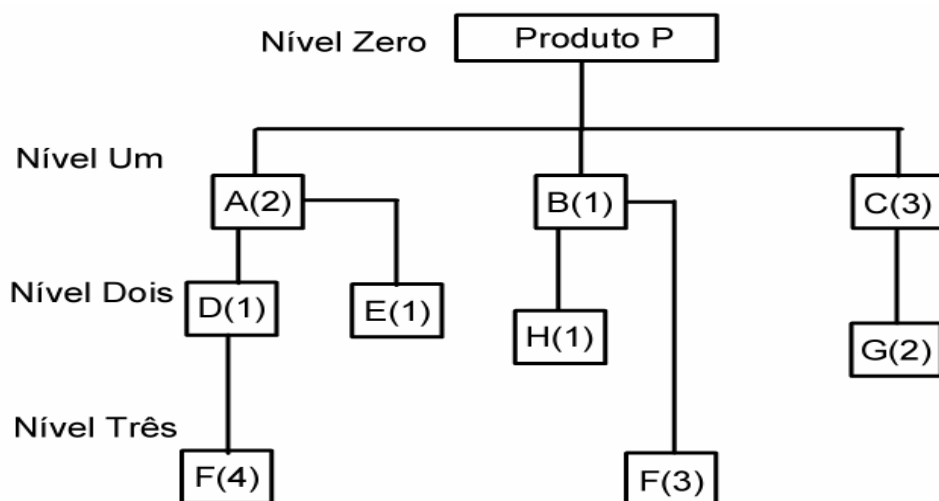
Assim o *MRP* é visto como um sistema de controle de componentes de demanda dependente. Deste modo, o sistema tende a evitar a manutenção de estoques, a não ser nos casos destinados às incertezas inerentes ao sistema, como o estoque de segurança (Moreira, 1993). Como subsídios para a sua operação, o *MRP* necessita de resultados dos seguintes processos:

- Plano Mestre de Produção (*PMP*): o seu objetivo é estabelecer quais produtos devem ser feitos e em que datas. Por sua vez, o *PMP* necessita de informações de outras partes do ambiente produtivo para a sua operação. São informações tais como: necessidade de estoques de segurança, carteira de pedidos dos clientes, demanda dos pontos



de distribuição, entre outros. O tempo de operação do *PMP* é de médio prazo e deve cobrir todo o tempo de espera envolvido para a produção do componente. É uma ferramenta fundamental na operação do *MRP*, na determinação do quanto de cada componente de demanda dependente deve ser adquirido e quando deve ser programada a produção para atender o componente de demanda independente (produto final).

- **Lista de Materiais:** é uma lista estruturada de todos os componentes que estão na composição final de um produto. O seu objetivo é mostrar uma estrutura hierárquica do produto e de seus componentes, visando a quantidade de componentes necessários para a unidade de produto final. A estrutura hierárquica é também conhecida com árvore de estrutura do produto.
- **Relatórios de controle de estoque:** o seu objetivo é controlar o comportamento e o estoque do componente que está na lista de materiais, determinando quando será necessário adquirir este componente. Usualmente, este controle possui o tempo de espera (de reposição), a posição atual do estoque, o tamanho do lote de compra entre outros dados e deverá estar sempre atualizado de forma a facilitar o desempenho do *MRP*.



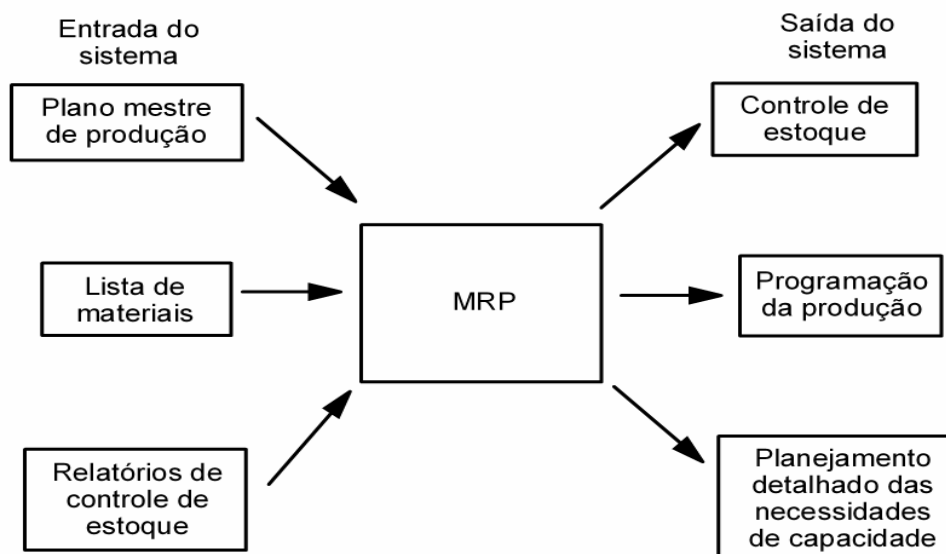
Fonte: (Moreira, 1993).

Figura 2.13: Árvore de estrutura do produto.

A Figura 2.13 contém um exemplo de árvore de estrutura do produto. Nesta figura, a árvore de estrutura do produto é numerada de forma crescente. O nível zero corresponde ao produto final. Já no nível um, este produto é

decomposto em seus respectivos componentes que formam o produto final. No nível dois os respectivos componentes que formam os componentes do nível um e assim sucessivamente até o último componente necessário ao produto final. O número relacionado entre parênteses indica a quantidade de componentes que são necessários para formar uma unidade de um componente hierarquicamente superior. Como exemplo, tem-se que são necessários quatro componentes F para formar um componente D, um componente D com um componente E forma um componente A que, por sua vez são necessários dois componentes A na composição do produto final.

Como resultado de suas operações, o *MRP* envia informações para os seguintes processos: controle de estoque dos componentes, programação da produção de curto prazo para os componentes e planejamento detalhado das necessidades de capacidade em nível mais acurado do que o definido no planejamento agregado. A Figura 2.14 apresenta as entradas e saídas do sistema *MRP*.



Fonte: (Moreira, 1993).

Figura 2.14: Operação do *MRP* com as entradas e saídas do sistema.

### 2.5.8.

#### Determinação do Estoque de Segurança

O estoque de segurança foi definido na seção 2.4, e o seu objetivo principal é proteger o sistema produtivo contra as incertezas de demanda e dos parâmetros que tratam da reposição de componentes. Por exemplo, o *lead time* de entrega ou de fabricação. Durante o período de incerteza o estoque de segurança pode acabar e gerar problemas na produção ou no atendimento ao cliente. Neste caso, o sistema de reposição de estoque quer seja, contínuo ou

periódico torna-se incapaz de operar com segurança. Portanto, quanto maior a incerteza, maior deve ser o estoque de segurança projetado.

Usualmente a determinação do estoque de segurança, considera o custo de manutenção e o custo de falta de componentes, ou seja, quanto maior for a necessidade de atendimento ao cliente maior será o investimento financeiro em estoque de segurança. Na prática os gestores de estoques nem sempre dispõem de grande capital para ser investido. Neste caso, há necessidade de se tomar decisões considerando o risco que deve ser assumido quando faltam componentes em estoque. Este risco, é função de quantas faltas podem ser assumidas durante um período produtivo e é comumente conhecido como nível de serviço. Por exemplo, se considerarmos um sistema de reposição que permita três faltas dentro de um período produtivo de doze meses o nível de serviço calculado é de 75%. Segundo (Corrêa *et al.*, 2001), as incertezas no *lead time* podem ser modeladas, por exemplo, através de uma distribuição Normal. Entretanto, outras distribuições tais como Poisson, Uniforme, Student e etc podem também ser utilizadas. As distribuições, teriam como média o valor esperado para o *lead time* e o desvio padrão estaria relacionado ao nível de serviço. Neste contexto em (Evers, 1999), discute-se a determinação do estoque de segurança baseado no nível de serviço do cliente e no desvio padrão da demanda durante o *lead time* de entrega ou fabricação. Uma formulação matemática foi apresentada para o estoque de segurança, considerando um fator de segurança baseado no nível de serviço para o cliente e o desvio padrão da demanda é composto dos parâmetros de média do *lead time*, do desvio padrão da demanda e do *lead time* durante o período produtivo e na média da demanda. O valor médio da distribuição normal está associado com o *lead time* e o desvio padrão com o nível de serviço.

#### **2.5.9.**

##### **Parâmetros não Clássicos na Gestão de Estoques**

Na seção 2.5, até o presente momento, foram destacados os principais parâmetros utilizados na política clássica de gerenciamento de estoque em ambiente produtivo. Nesta subseção apresentam-se trabalhos recentes que utilizam parâmetros não clássicos no gerenciamento de estoques.

A previsão futura da demanda para produtos finais tem sido utilizada como ferramenta na gestão de estoques. Uma análise entre a acuracidade da previsão futura de demanda e o estoque de produtos finais é abordado em (Schwitzky, 2001). Neste trabalho, destaca-se que empresas que atendem aos clientes e

executam o seu planejamento baseado em previsão de demanda necessitam de métodos confiáveis, para auxiliar a tomada de decisão. Caso a previsão não seja confiável, impactos na produção podem superdimensionar os estoques implicando em custos de monitoramento ou provocar a falta de produtos gerando custos e penalidades, como atraso nas entregas e não atendimentos aos clientes. Nesta mesma linha (Oliveira, 2002), propõe uma metodologia para ajudar na solução da questão do controle de estoques na empresas em geral, contribuindo para a otimização de seus processos, reduzindo custos e liberando espaços ociosos nos estoques. Para tanto, destaca-se a utilização da metodologia Box e Jenkins de previsão de séries temporais com base em dados passados, a demanda é projetada e esta previsão é utilizada na gestão dos estoques. Uma outra abordagem que trata do problema de gerenciamento de estoques é encontrada em (Fiorioli & Fogliatto, 2001) (Fiorioli & Fogliatto, 2002). Neste trabalho, um modelo estocástico orientado para maximização dos níveis de serviço (parte da demanda atendida com o estoque disponível no local onde o pedido é colocado) e a minimização dos estoques de um *SHE* (Sistemas Hierárquicos de Estoque) foram propostos. *SHEs* são caracterizados pela estocagem dos produtos em vários locais do sistema e pela relação de hierarquia existente entre estes locais. Na sua composição há um estoque central localizado no nível superior, com a finalidade de abastecimento para o nível imediatamente inferior, e é abastecido por fontes externas. Os estoques localizados nos níveis inferiores são demandados por fontes internas, de um nível inferior ou por fontes externas ao sistema. Então, há uma relação de interdependência entre as demandas e os níveis dos estoques na relação de hierarquia. Deste modo surge a necessidade de adotar políticas ótimas coordenadas de gerenciamento de estoques, de modo a envolver todos os níveis inseridos no sistema. Como solução, é proposta a otimização de um modelo que estabelece os níveis de estoque alvo, os pontos de reposição de estoques, os níveis de serviços oferecidos aos consumidores finais e o nível ótimo global dos estoques.

## 3

**Dinâmica de Sistemas em Ambientes Produtivos**

*Este capítulo descreve a modelagem de ambientes produtivos formados por cadeia de suprimentos. Inicialmente caracteriza-se o sistema e apresenta-se a metodologia SD. Discute-se o comportamento de um ambiente IOBPCS com um único componente e um nível produtivo dentro da abordagem SD. A análise deste caso é estendida no Anexo A para o problema de amplificação de demanda. Na seqüência, a utilização de SD para uma cadeia de suprimentos com um componente e três níveis produtivos (manufatura, distribuição do componente e mercado varejista) é apresentada. Finalmente, faz-se a modelagem de um ambiente produtivo IOBPCS em tempo discreto, composto de um nível produtivo e um único componente. Esta modelagem se caracteriza pela representação explícita da incerteza na demanda de componentes do sistema.*

A trajetória descrita pela posição dos componentes em estoque de um ambiente produtivo a cada instante de tempo corresponde ao comportamento dinâmico deste ambiente. Este ambiente produtivo é um sistema.

Sistema é formalmente definido (Haykin & Van Veen, 2001) como uma entidade que manipula um ou mais sinais (ou variáveis) para realizar uma operação. Dinâmica de Sistemas são sistemas cujas variáveis variam em função do tempo e podem ser representados por equações diferenciais e/ou às diferenças (Oppenheim *et al.*, 1997). Sua utilização tem demonstrado ser uma útil ferramenta de análise em diversos campos da engenharia e modelos dinâmicos de sistemas são encontrados em áreas como cadeia de suprimentos (Minh, 2002), fabricação e indústria (Brandolese & Cigolini, 1999), processos químicos (Luyben, 1989), sistemas de potência (Gustavsen & Semlyen, 1999), mecatrônica e robótica (Craig & Knight, 1989), gerenciamento (Coyle, 1977), entre outras (Hemerly, 2000). Nesta análise, é fundamental o conhecimento das equações que modelam a dinâmica do sistema, cuja variável independente é o tempo e pode assumir valores contínuos ou discretos.

A análise da dinâmica de ambientes produtivos pode ser classificada em função de diferentes aspectos (Brandolese & Cigolini, 1999). Alguns destes são discutidos a seguir:

- O ambiente produtivo pode ser mononível (um echelon) ou multinível (vários echelons) de acordo com o número consecutivo de fases

produtivas ligadas por sistemas de estoque. Por exemplo, um ambiente mononível pode ser a fase de manufatura de um componente seguida de um sistema de armazenamento.

- O sistema pode ser mono ou multicomponente, de acordo com a diversificação de componentes presentes no ambiente produtivo.
- Restrições de capacidade produtiva podem ser ou não explicitamente consideradas na análise da dinâmica do sistema produtivo. Se estas não forem consideradas, métodos clássicos da teoria de sistemas lineares com realimentação podem ser utilizados. Entretanto, se estas forem consideradas explicitamente, o sistema torna-se não linear.
- As decisões a serem tomadas em alguns ambientes produtivos estão diretamente relacionadas com a demanda de mercado. Isto quer dizer que o sistema de reposição utilizado está em malha aberta. Em outros casos, as decisões a serem tomadas consideram também a posição de estoque. Neste caso, o sistema de reposição é composto de uma parte em malha aberta referente à demanda e outra em malha fechada referente à posição de estoque.
- As fases de produção (i.e., manufatura, distribuição, entrega, etc) são freqüentemente modeladas como um sistema de primeira ordem (Towill, 1982) (Towill & Del Vecchio, 1994) (Disney *et al.*, 2000) ou como um atraso puro (Pacheco *et al.*, 2002) (Pacheco & Oliveira, 2003 a, b) (Oliveira & Pacheco, 2003). Nestes casos, a constante de tempo do sistema e o valor do atraso representam o *lead time* da fase produtiva.
- A dinâmica do sistema produtivo pode ser modelada usando equações diferenciais, isto é, enfoque em tempo contínuo com utilização da Transformada de Laplace. Pode também ser modelada usando equações a diferenças, neste caso, o enfoque é em tempo discreto com utilização da Transformada Z.
- O índice de desempenho do sistema produtivo pode ser medido em função da posição de estoque ou através de uma combinação da quantidade de reposição com a posição do estoque. Entretanto, outros critérios também medem o desempenho do sistema produtivo através de indicadores internos tais como: custo de pedido, custo de estoque e armazenagem, custo de transporte, giro de estoque em dias, componentes perdidos (quebra ou validade vencida) e componentes faltantes (ruptura de estoque) (Quintão *et al.*, 2003).

- O sinal de entrada considerado no ambiente produtivo é a demanda de mercado que, usualmente, é modelada por um sinal degrau ou por uma senoide. Sinais estocásticos podem também ser adicionados no sentido de estudar o comportamento dinâmico do sistema sob condições mais próximas do real.

De um modo geral, descreve-se um modelo para o ambiente produtivo a fim de facilitar a análise do comportamento dinâmico do sistema frente a incertezas relacionadas com tempo de manufatura/entrega/montagem e/ou previsão de demanda, além de restrições operacionais do sistema. O objetivo aqui é a proposta de estratégias de reposição em estoque que minimizam custos e melhoram o desempenho do ambiente produtivo.

Neste capítulo, apresenta-se a metodologia *SD* e descrevem-se os passos necessários da *SD* para a construção de um ambiente produtivo tipo IOBPCS. Este ambiente produtivo atende a qualquer gestão de demanda (*ATO*, *MTO*, *MTS*, *ETO*, *PTO*, etc.). O ambiente produtivo analisado é composto de um estágio (estágio é considerado a união de uma fase produtiva com um sistema de armazenagem. Nível é considerado a união de um estágio com um sistema de gestão para a geração da ordem de produção para a fase produtiva e está sob ação de demanda do mercado) é monocomponente e mononível. A fase produtiva pode ser de manufatura, entrega ou montagem de componentes. O sistema de armazenagem pode também ser composto de um estoque de segurança, de um estoque estratégico ou ambos. A metodologia *SD* é exemplificada usando sistemas em tempo contínuo, isto é, modelos formados por equações diferenciais. A fase produtiva é representada por um atraso puro e o sistema de armazenagem por um integrador representando o acúmulo de componentes. Neste tipo de problema, a tomada de decisão é feita em função do sinal de controle (pedido de reposição) feito para a fase produtiva (manufatura) e o desempenho do sistema produtivo é avaliado através dos resultados de simulação (utilizando MATLAB/SIMULINK) obtidos em relação a posição de estoque e dos pedidos de reposição. O pedido de reposição de um nível produtivo pode ser visto como a demanda para o nível subsequente de uma cadeia de suprimentos. Em seguida, uma cadeia de suprimentos é analisada para os níveis varejistas, do distribuidor e de fabricação utilizando os critérios para um nível IOBPCS e replicando para os níveis subsequentes. Neste caso, destaca-se o efeito chicote na cadeia de suprimentos. Finalmente, apresenta-se um ambiente produtivo sob as mesmas condições de operações descritas

anteriormente, porém com foco em tempo discreto utilizando a Transformada Z. Neste caso, o ambiente produtivo é modelado por equações a diferenças e propõe-se a representação explícita do erro de previsão da demanda na equação do modelo. Equações de previsão da posição de componentes em estoque, para um passo e  $j$  passos à frente são derivadas com o objetivo de antecipar o comportamento de um horizonte futuro para o sistema produtivo.

Assim sendo, neste capítulo aborda-se a modelagem e o gerenciamento de estoques em ambientes produtivos tipo IOBPCS. Na Seção 3.1, descreve-se a metodologia *SD*, aplicada ao problema de gestão de estoques. Na Seção 3.2, ilustra-se, através de um modelo de cadeia de suprimentos composto de três níveis, o gerenciamento de estoques utilizando *SD* e o fenômeno de amplificação de demanda. Na Seção 3.3, propõe-se um modelo dinâmico de ambiente produtivo IOBPCS para gestão de estoques em sistemas monocomponente utilizando sistemas em tempo discreto. Deriva-se as equações de previsão do comportamento do sistema um passo e  $j$  passos à frente.

### 3.1.

#### **Abordagem Dinâmica Industrial / Dinâmica de Sistemas**

Uma das primeiras aplicações dos conceitos de *ID* em manufatura foi realizada na *Sprague Electric Company*, com o objetivo de estudar e melhorar a planta operacional (através do dimensionamento dinâmico da estrutura produtiva e de suas subestruturas em sistemas de malha fechada) em uma linha de produto de componentes eletrônicos de alta qualidade (Fey, 1962). A *ID* passa então a fazer parte das estratégias corporativas com o dimensionamento das estruturas e subestruturas operacionais de toda a corporação. Um período de reformulação, adaptação e consolidação dos conceitos sobre a teoria geral de sistemas influenciam nos estudos sobre *ID* e programas educacionais experimentais foram criados no sentido de tornar os conceitos sobre dinâmica acessível aos estudantes de gestão (Forrester, 1964). A partir da consolidação e diversificação da *ID*, sua aplicação torna-se relevante em outras áreas como por exemplo: engenharia, medicina, psicologia e economia (Forrester, 1975). Em períodos mais recentes, que abrange as décadas de 80 e 90, os conceitos de *ID* são relacionados a dinâmica de sistemas e esta metodologia passa a ser referenciada como *System Dynamics* ou *SD*. Sua implementação torna-se de grande importância nas aplicações industriais, que envolvem os conceitos de sistemas de controle realimentados na produção (Towill, 1982) ou na cadeia de



suprimentos (Towill & Del Vecchio, 1994). Estudos sobre a aplicação dos conceitos de dinâmica de sistemas em problemas de gerenciamento de estoque em ambiente produtivo são abordados em (Brandolese & Cigolini, 1999) (Disney *et al.*, 2000) e (Disney & Towill, 2002) e na análise do efeito chicote (Khator & Desmukh, 2002).

A metodologia *System Dynamics* está baseada em alguns passos que devem ser seguidos durante o processo de determinação do sistema a ser analisado e da construção/simulação do modelo matemático (Forrester, 1961). A seguir descreve-se estes passos:

- i) Identificar qual é o tipo de problema presente no ambiente produtivo que será analisado.
- ii) Determinar as interações entre os processos ou blocos que compõem a estrutura do sistema produtivo a ser analisado.
- iii) Montar o diagrama de causa e efeito das informações do sistema em malha fechada, unindo as decisões com as ações.
- iv) Formular uma política de decisão aceitável, baseada no resultado do fluxo de informação.
- v) Construir o modelo matemático composto das políticas de decisão, das informações obtidas e das interações entre os processos do sistema.
- vi) Gerar o comportamento do sistema ao longo do tempo e assim obter os resultados simulados.
- vii) Comparar os resultados obtidos através da simulação e do comportamento real do sistema.
- viii) Rever o modelo constantemente até que se aproxime do comportamento real.
- ix) Fazer um novo projeto da estrutura organizacional do sistema baseado nas relações estruturais, subestruturais e na política de decisão de modo obter a melhoria do sistema inicial.
- x) Alterar o sistema real em função das informações obtidas na simulação e observar a melhoria de performance.

A utilização desta metodologia na análise e simulação de um ambiente produtivo tipo IOBPCS é abordada na seção a seguir.

### 3.1.1.

#### Modelagem do Ambiente Produtivo IOBPCS (Enfoque Tempo Contínuo)

Nesta subseção apresenta-se um modelo dinâmico de gestão de estoques com controle de produção baseado em demanda conhecido por IOBPCS. Neste caso, o sistema produtivo é modelado por equações diferenciais em tempo contínuo e utiliza-se a transformada de Laplace em todas as equações e sinais. Este ambiente produtivo pode ser definido como um sistema onde o pedido de reposição (ordem de produção) é uma função da previsão de demanda e do erro entre o objetivo e a posição de estoque. A fase de produção é modelada por um atraso puro representando o *lead time* da fase produtiva. A análise apresentada na montagem do IOBPCS está baseada nos passos descritos para a implementação da metodologia de *System Dynamics*.

- i) O problema a ser dimensionado e analisado é o do gerenciamento de estoque em função da ordem para manufatura em um nível produtivo de um ambiente produtivo monocomponente (IOBPCS).
- ii) A estrutura do sistema produtivo (IOBPCS) pode ser dimensionada através dos processos ou blocos descritos a seguir: previsão de demanda, ordem de produção, produção de componentes e sistema de armazenagem (estoque). Na Figura 3.1, apresentam-se as interações da estrutura do sistema produtivo IOBPCS.

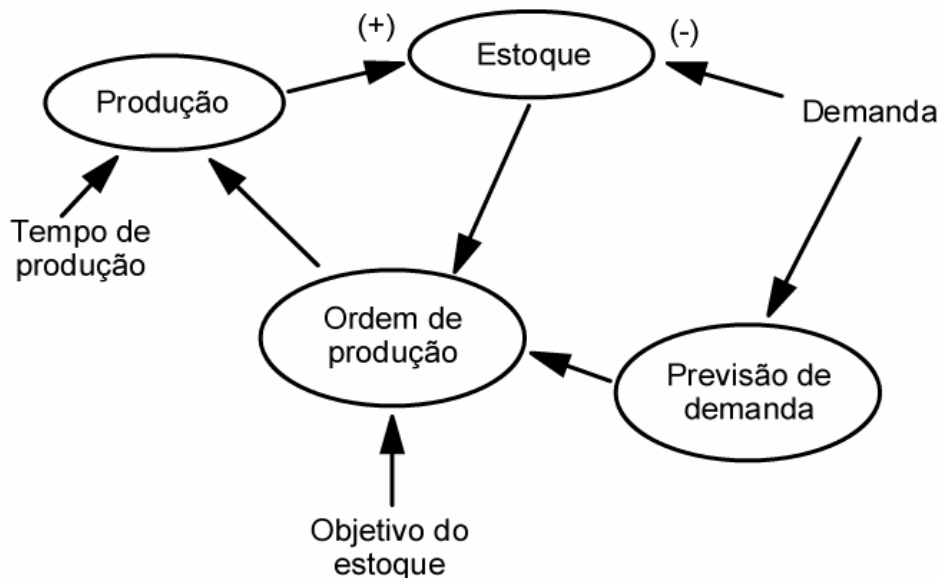


Figura 3.1: A estrutura e o diagrama de causa e efeito do fluxo produtivo de um nível IOBPCS.

- iii) A relação de causa e efeito entre os processos também é apresentada na Figura 3.1. Nesta figura, observa-se que a previsão de demanda é uma

função direta da demanda de mercado, cujo objetivo é antecipar informações para a produção sobre o comportamento de mercado evitando o excesso ou a falta de componentes em estoque. A ordem de produção ou pedido de reposição é função das informações obtidas sobre o objetivo do estoque, isto é, o valor desejado para o número de componentes em estoque, da posição atual de estoque e da previsão de demanda. Assim a decisão enviada a produção de quanto se deve produzir refletirá a situação atual do sistema (objetivo de estoque e posição de estoque) e a situação futura (demanda futura). Com base no pedido de reposição e após o *lead time* de produção tem-se o abastecimento do estoque, que está sujeito as ações da demanda de mercado. Deste modo, procura-se manter uma determinada posição de estoque, de modo atender ao mercado consumidor sem que haja ruptura ou excesso no seu abastecimento. Observa-se também nesta figura uma representação do fluxo de informação e de materiais. O fluxo de informação é representado pela previsão de demanda, que gera uma ordem de produção. O fluxo de materiais é representado pela produção abastecendo o sistema de armazenagem.

- iv) A política de tomada de decisão está relacionada com o sinal de controle gerado, isto é, a ordem de produção. É calculada em função da posição, do objetivo do estoque e da previsão da demanda. Este sistema pode ser visto como uma composição de uma alimentação direta (*feedforward*) e uma realimentada (*feedback*). A *feedforward* é parte da ordem de produção que é função da previsão da demanda. Já a *feedback* é a parte que é função da posição atual de estoque.
- v) Após o dimensionamento do diagrama de causa e efeito e da política de tomada de decisão, necessita-se criar um modelo matemático. A seguir modelos em tempo contínuo para cada processo são descritos. Para tanto, os seguintes sinais são definidos:  $y(t)$  representa a posição atual de estoque,  $d(t)$  a demanda de mercado e  $p(t)$  a reposição de componentes. A relação entre estes sinais é dada pela seguinte integral:

$$y(t) = \int_0^t (p(v) - d(v)) dv + y(0) \quad (3.1)$$

onde  $y(0)$  é o valor inicial do número de componentes armazenados em estoque. Por sua vez, a reposição de componentes em um dado instante

de tempo  $t$  é função de uma ordem de produção ( $u(t)$ ) realizada no passado isto é:

$$p(t) = u(t - \tau) \quad (3.2)$$

onde  $\tau$  representa a diferença de tempo existente entre a colocação de uma ordem de produção e da efetiva chegada do componente no estoque, isto é, o *lead time* produtivo. A ordem de produção é função do objetivo do estoque (definido aqui por  $w(t)$ ), da posição atual de estoque e da previsão de demanda  $\hat{d}(t)$ . Esta função pode ser definida por: “o pedido de reposição é igual à quantidade que falta de produtos em estoque para chegar ao valor de referência somada com a previsão de retirada de componentes em estoque”. Isto é equivalente a:

$$u(t) = K_c(w(t) - y(t)) + \hat{d}(t) \quad (3.3)$$

onde  $K_c$  é um parâmetro de projeto. A previsão da demanda pode ser modelada através da seguinte equação diferencial:

$$T\dot{\hat{d}}(t) + \hat{d}(t) = d(t) \quad (3.4)$$

onde  $T$  é uma constante de tempo que representa a velocidade na qual o sinal  $\hat{d}(t)$  acompanha a entrada  $d(t)$  (quanto menor for  $T$ , maior é a capacidade do sinal de previsão acompanhar variações de alta frequência na demanda). Através da Transformada de Laplace, pode-se obter a função de transferência de cada um dos processos descritos e  $s$  representa uma variável complexa. As funções de transferência das eq. (3.1) a (3.4) são respectivamente, dadas por :

$$y(s) = \frac{1}{s}(p(s) - d(s)) \quad (3.5)$$

$$p(s) = e^{-\tau s} u(s) \quad (3.6)$$

$$u(s) = K_c(w(s) - y(s)) + \hat{d}(s) \quad (3.7)$$

$$\hat{d}(s) = \frac{1}{Ts + 1} d(s) \quad (3.8)$$

Das funções de transferências relacionadas acima, destaca-se a eq. (3.8) de previsão de demanda que também pode ser analisada através do modelo de previsão do alisamento exponencial simples em tempo discreto. Este modelo é dado por:  $\hat{d}(z) = \alpha d(z) + (1 - \alpha)z^{-1}\hat{d}(z)$  e  $\alpha$

representa o fator de ponderação para o alisamento (Chopra & Meindl, 2001). A semelhança entre as equações em tempo contínuo e discreto é provada a seguir. Na eq. (3.8) aplica-se à transformação (*Backward Difference*) de tempo contínuo para discreto  $s = \frac{z-1}{z\Delta t}$  onde  $\Delta t$  representa o tempo amostrado (*sample time*), obtém-se:

$$\hat{d}(z) \left[ T \frac{(z-1)}{z\Delta t} + 1 \right] = d(z) \quad (3.9)$$

Rescrevendo a eq. (3.9), obtém-se a seguinte função de transferência:

$$\frac{\hat{d}(z)}{d(z)} = \left[ \frac{z\Delta t}{T(z-1) + z\Delta t} \right] \quad (3.10)$$

é o mesmo que:

$$\frac{\hat{d}(z)}{d(z)} = \left[ \frac{\frac{z\Delta t}{(T + \Delta t)}}{z - \frac{T}{(T + \Delta t)}} \right] \quad (3.11)$$

Dá equação de alisamento exponencial sabe-se que:

$$\hat{d}(z)(1 - (1 - \alpha)z^{-1}) = \alpha d(z) \quad (3.12)$$

ou

$$\frac{\hat{d}(z)}{d(z)} = \frac{z\alpha}{z - (1 - \alpha)} \quad (3.13)$$

Uma análise comparativa entre as eqs. (3.11) e (3.13) chega-se ao seguinte resultado na determinação do parâmetro  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{\Delta t}{T + \Delta t} \quad (3.14)$$

Assim, prova-se a relação existente entre o parâmetro  $\alpha$ , a constante de tempo  $T$  e o tempo amostrado  $\Delta t$ . Deste modo, a eq. (3.8) é o similar da equação de alisamento exponencial simples em tempo contínuo.

Baseado nas relações de causa e efeito descritas em (iii) e nos modelos dados pelas eqs. (3.5) a (3.8) obtém-se o diagrama de blocos que modela o comportamento do IOBPCS apresentado na Figura 3.2.

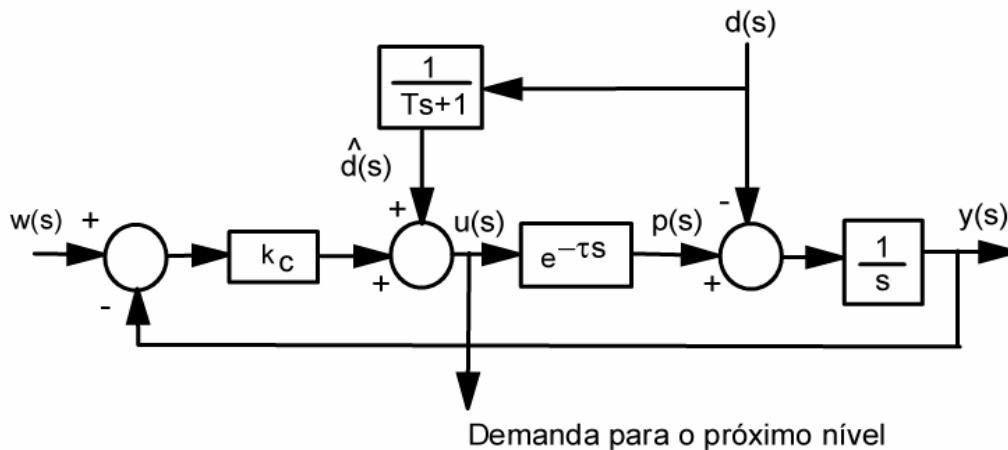


Figura 3.2: Diagrama do processo produtivo de um nível IOBPCS.

Neste sistema, o sinal  $u(t)$  (ou  $u(s)$ ) também representa a demanda dependente para o próximo nível da uma cadeia de suprimentos. Em (Oliveira & Pacheco, 2004) no Anexo A encontra-se uma análise sobre o desempenho do sistema apresentado na Figura 3.2.

- vi) A simulação do sistema produtivo IOBPCS pode ser construída utilizando o software de dinâmica de sistemas MATLAB/SIMULINK. A Figura 3.3 apresenta o diagrama do IOBPCS da Figura 3.2 em ambiente simulink.

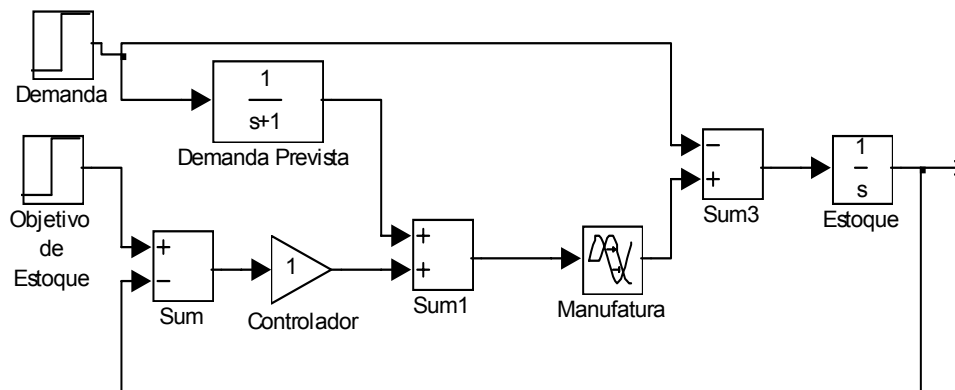


Figura 3.3: Diagrama de blocos no MATLAB/SIMULINK.

Nesta figura, para efeito de ilustração da utilização do MATLAB/SIMULINK, os parâmetros do sistema produtivo IOBPCS são determinados conforme descrito a seguir. A fase de manufatura é dada pela eq. (3.2) com *lead time* de uma semana. A previsão de demanda é modelada pela eq. (3.4) com constante de tempo igual a 1. O parâmetro de projeto do algoritmo de reposição de estoque  $K_c$  é igual a 1.

O objetivo do estoque é determinado neste exemplo conforme discutido a seguir. Conforme proposta em (Evers, 1999) o estoque de segurança pode ser dimensionado em função do desvio padrão da demanda durante o *lead time* produtivo e do nível de serviço, isto é,  $ss = n_d * \sigma$ , onde  $ss$  é o estoque de segurança,  $n_d$  é um fator de segurança baseado no nível de serviço do cliente e  $\sigma$  é o desvio padrão da demanda durante o *lead time* considerando-se uma distribuição normal. Neste exemplo, a demanda tem uma média de 11706 componentes e desvio padrão de 4743 componentes. A relação entre o nível de serviço e o fator  $n_d$  em relação a uma distribuição normal é dada pela Tabela 3.1 (Tubino, 2000).

| Nível de Serviço | Fator $n_d$ |
|------------------|-------------|
| 80%              | 0.84        |
| 85%              | 1.03        |
| 90%              | 1.28        |
| 95%              | 1.64        |
| 99%              | 2.32        |
| 99,99%           | 3.09        |

Fonte: (Tubino, 2000)

Tabela 3.1: Relação dos níveis de serviço e fator de segurança.

Admite-se que o estoque de segurança projetado possua um nível de serviço de 90%, ou seja, deseja-se que a falta de componentes em estoque esteja restrita a 10% (ou 5 faltas admitidas) durante o período produtivo. Assim usando o valor do estoque de segurança como base para o objetivo de estoque chega-se a  $ss = 1.28 \times 4743$  e  $ss = 6071.04$  componentes. Assim, assume-se  $w(t) = 6$  mil componentes. Considera-se um valor inicial para a posição de estoque igual ao objetivo de estoque, isto é, 6 mil componentes. A demanda de mercado é modelada por um sinal tipo degrau, que apresenta incertezas (modeladas por uma distribuição aleatória uniforme). A ocorrência do degrau está prevista para a 15ª semana e possui amplitude de 10 mil componentes e valor inicial de 5 mil componentes. O período produtivo analisado é de 50 semanas com ciclo de reposição de componentes de uma semana.

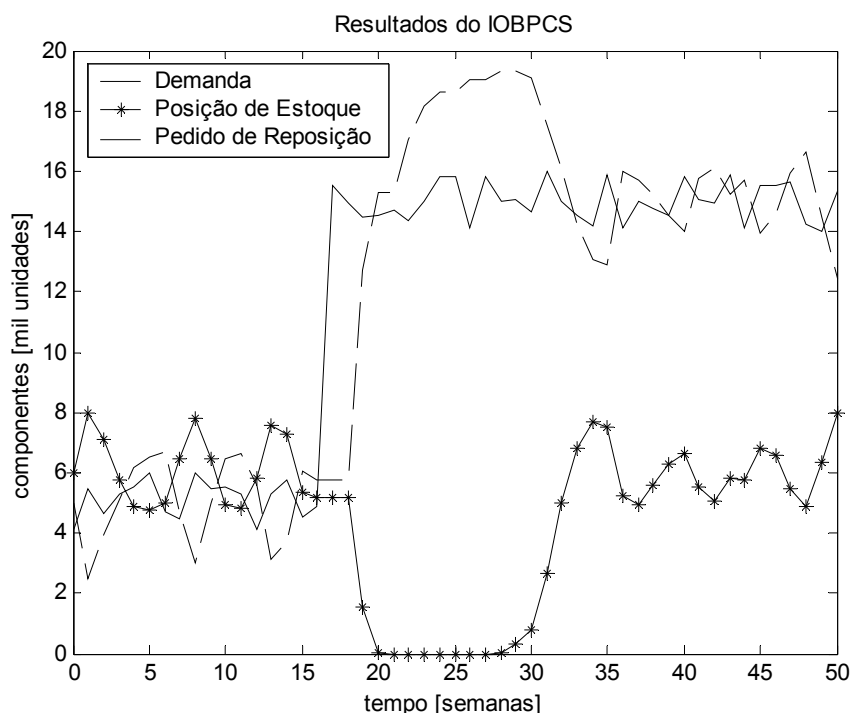


Figura 3.4: Comportamento do processo produtivo de um nível IOBPCS.

Nesta figura, observam-se dois comportamentos distintos em intervalos de tempo consecutivos. O primeiro comportamento abrange o período produtivo de 20 a 35 semanas e representa o regime transitório do sistema. Se o sistema produtivo apresentar vários níveis, o pedido de reposição em cada nível representa a demanda para o próximo nível subsequente da cadeia de suprimentos. Neste caso, o comportamento do pedido de reposição apresenta um pico que caracteriza a amplificação (sublevação) de demanda para o próximo nível da cadeia de suprimentos. Durante este período, a posição de estoque apresenta rupturas o que significa que o mercado não foi atendido em determinadas semanas. Entretanto, observa-se que o número de faltas cometidas (9 faltas) é superior a admitida (5 faltas), logo o nível de serviço está comprometido. O segundo comportamento abrange o período produtivo de 36 a 50 semanas e representa o regime permanente do sistema. Nota-se que o valor do pedido de reposição retorna para o valor da demanda do mercado e a posição de estoque retorna para o objetivo de estoque.

- vii) e viii) Estes itens da metodologia descrita na seção 3.1 não são abordados aqui devido ao fato de que este é um exemplo de simulação, não equivale a um ambiente existente no mercado.
- ix) Dentre as modificações possíveis no sistema produtivo, uma delas é a alteração da política de reposição de estoque para reduzir o efeito de



amplificação de demanda. Através da eq. (3.3), explica-se que uma redução no parâmetro do projeto afeta diretamente o comportamento do pedido de reposição, através da redução do erro entre a posição de estoque e o objetivo de estoque. Com isto, é inevitável uma redução do efeito de amplificação de demanda. Assim sendo, a seguir altera-se o valor do parâmetro do projeto  $K_c$  para 0.5, com objetivo de demonstrar a redução do efeito de amplificação de demanda para o próximo nível. A Figura 3.5 contém o comportamento do ambiente produtivo.

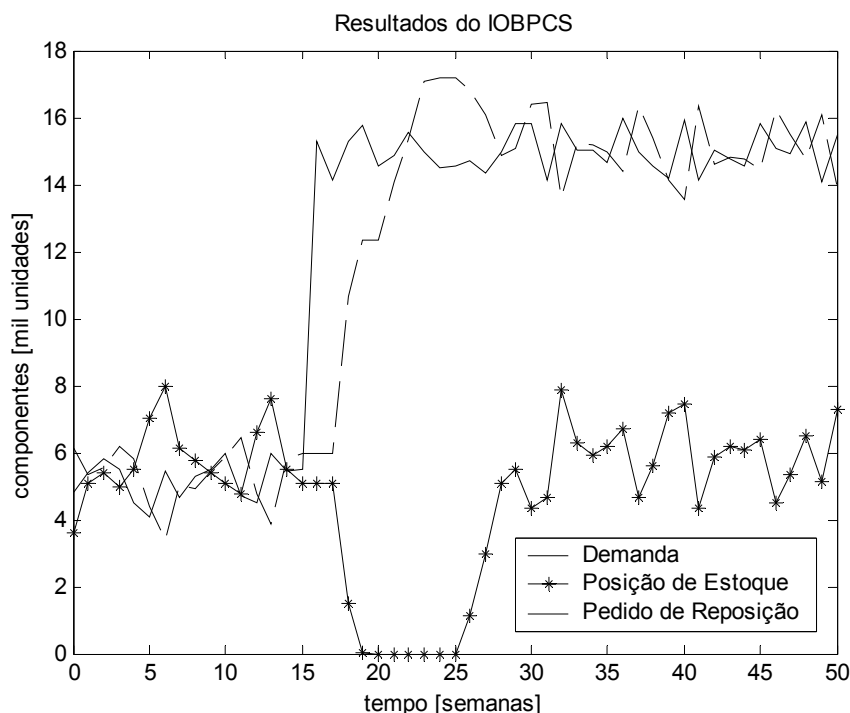


Figura 3.5: Comportamento do processo produtivo de um nível IOBPCS com redução do efeito chicote (*bullwhip*).

Na Figura 3.5, nota-se que no período produtivo de 20 a 32 semanas, uma redução da ordem de 15% no pedido de reposição (demanda para o próximo nível da cadeia de suprimentos). Neste intervalo, nota-se também uma redução de tempo no regime transitório do sistema produtivo para a reposição de componentes e posição de estoque. Entretanto, o nível de serviço não foi garantido devido ao número de faltas cometidas ser superior a admitida. No período de 33 a 50 semanas representa o regime permanente do sistema produtivo. O comportamento é semelhante a situação anterior ( $K_c = 1$ ). Portanto, tem-se que é possível reduzir o efeito chicote modificando os parâmetros da reposição de componentes.

### 3.2.

#### Dinâmica de Sistemas em Cadeia de Suprimentos

“Cadeia de suprimentos é um sistema constituído em partes de material em estoque, produção, montagem, transporte, distribuição de serviços e atendimento aos clientes, unidos através dos fluxos de materiais e de informação.” (Stevens, 1989). Comparando esta definição com o que foi descrito na seção 3.1, tem-se que uma cadeia de suprimentos pode ser vista como um ambiente de aplicação dos conceitos de *SD*. Isto se deve ao fato que, os mesmos critérios utilizados para a análise de um nível produtivo podem ser expandidos ao longo de toda a cadeia respeitando-se as estruturas operacionais dos níveis produtivos. Por exemplo, se um nível de fabricação for modelado segundo os critérios de *SD* discutidos na seção 3.1, a mesma metodologia pode ser expandida para os níveis do distribuidor e do mercado varejista.

Um dos problemas de análise dinâmica freqüentemente relacionadas com cadeias de suprimentos é o fenômeno de amplificação de demanda (efeito chicote). A Figura 3.6, ilustra o efeito chicote em uma cadeia de suprimentos composta de três níveis produtivos (varejista, distribuidor e fabricação) bem como a direção do fluxo de informação e de materiais. Nesta figura, observa-se que a amplificação da demanda é incrementada a cada elo produtivo (passagem do nível produtivo) e há um fluxo de informação no sentido consumidor para o nível de fabricação e um fluxo de materiais no sentido nível de fabricação para consumidor.

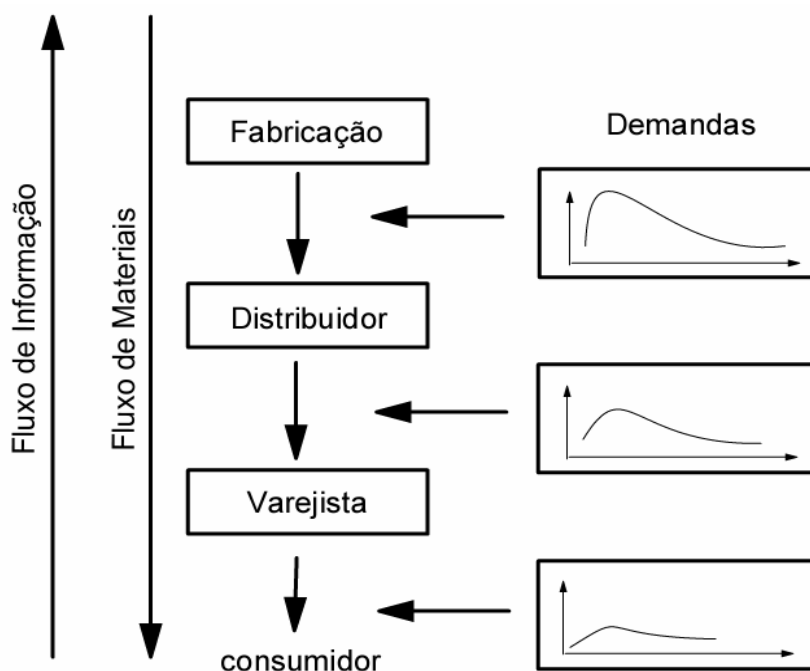


Figura 3.6: Efeito chicote na cadeia de suprimentos com três níveis produtivos.

Neste sentido, trabalhos apresentados na literatura em (Diaz & Pires, 2003) (Vieira *et al.*, 2003) destacam as principais causas do efeito chicote na cadeia de suprimentos. Nestes trabalhos citados, soluções também são apresentadas no sentido de redução deste efeito ao longo da cadeia de suprimentos. As principais causas que levam ao efeito chicote são descritas a seguir:

- i) Atualização constante da previsão de demanda: esse efeito surge quando o varejista emite um pedido baseado na sua previsão atualizada da demanda. Como resultado, o fabricante perde a verdadeira visão da demanda do mercado. O planejamento da produção baseado na distorção do sinal da demanda é inevitavelmente ineficiente. O efeito da distorção é ampliado com o aumento do número de intermediários no canal de distribuição (Vieira *et al.*, 2003).
- ii) Lote de Pedidos: geralmente os pedidos em lote são colocados segundo uma política de reposição periódica de estoque. Entretanto, quando esta política apresenta incertezas, os pedidos são colocados de forma aleatória causando dificuldades aos fornecedores em avaliarem as suas previsões de demanda futura e com isto, os lotes de pedidos podem ser superdimensionados (Diaz & Pires, 2003) (Vieira *et al.*, 2003).
- iii) Jogo de Racionamento: esse fenômeno ocorre quando os pedidos do varejista ao fabricante não coincidem com as necessidades imediatas de consumo do varejo. Um dos motivos para tanto ocorre devido à auto proteção dos varejistas contra a escassez imaginária (Vieira *et al.*, 2003).
- iv) Flutuação dos Preços: geralmente fabricantes e distribuidores, fazem promoções com descontos em preços e quantidades. Todas as promoções direcionam para a flutuação de preço, levando os clientes a comprarem quantidades que não refletem as suas necessidades imediatas. A consequência destas promoções é que a quantidade comprada é maior que a necessária. Terminada as promoções a tendência é uma paralisação nas compras por um período, causando grandes flutuações na produção e nos estoques distribuídos ao longo da cadeia de suprimentos (Diaz & Pires, 2003) (Vieira *et al.*, 2003).

Uma solução para resolver o problema de amplificação de demanda é proposta em (Diaz & Pires, 2003). Neste trabalho, propõe-se uma estratégia baseada no compartilhamento das informações produtivas entre fornecedores e compradores ao longo de toda a cadeia de suprimentos. Em (Vieira *et al.*, 2003) conclui-se que o efeito chicote se deve particularmente ao processo de previsão

de demanda. Neste trabalho, propõem-se algumas medidas com a finalidade de redução do efeito chicote. São elas: a simetria da informação que se resume em o fabricante ter acesso a demanda de varejo, a utilização de contratos que reduzam a flexibilidade das quantidades pedidas até as políticas de cancelamento, reabastecimentos em pequenos lotes baseados nos sistemas de transmissão de pedidos, estabelecimento de contratos de compras entre fabricantes e compradores deste modo, os produtores conseguem planejar a produção com mais eficiência e os compradores podem praticar as suas estratégias de compras.

Uma cadeia de suprimentos pode ser vista como a composição de vários ambientes produtivos mononíveis interligados por uma demanda que neste caso é o pedido de reposição para o nível inferior. Sob o enfoque da dinâmica de sistemas (Towill & Del Vecchio, 1994) propõem a redução do efeito chicote em uma cadeia de suprimentos composta de três níveis produtivos (varejista, distribuidor e fabricação). Cada nível produtivo é modelado utilizando diagrama de blocos com funções de transferência em tempo contínuo. Neste trabalho, foi considerado que cada nível produtivo funciona com um filtro de informação baseado na colocação dos pedidos de reposição na ordem correta. Com isto, há uma redução total dos estoques presentes na cadeia de suprimentos. Dentre os trabalhos mais recentes, (Khator & Deshmukh, 2002) abordam o problema do efeito chicote na cadeia de suprimentos sob o enfoque de *SD*. Neste trabalho propõe-se a modelagem de uma cadeia de suprimentos composta de quatro níveis, em ambiente produtivo monoproduto. O objetivo deste trabalho é identificar as causas e consequências do efeito de propagação da demanda devido a incertezas na demanda de mercado. A modelagem da cadeia também foi utilizada no sentido de melhorar/determinar agilidade com que uma cadeia de suprimentos deve responder na presença deste tipo de incertezas. Assim, agilidade está relacionada com a competitividade de mercado.

A seguir, um modelo utilizando os conceitos de *SDs* em cadeia de suprimentos.

### 3.2.1.

#### Simulação do efeito chicote ao longo de uma cadeia de suprimentos de três níveis.

Neste exemplo, discute-se o comportamento da cadeia de suprimentos composta de três níveis (i.e., varejista, do distribuidor e fabricação de componente) ilustrada na Figura 3.7.

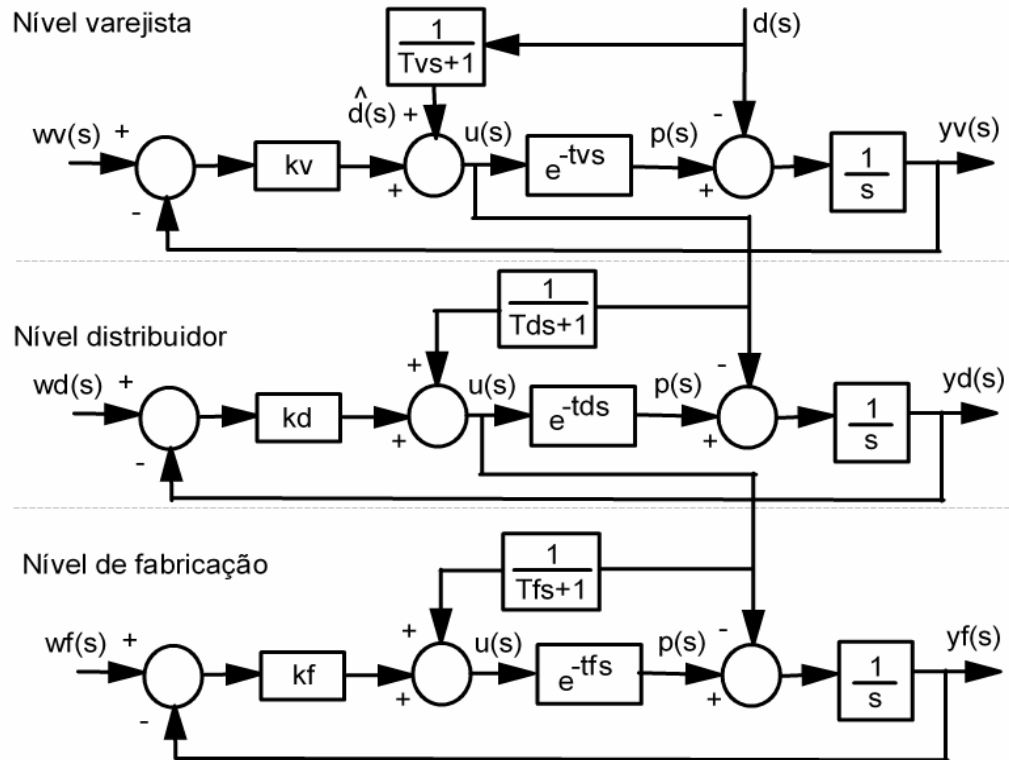


Figura 3.7: Cadeia de suprimentos com três níveis produtivos.

Nesta figura, observa-se que os níveis são modelados como sendo IOBPCS. Cada IOBPCS é modelado conforme descrito na seção 3.1. A ligação entre os níveis da cadeia de suprimentos é realizada através do sinal de demanda. Em outras palavras, o pedido de reposição de componentes em estoque de um nível é o sinal de demanda do nível imediatamente inferior. A demanda de mercado é um sinal de entrada para o nível varejista. Os índices  $v$ ,  $d$  e  $f$  representam os sinais e parâmetros do IOBPCS relativos a cada nível da cadeia, isto é, varejista, distribuidor e fabricação, respectivamente. O Fluxo de informação entre os elos da cadeia de suprimentos é considerado simétrico e o *lead time* produtivo para efeito de simulação foi considerado constante. Porém na realidade o *lead time* produtivo pode variar em função do tamanho do lote de reposição.

Assume-se que as mesmas condições operacionais descritas na subseção 3.1.1 são aplicadas nesta simulação. Não existem restrições nos níveis

produtivos e a demanda de mercado aplicada ao nível varejista é modelada por um sinal tipo degrau de amplitude 10 mil componentes que apresenta incertezas (modeladas por uma distribuição aleatória uniforme) iniciando na 35ª semana, sendo o valor inicial de 5 mil componentes. Esta demanda possui média de 11440 componentes e desvio padrão ( $\sigma$ ) de 4924 componentes. O valor admitido para o *lead time* referente a cada fase produtiva (varejista, do distribuidor e de fabricação) é:  $t_v = 1$ ,  $t_d = 1$  e  $t_f = 1$  representando uma semana. Os parâmetros de controle assumem os seguintes valores:  $K_v = 1$ ,  $K_d = 1$  e  $K_f = 1$ . O valor da constante de tempo referente as previsões de demanda são  $T_v = 1$ ,  $T_d = 1$  e  $T_f = 1$ . O período produtivo considerado é de 100 semanas.

O valor do objetivo de estoque é determinado segundo os critérios discutidos na subseção 3.1.1 item (vi). Portanto, admite-se um nível de serviço de 90%. Assim usando o valor do estoque de segurança como base para o objetivo de estoque chega-se a  $ss = 1.28 \times 4924$  e  $ss = 6302.72$  componentes. Deste modo, o valor do objetivo de estoque em cada nível produtivo é:  $w_v(t) = 6000$ ,  $w_d(t) = 6000$  e  $w_f(t) = 6000$  componentes.

O objetivo deste exemplo é dimensionar o impacto da amplificação de demanda ao longo da cadeia de suprimentos e encontrar uma solução factível que reduza este efeito.

Na Figura 3.8, observa-se a ocorrência do efeito chicote nos níveis do distribuidor e de fabricação com variação de intensidade. Isto se deve ao fato da demanda para os níveis subseqüentes ao varejista ser formada pelos pedidos de reposição. Nota-se que, quanto maior for a quantidade de níveis produtivos em uma cadeia de suprimentos maior será o impacto de amplificação. Porém após o término do regime transitório do sistema produtivo situado no período de 87 a 100 semanas, nota-se o retorno da demanda do nível do distribuidor e de fabricação para o valor da demanda de mercado.

Na Figura 3.9, nota-se que o comportamento da posição de estoque no período produtivo que abrange de 45 a 87 semanas, apresentam rupturas (falta de componentes) nos estoques superiores a determinada para um nível de serviço de 90% (10 faltas). Com isto, a manufatura e os clientes não podem ser atendidos gerando custos adicionais e penalidades impostas devido a perda de competitividade no mercado consumidor.

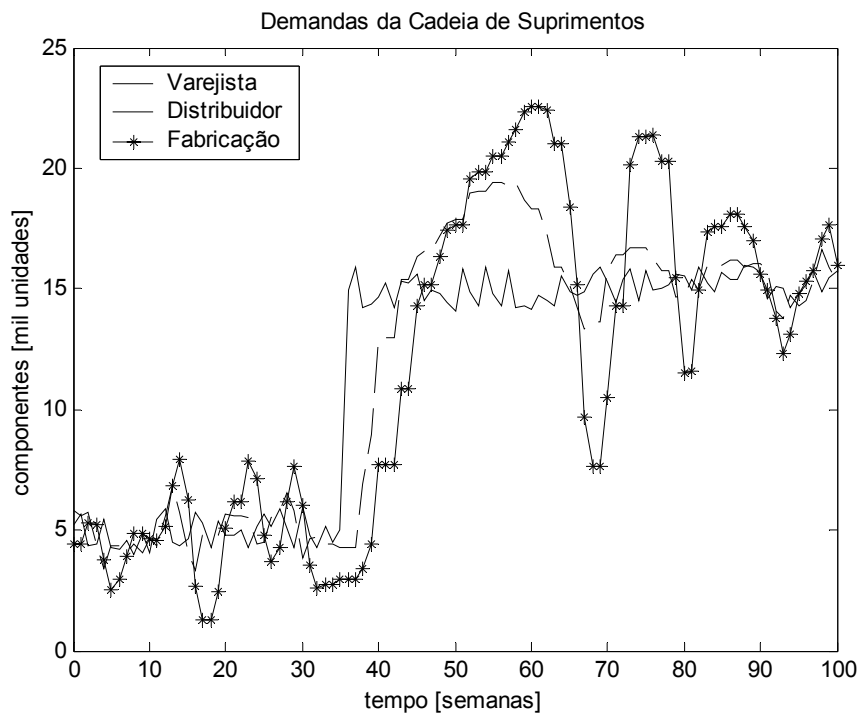


Figura 3.8: Demanda varejista, do distribuidor e de fabricação.

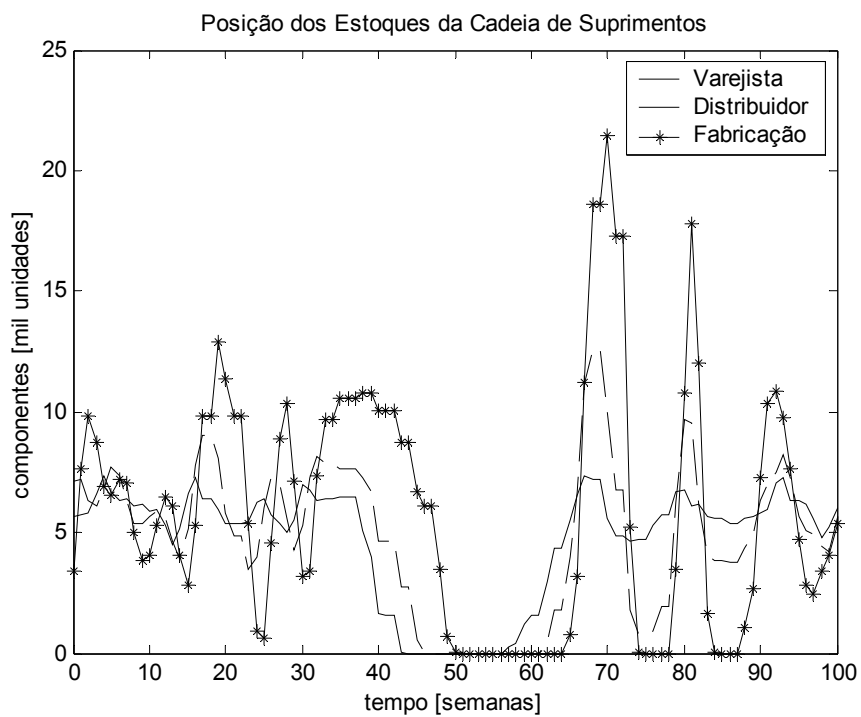


Figura 3.9: Comportamento das posições dos estoques.

Na Figura 3.10, apresenta-se uma redução da ordem de 50% no parâmetro de projeto  $K_c$  conforme analisado na subseção 3.1.1 item (ix). Nesta figura observa-se uma redução do efeito chicote na ordem de 15% nos níveis do distribuído e de fabricação.

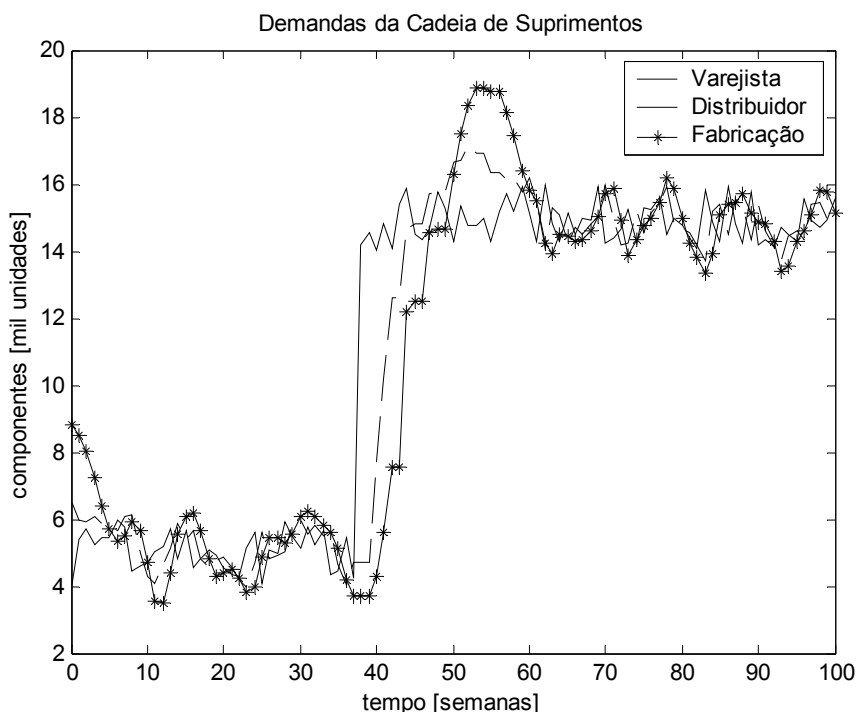


Figura 3.10 Redução da amplificação de demanda.

### 3.3.

#### **Modelo Proposto para Ambiente Produtivo IOBPCS (Enfoque Tempo Discreto)**

Nesta seção, descreve-se a modelagem de um ambiente produtivo do tipo estoque e controle de produção baseado em demanda (*IOBPCS*). O ambiente produtivo é composto por um único nível (por exemplo, previsão de demanda, controle, manufatura seguida de um estoque estratégico em malha fechada) e um único componente (i.e., monocomponente). A modelagem é feita utilizando equações a diferenças. A principal característica do desenvolvimento apresentado, em relação aos descritos na literatura e na seção 3.1, é a utilização de sistemas em tempo discreto e a representação explícita do erro de previsão da demanda na equação do modelo. As restrições de capacidade e a demanda futura prevista são consideradas. Neste contexto, qualquer ambiente produtivo de um único estágio (por exemplo, fase de montagem seguida de um sistema de armazenagem), é um subitem de uma cadeia de suprimentos composta de vários estágios. Então, o ambiente produtivo é um subproblema de uma cadeia



de suprimentos e pode seguir os critérios de *SD* aplicados na seção 3.1. Tomando-se como base o item (v) de metodologia *SD* descrita na seção 3.1, pode-se definir os seguintes sinais presentes no ambiente:  $k$  é uma variável que representa intervalos discretos de tempo ( $k$  é inteiro),  $y(k)$  é a posição de estoque no início do intervalo de tempo  $k$ ,  $p(k)$  é a reposição total no estoque durante o intervalo de tempo  $k$ ,  $d(k)$  são os componentes que saem do estoque durante o intervalo de tempo  $k$ , ou seja, é a demanda do mercado ou do próximo nível na cadeia de suprimentos. A relação entre estes sinais é dada pela seguinte equação às diferenças:

$$y(k+1) = y(k) + p(k) - d(k) \quad (3.15)$$

Aplicando o operador avanço  $q$  nesta equação, obtém-se:  
 $y(k)(q-1) = p(k) - d(k)$

A Figura 3.11 contém esta equação usando diagrama de blocos.

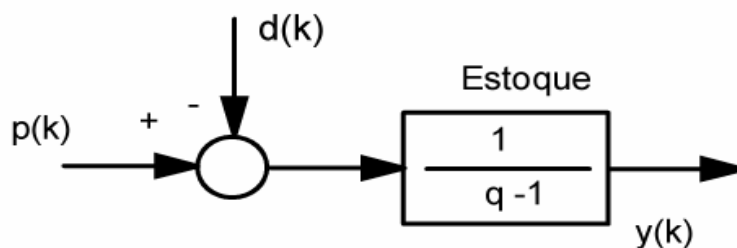


Figura 3.11: Modelagem do ambiente produtivo.

Por sua vez, a reposição de componentes em um dado instante de tempo é função de uma ordem de produção ou pedido de reposição realizada no passado isto é:

$$p(k) = u(k-d) \quad (3.16)$$

Nesta equação,  $d$  é o *lead time* da fase produtiva, isto é, é o tempo entre o pedido de reposição e a reposição efetiva do componente no estoque;  $u(k)$  é o pedido de reposição de estoque no início do intervalo de tempo.

Seja a diferença entre a demanda real  $d(k)$  e a demanda prevista  $\hat{d}(k)$ , isto é, o erro de previsão no instante de tempo  $k$ , dado por:

$$e(k) = d(k) - \hat{d}(k) \quad (3.17)$$

Pode-se, assim, definir  $\zeta(k)$  como uma variável aleatória relacionada ao erro de previsão conforme apresentado a seguir. Esta variável é interpretada como a diferença entre a posição real do estoque em  $k+1$  e a posição calculada

em  $k+1$  se o sinal de demanda previsto fosse utilizado na eq. (3.15) no lugar do sinal de demanda real. Portanto:

$$-\zeta(k+1) = e(k) \quad (3.18)$$

Assim, a eq (3.15) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$y(k+1) = y(k) + p(k) - \hat{d}(k) + \zeta(k+1) \quad (3.19)$$

ou

$$y(k+1) = y(k) + u(k-d) - \hat{d}(k) + \zeta(k+1)$$

Utilizando o operador atraso,  $q^{-1}x(k)$  onde,  $q^{-1} = x(k-1)$  tem-se a representação do ambiente produtivo usando o diagrama de blocos apresentado na Figura 3.12.

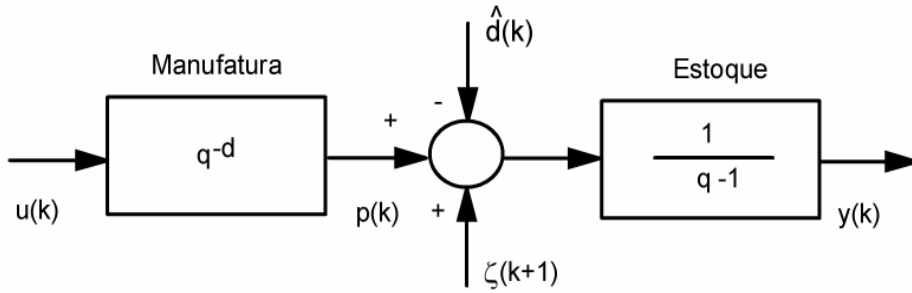


Figura 3.12: Modelagem do ambiente produtivo com atraso.

Neste modelo, assume-se que os limites de capacidade na etapa de fabricação e na posição de componentes no estoque, são dados por:

$$\begin{cases} u(k) \in [u_{\min}, u_{\max}] \\ y(k) \in [y_{\min}, y_{\max}] \end{cases} \quad (3.20)$$

onde,  $u_{\min}$  e  $(u_{\max})$  representam os valores mínimos (máximos) da capacidade de fabricação  $y_{\min}$  e  $(y_{\max})$  representam as posições mínimas (máximas) de componentes no estoque. Usualmente,  $u_{\min}$  e  $u_{\max}$  são nulos, porém valores negativos para estas variáveis podem representar, respectivamente, uma retirada extra de componentes do estoque e/ou uma falta admissível de componentes. Valores positivos não nulos podem representar, um valor mínimo obrigatório de reposição.

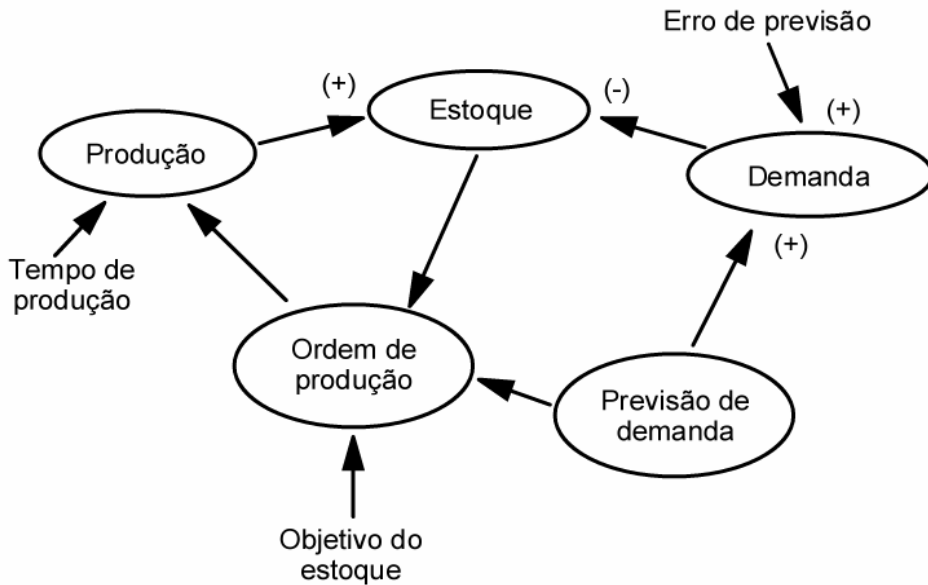


Figura 3.13: A estrutura e o diagrama de causa e efeito do ambiente produtivo IOBPCS com erro de previsão.

Na Figura 3.13, apresenta-se o diagrama de causa e efeito do ambiente produtivo IOBPCS em tempo discreto, conforme item (iii) da seção 3.1 e subseção 3.1.1, incorporando o erro de previsão da demanda. Nesta figura, a demanda de mercado é modelada como a soma da previsão de demanda e o erro de previsão. Os demais fluxos produtivos são iguais aos discutidos na seção 3.1.

### 3.3.1. Equação de Previsão de um Passo

Nesta seção, deriva-se a equação de previsão da posição de estoque  $j$  passos à frente, isto é, em  $k+j$ , representada aqui por  $\hat{y}(k+j|k)$  onde  $j$  é igual ao *lead time* do primeiro estágio do ambiente produtivo mais 1, isto é,  $j = d+1$ . O instante de tempo  $k \neq j$  é o momento onde um pedido de reposição realizado em  $k$  possui influência na posição de estoque. A equação obtida será utilizada para a obtenção de leis ótimas de reposição de estoque a serem discutidas no Capítulo 4 deste trabalho.

Realizando um avanço de  $j$  passos na eq. (3.19), obtém-se:

$$y(k+j+1) - y(k+j) = u(k-d+j) - \hat{d}(k+j) + \zeta(k+j+1) \quad (3.21)$$

Reescrevendo a eq. (3.21) usando o operador avanço  $q$  tem-se:

$$y(k+j)(q-1) = q^{-d}u(k+j) - \hat{d}(k+j) + q^j\zeta(k+1) \quad (3.22)$$

Na solução clássica para a obtenção da equação de previsão  $j$  passos à frente (Favier & Dubois, 1990), define-se uma equação do tipo Diofantina (Diofantos). Este procedimento, aplicado ao modelo (3.19), dá origem à seguinte equação:

$$\frac{q^j}{q-1} = F(q) + \frac{1}{q-1} \quad (3.23)$$

onde  $F(q)$  é um polinômio de ordem  $j-1$  no operador  $q$ , isto é,  $F(q) = q^{j-1} + q^{j-2} + \dots + 1$ . Substituindo a eq. (3.23) na última parcela da eq. (3.21), obtém-se:

$$y(k+j) = \frac{q^{-d}}{q-1} u(k+j) - \frac{1}{q-1} \hat{d}(k+j) + (F(q) + \frac{1}{q-1}) \zeta(k+1) \quad (3.24)$$

Definindo  $\Delta = q-1$ , tem-se:

$$y(k+j) = \frac{q^{-d}}{\Delta} u(k+j) - \frac{1}{\Delta} \hat{d}(k+j) + F(q) \zeta(k+1) + \frac{1}{\Delta} \zeta(k+1) \quad (3.25)$$

Através da eq. (3.19), sabe-se que:

$$\zeta(k+1) = \Delta y(k) - q^{-d} u(k) + \hat{d}(k) \quad (3.26)$$

Substituindo a eq. (3.26) na eq. (3.25), obtém-se:

$$y(k+j) = \frac{q^{-d}}{\Delta} u(k+j) - \frac{1}{\Delta} \hat{d}(k+j) + F(q) \zeta(k+1) + y(k) - \frac{q^{-d}}{\Delta} u(k) + \frac{1}{\Delta} \hat{d}(k) \quad (3.27)$$

Uma vez que a parcela  $F(q)\zeta(k+1)$  da eq. (3.27) só contém os termos não conhecidos no instante  $k$ , tem-se a melhor previsão para a posição de estoque, dada a informação disponível até o instante  $k$  é:

$$\hat{y}(k+j|k) = \left[ \frac{q^{-d+j} - q^{-d}}{\Delta} \right] u(k) + \left[ \frac{1 - q^j}{\Delta} \right] \hat{d}(k|k) + y(k) \quad (3.28)$$

onde  $\hat{d}(k+j|k)$  é a previsão de demanda em  $k+j$ , realizada em  $k$ .

Reescrevendo a eq. (3.28), obtém-se:

$$\hat{y}(k+j|k) = q^{-d} \left[ \frac{q^j - 1}{\Delta} \right] u(k) + \left[ \frac{1 - q^j}{\Delta} \right] \hat{d}(k|k) + y(k) \quad (3.29)$$

Através da eq. (3.23), sabe-se que:

$$F(q) = \frac{q^j}{q-1} - \frac{1}{q-1} \quad (3.30)$$

Portanto, como  $j = d+1$ , tem-se que  $F(q) = q^d + q^{d-1} + \dots + 1$ . Usando as eqs. (3.29) e (3.30) tem-se que a posição de estoque no tempo  $k+j$  pode ser reescrita como sendo:

$$\hat{y}(k+j|k) = q^{-d}F(q)u(k) - F(q)\hat{d}(k|k) + y(k) \quad (3.31)$$

$$\begin{aligned} \hat{y}(k+j|k) &= q^{-d}(q^d + q^{d-1} + \dots + 1)u(k) - \\ &(q^d + q^{d-1} + \dots + 1)\hat{d}(k|k) + y(k) \end{aligned} \quad (3.32)$$

é o mesmo que:

$$\hat{y}(k+j|k) = u(k) + \hat{y}_l(k+j|k) \quad (3.33)$$

onde:

$$\begin{aligned} \hat{y}_l(k+j|k) &= (1 + q^{-1} + \dots + q^{-d+1})u(k-1) - (q^d + q^{d-1} + \dots + 1)\hat{d}(k|k) + \\ &y(k) \end{aligned} \quad (3.34)$$

Nestas equações,  $\hat{y}_l(k+j|k)$  representa todos os termos da previsão que estão relacionados com o passado, isto é, os instantes de tempo anteriores a  $k$ .

### 3.3.2. Equação de Previsão para $j$ Passos

Nesta subseção, propõe-se a determinação da equação de previsão da posição de componentes em estoque  $j$  passos à frente visualizando um horizonte de tempo futuro. A principal diferença entre a equação de previsão desenvolvida nesta seção em relação à seção anterior é que, aqui,  $j > d+1$  e não igual. Esta previsão é feita em função de toda a informação disponível até o instante  $k$  (passado), isto é, as posições de estoque no passado e as previsões de demanda (a previsão de demanda futura é conhecida no instante  $k$ ). A equação obtida nesta seção será utilizada para a obtenção do algoritmo de reposição de estoque, a ser discutido no Capítulo 4 deste trabalho, denominado de controle ótimo com horizonte rolante (preditivo).

Esta abordagem é descrita seguindo os seguintes passos: A determinação da equação de previsão da posição de componentes no estoque em um horizonte de tempo futuro, isto é,  $\hat{y}(k+j|k)$ ,  $j=1,2,3,\dots,N_y$  e posterior separação

da previsão em partes ‘passado’ e ‘futuro’, de forma análoga ao representado pelas eqs. (3.33) e (3.34). Desta forma, partindo-se do modelo do ambiente produtivo, chega-se à eq. (3.15) reescrita a seguir:

$$y(k+j+1) - y(k+j) = u(k-d+j) - \hat{d}(k+j) + \zeta(k+j+1)$$

Esta equação é equivalente a:

$$y(k+j) = y(k-1+j) + u(k-1-d+j) - \hat{d}(k-1+j) + \zeta(k+j) \quad (3.35)$$

$$(1 - q^{-1})y(k+j) = q^{-d-1}u(k+j) - q^{-1}\hat{d}(k+j) + \zeta(k+j) \quad (3.36)$$

Para cada passo  $j$  à frente, pode-se definir uma equação do tipo Diofantina dada por:

$$1 = E_j(q^{-1})\Delta + q^{-j} \quad (3.37)$$

onde  $E_j(q^{-1}) = (1 + q^{-1} + q^{-2} + \dots + q^{-(j-1)})$  e  $\Delta = (1 - q^{-1})$ .

Substituindo a eq. (3.37) na eq. (3.36), obtém-se:

$$\Delta y(k+j) = q^{-d-1}u(k+j) - q^{-1}\hat{d}(k+j) + E_j(q^{-1})\Delta\zeta(k+j) + q^{-j}\zeta(k+j) \quad (3.38)$$

$$y(k+j) = \frac{q^{-d-1}}{\Delta}u(k+j) - \frac{q^{-1}}{\Delta}\hat{d}(k+j) + \frac{q^{-j}}{\Delta}\zeta(k+j) + E_j(q^{-1})\zeta(k+j) \quad (3.39)$$

Uma vez que a ordem do polinômio  $E_j(q^{-1})$  é  $j-1$ , a última parcela  $E_j(q^{-1})\zeta(k+j)$  contém somente termos não previsíveis de  $y(k+j)$  no instante  $k$  portanto, a melhor previsão é:

$$\hat{y}(k+j|k) = \frac{q^{-d-1}}{\Delta}u(k+j) - \frac{q^{-1}}{\Delta}\hat{d}(k+j) + \frac{1}{\Delta}\zeta(k) \quad (3.40)$$

Pela eq. (3.36), sabe-se que:

$$\frac{1}{\Delta}\zeta(k) = y(k) - \frac{q^{-d-1}}{\Delta}u(k) + \frac{q^{-1}}{\Delta}\hat{d}(k) \quad (3.41)$$

Substituindo a eq. (3.41) na eq. (3.42), obtém-se:

$$\hat{y}(k+j|k) = \frac{q^{-d-1+j}}{\Delta} u(k) - \frac{q^{-1+j}}{\Delta} \hat{d}(k|k) + y(k) - \frac{q^{-d-1}}{\Delta} u(k) + \frac{q^{-1}}{\Delta} \hat{d}(k|k) \quad (3.42)$$

Portanto:

$$\hat{y}(k+j|k) = \frac{(q^j - 1)q^{-d-1}}{\Delta} u(k) - \frac{(q^j - 1)q^{-1}}{\Delta} \hat{d}(k|k) + y(k) \quad (3.43)$$

Através da eq. (3.37), tem-se que:

$$\hat{y}(k+j|k) = E_j(q^{-j})q^{-d}u(k+j-1) - E_j(q^{-j})\hat{d}(k+j-1|k) + y(k) \quad (3.44)$$

O polinômio  $E_j(q^{-j})q^{-d}$  pode ser separado em dois termos.

$$E_j(q^{-j})q^{-d} = H_j(q^{-j}) + q^{-j}I_j(q^{-j}) \quad (3.45)$$

onde o polinômio  $H_j(q^{-j})$ , que possui ordem  $j-1$ , contém os  $j$  primeiros elementos de  $E_j(q^{-j})q^{-d}$ . O polinômio  $I_j(q^{-j})$  contém os demais elementos.

Assim sendo, obtém-se:

$$\hat{y}(k+j|k) = H_j(q^{-j})u(k+j-1) + I_j(q^{-j})u(k-1) - E_j(q^{-j})\hat{d}(k+j-1|k) + y(k) \quad (3.46)$$

Nesta equação de previsão, pode-se distinguir dois termos, um termo que é conhecido no instante  $k$  e um termo que é função de sinais que ocorrerão em instantes futuros de tempo (após  $k$ ).

$$\hat{y}(k+j|k) = H_j(q^{-j})u(k+j-1) + \hat{y}_l(k+j|k) \quad (3.47)$$

onde:

$$\hat{y}_l(k+j|k) = I_j(q^{-j})u(k-1) - E_j(q^{-j})\hat{d}(k+j-1|k) + y(k) \quad (3.48)$$

Reescrevendo a eq. (3.47) de previsão em uma forma vetorial, tem-se:

$$\hat{\mathbf{y}}(k) = \mathbf{H}\mathbf{u}(k) + \hat{\mathbf{y}}_l(k) \quad (3.49)$$

Nesta equação  $\hat{\mathbf{y}}(k)$  e  $\hat{\mathbf{y}}_l(k)$  são vetores que contém os elementos  $\hat{y}(k+j|k)$  e  $\hat{y}_l(k+j|k)$ , respectivamente, para  $j=1,2,3,\dots,N_y$  e ( $N_y$  é o horizonte de previsão).  $\mathbf{H}$  é uma matriz que contém os elementos do polinômio  $H_{N_y}(q^{-j})$  conforme apresentado a seguir:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_0 & & & & \\ h_1 & h_0 & & & \\ h_2 & h_1 & h_0 & & \\ \vdots & & & \ddots & \\ h_{N_y} & h_{N_y-1} & \cdots & & h_0 \end{bmatrix} \quad (3.50)$$



## 4

### Técnicas de Reposição Ótima de Componentes em Estoque

*Neste capítulo, algoritmos de controle para a reposição de componentes em estoque são propostos e analisados. Os algoritmos trabalham em tempo discreto e são aplicados em ambiente IOBPCS mononível. Os algoritmos abordados são o controle ótimo com variância mínima, controle ótimo com horizonte rolante e reposição baseada em programação linear. O ambiente está sujeito a picos de demanda de mercado e existem restrições de capacidade na fase produtiva. Finalmente, apresentam-se simulações sobre o comportamento do sistema de estoque nos diferentes casos analisados.*

Os sistemas de controle têm sido investigados desde a década 50 devido a sua relevância em diversas aplicações industriais (Astrom & Wittenmark, 1995) (Astrom & Wittenmark, 1997). Ambientes produtivos e sistemas de manufatura que envolvem a gestão de estoques são também uma área de aplicação da teoria de controle (Towill, 1982) (Towill & Del Vecchio, 1994) (Disney *et al.*, 2002). Sistemas de controle com realimentação são de fundamental importância uma vez que permitem compensar fatores imprevisíveis como falhas no sistema, incertezas no *lead time* ou na demanda de componentes armazenados no estoque. Nesta área, isto é, ambientes produtivos com sistema de armazenagem, sistemas de controle estão relacionados com o algoritmo para reposição de componentes em um dado instante de tempo baseada em informações do ambiente produtivo. Por exemplo, pode-se citar os trabalhos de (Simon, 1952) (Vassian, 1954) (Towill *et al.*, 1997) (Disney *et al.*, 2000) (Blanchini & Pesenti, 2001) (Pacheco *et al.*, 2002) (Pacheco & Oliveira, 2003 a, b) (Pacheco & Oliveira, 2004) (Oliveira & Pacheco, 2003).

Em (Pacheco *et al.*, 2002), trata-se do problema da reposição ótima de estoques dentro de um ambiente produtivo de um nível, monoproduto, que atende a gestão da demanda ATO. Este ambiente produtivo é composto de duas fases. A primeira representa a manufatura de componentes e a segunda a montagem dos componentes, dando origem ao produto final. Existe um estoque intermediário entre as fases. A fase produtiva dentro do nível é modelada por *lead times*, conforme descrito no Capítulo 3. Propõe-se uma solução de gestão para a determinação das ordens de manufatura a fim de minimizar a variância

do nível de estoque em relação a um valor de referência. Analisa-se o caso de demanda sazonal e incertezas na previsão de demanda. Assume-se, ausência de restrições de capacidade. Este trabalho é estendido em (Pacheco & Oliveira, 2003 a, b) através da análise do caso onde há picos de demanda não previstos com exatidão e restrições na capacidade da manufatura. Nesta situação, a capacidade de manufatura pode não ser capaz de suprir a demanda na presença de picos elevados e, portanto, há a necessidade da formação de um estoque estratégico. Propõe-se então uma divisão do sistema de gestão em duas estratégias, a estratégia de controle que trata do problema de reposição ótima descrito em (Pacheco *et al.*, 2002) e a estratégia de supervisão que cria um estoque estratégico em função da previsão futura de picos de demanda. Os dois estágios, atuando em conjunto, evitam a falta na entrega de produtos para o próximo nível da cadeia de suprimentos do ambiente produtivo. Uma proposta análoga a estes trabalhos é apresentada em (Oliveira & Pacheco, 2003). Neste último trabalho, a reposição ótima de componentes em estoque utiliza a técnica de controle preditivo com horizonte rolante (*receding horizon approach*). Esta estratégia se caracteriza pela determinação da ordem de manufatura e conseqüente reposição de estoques através da determinação de um horizonte de previsão do comportamento futuro do sistema. Esta abordagem considera limites de capacidade de produção e é capaz de lidar automaticamente com picos futuros de demanda sem a necessidade de fases adicionais no algoritmo de controle.

Em (Pacheco & Oliveira, 2004) faz-se uma análise comparativa destas duas estratégias citadas como a reposição baseada na otimização do sistema produtivo usando programação linear.

Neste capítulo, quatro algoritmos de controle para gestão da reposição de componentes em estoque são descritos e analisados. No primeiro, o problema de reposição, baseado na previsão futura de demanda e no erro de previsão entre a demanda real e prevista. No segundo, o problema de reposição utiliza um algoritmo de programação linear que considera como entrada, as restrições do ambiente produtivo, demanda prevista e o *lead time* da fase produtiva. No terceiro, o problema de reposição utiliza a técnica de controle ótimo baseada na variância mínima do erro de previsão. Neste caso o sistema de reposição é dimensionado em duas estratégias: a primeira que trata da reposição ótima e a segunda que faz a prevenção de falta de componentes em estoque para tanto utiliza-se as equações de previsão desenvolvidas na subseção 3.3.1. No quarto, o problema de reposição utiliza a técnica de controle ótimo com horizonte

rolante, utilizando os conceitos de controle preditivo. Em todos os algoritmos de controle propostos, existe um objetivo em comum, isto é, a minimização dos custos totais de estoque. Para tanto, utiliza-se as equações de previsão desenvolvidas na subseção 3.3.2.

Em todos os casos assume-se as seguintes condições de operação para o ambiente produtivo:

- O sistema funciona em intervalos fixos de reposição, isto é, a posição de estoque é atualizada em intervalos iguais (reposição periódica).
- O *lead time* é fixo.
- A demanda pode: ser sazonal, conter flutuações pequenas ou abruptas (picos de demanda de mercado), ser totalmente previsível (determinística) ou conter componentes aleatórios.
- Há restrição de capacidade na fase produtiva.
- O ambiente produtivo atende a qualquer gestão de demanda.
- O sistema representa um único nível produtivo (*echelon*) e contém um único componente.
- A demanda não atendida não é postergada.
- É modelado pelas equações apresentadas na seção 3.3.

Assim sendo, Na Seção 4.1, utiliza-se o algoritmo de reposição com compensação *feedforward*. Na Seção 4.2, utiliza-se o algoritmo de reposição baseado em programação linear. Na Seção 4.3, utiliza-se o algoritmo de reposição ótima com variância mínima. Na Seção 4.4, utiliza-se o algoritmo de reposição preditivo com horizonte rolante.

#### 4.1.

##### **Algoritmo de Reposição com Compensação *Feedforward***

Nesta seção, um método de reposição de componentes em estoque baseado na compensação *feedforward* da demanda de produtos de mercado é descrito. O algoritmo é apresentado a seguir.

Assuma que o pedido de reposição no instante  $k$ , isto é,  $u(k)$  é feito igual à demanda prevista para  $k+d$  (onde  $d$  é o *lead time* de produção) somado com o erro conhecido de demanda no instante  $k$  (conforme definido na eq. (3.17)), isto é, a diferença entre a demanda real e a prevista em  $k-1$ . Lembra-se aqui que  $d(t)$  é igual à demanda de mercado entre  $k$  e  $k+1$ . Está lei de reposição é dada por:

$$u(k) = \hat{d}(k+d) + d(k-1) - \hat{d}(k-1) \quad (4.1)$$

Deste modo, deve-se ter em estoque no final do intervalo de tempo a demanda futura prevista  $d$  passos à frente mais a posição de componentes em estoque no final do intervalo de tempo anterior. Utilizando o operador atraso  $q^{-d}$  na eq. (4.1) e a definição do erro apresentado na eq. (3.17) obtém-se:

$$u(k-d) = \hat{d}(k) - \zeta(k-d) \quad (4.2)$$

Esta estrutura de controle é formada somente por uma parte *feedforward* (Astrom & Wittenmark, 1997), uma vez compensa perturbações mensuráveis do sistema, porém não há uma representação explícita da realimentação. Pela definição da eq.(3.16),  $p(k)=u(k-d)$  e substituindo a eq. (4.2) na eq.(3.15) obtém-se o modelo do sistema em malha fechada (sistema de gestão unido ao modelo do estágio produtivo).

$$y(k+1) = y(k) - \zeta(k-d) + \zeta(k+1) \quad (4.3)$$

Reescrevendo a eq.(4.3) e utilizando o operador atraso  $q^{-1}$  obtém-se:

$$y(k) = \frac{1}{1-q^{-1}} [\zeta(k) - \zeta(k-d-1)] \quad (4.4)$$

Esta equação do sistema em malha aberta descreve a dinâmica da posição de estoque em função dos erros passados de previsão da demanda. Pode ser representada pelo diagrama de blocos ilustrado na Figura 4.1.

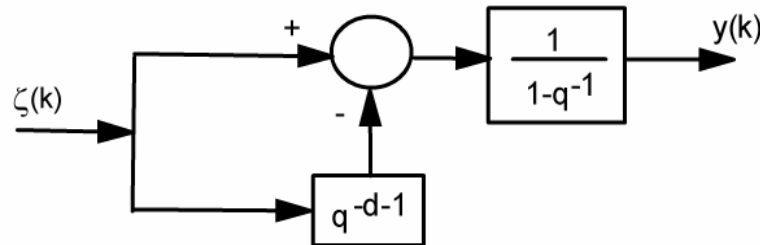


Figura 4.1: Diagrama de blocos da gestão de estoque.

Das eqs. (4.3) e (4.4), nota-se que a posição de estoque será, na média, igual ao valor inicial ( $y(k+1) = y(k)$ ) se a média dos erros de previsão forem iguais a zero.

#### 4.1.1. Exemplo

Neste exemplo, apresenta-se o desempenho da técnica de controle dada pela eq. (4.1). O modelo do ambiente produtivo é dado pela eq. (3.19), neste caso considera-se que não há restrições operacionais, ou seja, por hipótese admite-se que a linha de produção é capaz de satisfazer a ordem de produção e o estoque é capaz de armazenar toda a produção. A demanda real no instante

de tempo  $k-1$  é conhecida e a reposição de componentes (intervalo de reposição) é mensal. Durante a simulação (40 meses) as seguintes condições de demanda são consideradas. A demanda real descreve o comportamento do mercado consumidor. Esta demanda representa o consumo de um produto na linha de perfume de uma indústria de cosméticos. Observa-se na Figura 4.2 que os picos de demanda são sazonais e representam os períodos de alta de consumo. Estes períodos ocorrem freqüentemente quando há datas comemorativas. Por exemplo, o dia das mães e o dia dos namorados estão representados pelos meses 5, 17 e 29 (mês de maio de anos subsequentes) e festas natalinas representadas pelos meses 11, 23 e 35 (mês de novembro de anos subsequentes). A Figura 4.2, apresenta o comportamento da demanda real, da demanda prevista e contém o erro de previsão entre a demanda real e a prevista.

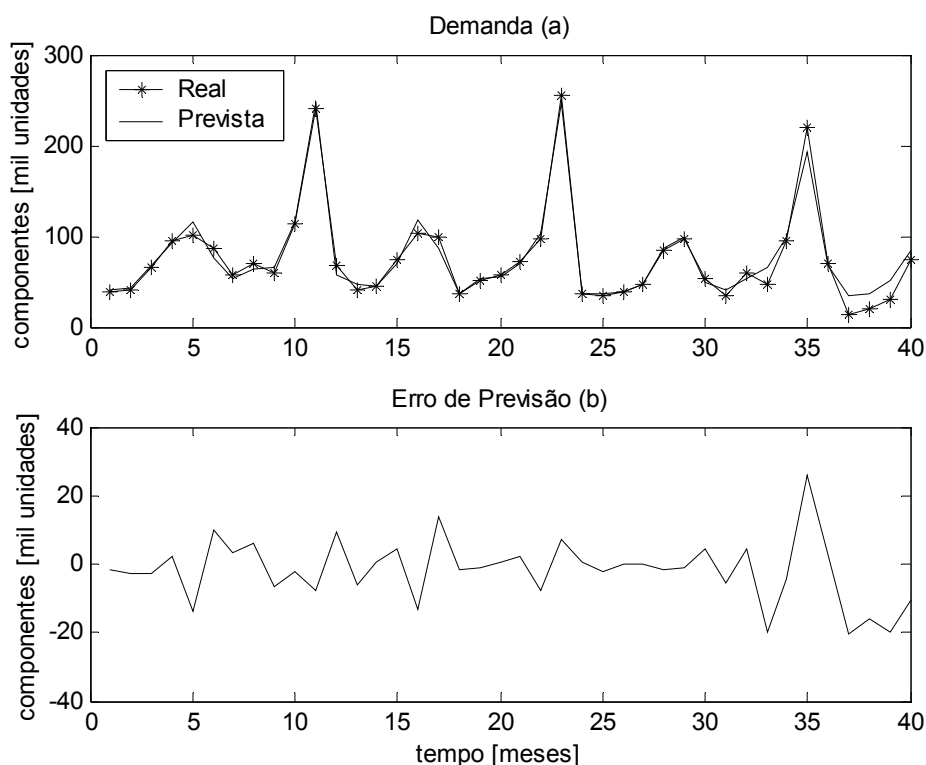


Figura 4.2: (a) Comportamento da demanda real e demanda prevista e (b) o erro de previsão.

Apresenta-se na Figura 4.3, o desempenho do sistema produtivo para as seguintes condições de manufatura. O *lead time* considerado é de uma unidade (um mês) e assume valor constante durante todo o período produtivo, o valor do objetivo de estoque é determinado através da multiplicação do número de desvio padrões (determinado para uma distribuição normal) pelo desvio padrão da

demanda prevista conforme descrito na subseção 3.1.1. Neste caso, por hipótese, estima-se o objetivo de estoque para um nível de serviço de 90% (desvio padrão de 1.28 para uma distribuição normal), ou seja, admite-se falta de estoque para 10% do período produtivo de 40 meses. O valor médio da demanda prevista é de 77 mil componentes/mês e seu desvio padrão é de 50 mil componentes/mês. Assim usando o valor do estoque de segurança como base para o objetivo de estoque chega-se a  $ss = 1.28 \cdot 50000$  e  $ss = 64$  mil componentes/mês e é capaz de atender a uma variação da demanda mensal de até 141 mil componentes/mês. O resultado desta simulação se encontra na Figura 4.3. Nesta figura, observa-se que o pedido de reposição consegue atender a demanda de mercado com a previsão equivalente ao *lead time*. Com isto, os critérios de nível de serviço para objetivo de estoque são cumpridos e nenhuma falta é observada. Observa-se também, que a posição de estoque tende a manter um valor próximo do objetivo de estoque.

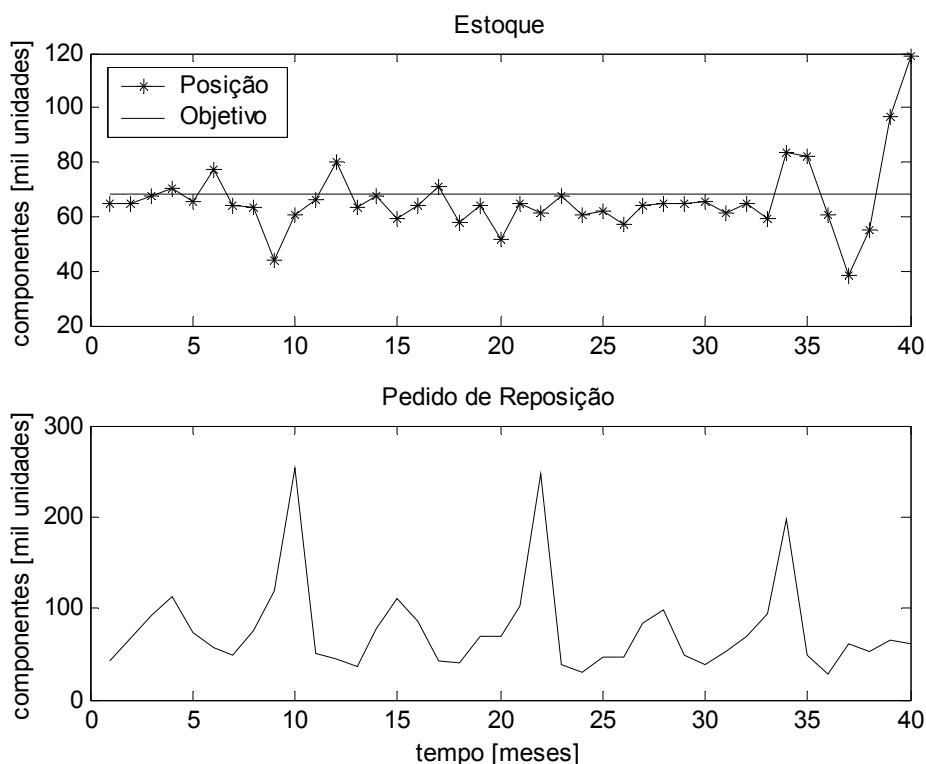


Figura 4.3: Comportamento do sistema produtivo para a reposição com compensação *feedforward* sem restrições e *lead time* produtivo de um mês.

Na medida do desempenho do sistema de reposição considera-se o custo total do sistema produtivo ( $C_t$ ) que está dividido em: custo de fabricação de componentes ( $C_{fc}$ ) que assume valor de uma unidade padrão monetária por componente fabricado, no custo de falta de componente em estoque ( $C_{fe}$ ), que

assume o valor de duas unidades padrão monetária por componente não entregue (o seu valor é maior devido aos custos e penalidades aplicadas pelo não atendimento aos clientes) e no custo de manter o componente em estoque (*Cmc*) que assume 1.5 unidades padrão monetária por componente armazenado, e é medido em função da dispersão dos componentes em relação ao objetivo de estoque.

A Tabela 4.1, contém os custos do sistema produtivo para diferentes cenários de simulação (variações de *lead times* (*Lt*)).

| <b>Simulação</b> | <b>Lt</b> | <b>Cfc</b> | <b>Cfe</b> | <b>Cmc</b> | <b>Ct</b> |
|------------------|-----------|------------|------------|------------|-----------|
| 1° Cenário       | 0         | 3048       | 0          | 549        | 3597      |
| 2° Cenário       | 1         | 3083       | 0          | 585        | 3668      |
| 3° Cenário       | 2         | 3093       | 0          | 646        | 3739      |
| 4° Cenário       | 3         | 3073       | 0          | 718        | 3791      |

Tabela 4.1: Custos do sistema com reposição *feedforward* sem restrições produtivas.

Na Tabela 4.1, observa-se que não há uma variação significativa nos custos totais e de fabricação do sistema produtivo a medida que o *lead time* produtivo aumenta e também não há ocorrência de ruptura do estoque (identificada através do custo *Cfe*). O custo (*Cmc*) que representa componentes mantidos em estoque apresenta crescimento para o aumento de *lead time*. Isto pode ser explicado através da eq. (4.1) onde o pedido de reposição é baseado na demanda futura prevista adiantada do *lead time* produtivo, ou seja, o sistema de reposição consegue prever o valor a ser repostado  $k+d$  passos a frente adicionado ao erro de previsão no instante de tempo anterior. Com isto, os componentes tendem a se dispersarem do objetivo de estoque a medida que o *lead time* aumenta.

A seguir, é apresentado na Figura 4.4 o desempenho do sistema produtivo quando a manufatura está sob restrições operacionais. Este é o caso, por exemplo, quando a linha de produção atende a vários componentes do mesmo ramo. Neste caso, admite-se que o sistema possui capacidade nominal para atender a média da demanda prevista (77 mil componentes/mês). Esta capacidade, pode entretanto, ser aumentada através de contratação de funcionários, aumento de horas extras, investimento em maquinário e etc. Assim, presume-se aqui que este aumento pode ser de dois desvios padrões de demanda, ou seja, de 100 mil componentes/mês. Ao todo, portanto, a capacidade máxima torna-se 177 mil componentes/mês.

Na Figura 4.4, observa-se que o sistema de reposição devido as restrições operacionais não consegue pedir a manufatura uma quantidade de componentes suficiente para atender ao mercado. Com isto, o comportamento do estoque apresenta uma quantidade de faltas superior a determinada comprometendo o nível de serviço. Caracterizado através dos valores da posição de estoque que estão com valores zero. Deste modo, custos relacionados às perdas são impostos ao sistema produtivo. Por exemplo, a perda de competitividade no mercado.

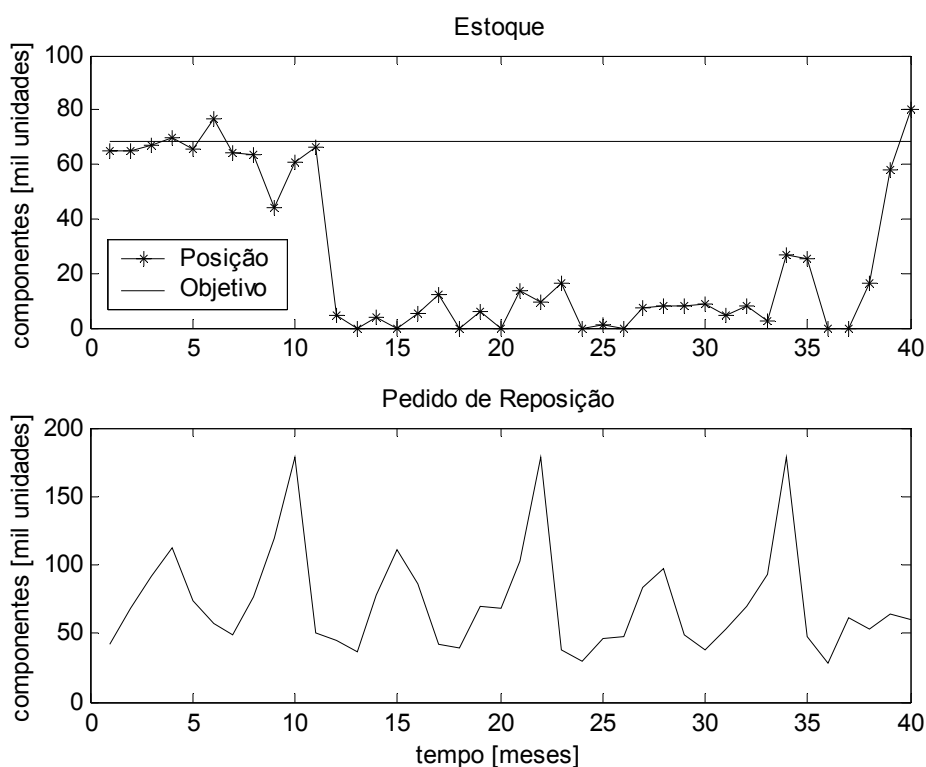


Figura 4.4: Comportamento do sistema produtivo para a reposição com compensação *feedforward* com restrições e *lead time* produtivo de um mês.

A Tabela 4.2, contém os custos do sistema produtivo para diferentes cenários de simulação (variações de *lead times* (*Lt*)).

| Simulação  | Lt | Cfc  | Cfe | Cmc  | Ct   |
|------------|----|------|-----|------|------|
| 1° Cenário | 0  | 2915 | 217 | 1700 | 4832 |
| 2° Cenário | 1  | 2919 | 330 | 1813 | 5062 |
| 3° Cenário | 2  | 2943 | 832 | 1762 | 5537 |
| 4° Cenário | 3  | 2907 | 943 | 1870 | 5720 |

Tabela 4.2: Custos do sistema com reposição *feedforward* com restrições produtivas.

Na Tabela 4.2, observa-se que não há uma variação significativa nos custos de fabricação e manutenção de estoque do sistema produtivo em função



do aumento do *lead time*. Entretanto, os custos totais são bem maiores que o caso sem restrição de capacidade. O custo (*Cfe*) apresenta variação significativa para aumento do *lead time* caracterizando um comprometimento da produção.

#### 4.2.

#### Algoritmo de Reposição Baseado em Programação Linear

A descrição do planejamento agregado de um sistema produtivo como a otimização de um problema de programação linear (*PL*) (Bazaraa & Shetty, 1979) já foi descrita na literatura (Moreira, 1993) e (Barchet *et al.*, 1993). Neste tipo de problema, a função de custo descreve o desempenho do sistema e as restrições garantem o atendimento da demanda prevista. Na função de custo são inseridas as variáveis e parâmetros relacionados com a solução do problema de *PL*: os níveis de estoque, capacidade produtiva, quantidades produzidas em regime regular, em horas extras e subcontratação, etc. Neste caso existem opções diversas de modo a flexibilizar o atendimento a demanda com o menor custo operacional. Estas opções podem ser: contratar e/ou demitir funcionários, direcionar a produção para vários regimes (regular, horas extras e subcontratação), alterar a demanda através de promoções, preços diferenciados, reserva, etc.

O problema de reposição ótima de componentes em estoque tratado nesta seção é um subproblema do problema de planejamento agregado. Neste caso, a função de custo está relacionada com os custos do ambiente dado pela posição de estoque e pela reposição de componente é descrita e restrições relacionadas com os limites operacionais do ambiente produtivo são adicionadas para compor o problema de *PL*. Esta metodologia é revista a seguir.

Seja  $J(k)$  uma função de custo relacionada com o sistema de estoque no instante de tempo  $k$ . O problema de otimização é:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min} && J(k) && (4.5) \\
 & \text{s.to} && \\
 & && \hat{y}(k+1+i) = \hat{y}(k+i) + u(k-d+i) - \hat{d}(k+i) \\
 & && u_{\min} \leq u(k+i) \leq u_{\max} \\
 & && y_{\min} \leq \hat{y}(k+i) \leq y_{\max} \\
 & && i = 0, \dots, N-1
 \end{aligned}$$

Onde:

$$J(k) = \|\hat{\mathbf{y}}(k) - \mathbf{w}(k)\|_{n,\Xi} + \|\mathbf{u}(k)\|_{n,\Gamma} \quad (4.6)$$

$$\hat{\mathbf{y}}(k) = [\hat{y}(k+1|k) \quad \hat{y}(k+2|k) \quad \dots \quad \hat{y}(k+N|k)] \quad (4.7)$$

$$\mathbf{u}(k) = [u(k|k) \quad u(k+1|k) \quad \dots \quad u(k+N-1|k)]$$

$$\mathbf{w}(k) = [w(k+1) \quad w(k+2) \quad \dots \quad w(k+N)]$$

Neste problema,  $N$  é o final do intervalo de tempo  $k$  ou o período produtivo,  $\mathbf{u}(k)$ ,  $\hat{\mathbf{y}}(k)$  e  $\mathbf{w}(k)$  contém, respectivamente, os valores ótimos para as ordens futuras de fabricação, os valores previstos para o nível futuro de componentes no estoque e os valores do objetivo de estoque, calculados no instante de tempo  $k$ .  $\|\cdot\|_{n,\Xi}$  representa a norma  $n$  de um vetor, ponderada pelos coeficientes  $\alpha_i$  do vetor  $\Xi$  com  $\Xi = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_N]$ . O caso usualmente encontrado na literatura é a utilização da norma 1 que dá origem a um problema de programação linear<sup>1</sup>. Logo, assumindo que  $\lambda_j$  são as componentes do vetor  $\Gamma$  como  $\Gamma = [\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_N]$ , obtém-se:

$$J(k) = \sum_{j=1}^N (\alpha_j |y(k+j) - w(k+j)|) + \sum_{j=1}^N (\lambda_j |u(k+j-1)|) \quad (4.8)$$

Nestes casos, o valor absoluto é usualmente omitido devido a considerações de não negatividade das variáveis envolvidas.

Este esquema pode ser implementado no ambiente produtivo tal qual está apresentado, isto é, implementa-se no sistema os  $N$  valores ótimos de reposição de estoque. Somente  $u(k|k)$  é implementado no sistema e, no instante de tempo  $k+1$  seguinte, o procedimento é repetido.

Este problema de otimização pode ser reescrito de forma matricial, conforme mostrado a seguir. Neste caso, observa-se que existe um conjunto das restrições compostas pelos  $\hat{y}(k+i+1)$  que são de igualdades e outro conjunto formado por restrições de (desigualdades). Assim pode-se definir as matrizes  $A$ ,  $B$  e  $X(k)$  da seguinte forma:  $A = [A_1 \ A_2]$ ,  $B = [B_1 \ B_2]$  e  $X(k) = [\mathbf{u}(k) \ \hat{\mathbf{y}}(k)]$  uma matriz composta com os  $(N-d-1)$  pedidos de reposição de estoque e dos  $(N-1)$  níveis de estoque de modo a obter a seguinte expressão:

$$[A_1] \begin{bmatrix} \mathbf{u}(k) \\ \hat{\mathbf{y}}(k) \end{bmatrix} = [B_1] \text{ e } [A_2] \begin{bmatrix} \mathbf{u}(k) \\ \hat{\mathbf{y}}(k) \end{bmatrix} \leq [B_2] \quad (4.9)$$

---

<sup>1</sup> A norma um é dada por:  $\|x\|_1 = \sum_{i=1}^n |x_i|$ , onde  $x$  é um vetor.

A seguir desenvolve-se o problema (4.5) para ilustrar a montagem desta técnica. Assumindo que  $N = 3$ ,  $i = 0, 1, 2$ , e que  $d = 0$ , ou seja, não há *lead time* nas operações produtivas. O valor do vetor  $\mathbf{u}(k) = [u(k+1) \ u(k+2)]$ ,  $\hat{\mathbf{y}}(k) = [\hat{y}(k+1) \ \hat{y}(k+2) \ \hat{y}(k+3)]$  e  $\mathbf{w}(k) = [w(k+1) \ w(k+2) \ w(k+3)]$ . Assim, tem-se a seguinte representação:

$$\text{Min} \sum_{k=1}^N |\hat{y}(k) - w(k)| + |u(k)| \quad (4.10)$$

s.to

$$\hat{y}(k+1) = \hat{y}(k) + u(k) - \hat{d}(k)$$

$$u(k+1) + \hat{y}(k+1) - \hat{y}(k+2) = \hat{d}(k+1)$$

$$u(k+2) + \hat{y}(k+2) - \hat{y}(k+3) = \hat{d}(k+2)$$

$$u(k+1) \leq u_{\max}$$

$$u(k+2) \leq u_{\max}$$

$$\hat{y}(k+1) \leq y_{\max}$$

$$\hat{y}(k+2) \leq y_{\max}$$

$$\hat{y}(k+3) \leq y_{\max}$$

$$-u(k+1) \leq -u_{\min}$$

$$-u(k+2) \leq -u_{\min}$$

$$-\hat{y}(k+1) \leq -y_{\min}$$

$$-\hat{y}(k+2) \leq -y_{\min}$$

$$-\hat{y}(k+3) \leq -y_{\min}$$

Nesta representação os valores de  $\hat{y}(k)$  e  $u(k)$  são conhecidos e representam o primeiro instante do período produtivo  $N$ . A seguir é apresentada a representação matricial das matrizes  $A$ ,  $B$  e  $X(k)$ .

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} & B_1 &= \begin{bmatrix} \hat{y}(k) + u(k) - \hat{d}(k) \\ \hat{d}(k+1) \\ \hat{d}(k+2) \end{bmatrix} \\
 A_2 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} & B_2 &= \begin{bmatrix} u_{\max} \\ u_{\max} \\ y_{\max} \\ y_{\max} \\ y_{\max} \\ -u_{\min} \\ -u_{\min} \\ -y_{\min} \\ -y_{\min} \\ -y_{\min} \end{bmatrix} & X(k) &= \begin{bmatrix} u(k+1) \\ u(k+2) \\ \hat{y}(k+1) \\ \hat{y}(k+2) \\ \hat{y}(k+3) \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

A seguir um exemplo demonstrando a aplicação desta técnica é analisado.

#### 4.2.1. Exemplo

Neste exemplo, ilustra-se o desempenho do algoritmo de reposição de componentes dado pelo problema de otimização (4.5). O modelo do ambiente produtivo é dado pela eq. (3.19) e o sistema produtivo está sob as mesmas condições operacionais do exemplo 4.1.1. A reposição de componentes no estoque é calculada de uma única vez, representado um sistema em malha aberta e posteriormente implementado no sistema até o final do intervalo de tempo  $N$ . Na Figura 4.5, apresenta-se o desempenho deste sistema de reposição quando não há restrições produtivas e *lead time* de produção de um mês. Nesta figura, nota-se que a curva referente ao pedido de reposição é similar à demanda de mercado, com um atraso da produção de um mês. Com isto, o mercado é atendido e não é detectada nenhuma ruptura de estoque, ou seja, não há comprometimento do nível de serviço do objetivo de estoque. A Tabela 4.3, contém os custos do sistema de reposição via *PL* para diferentes cenários de simulação (variações de *lead times* ( $Lt$ )).

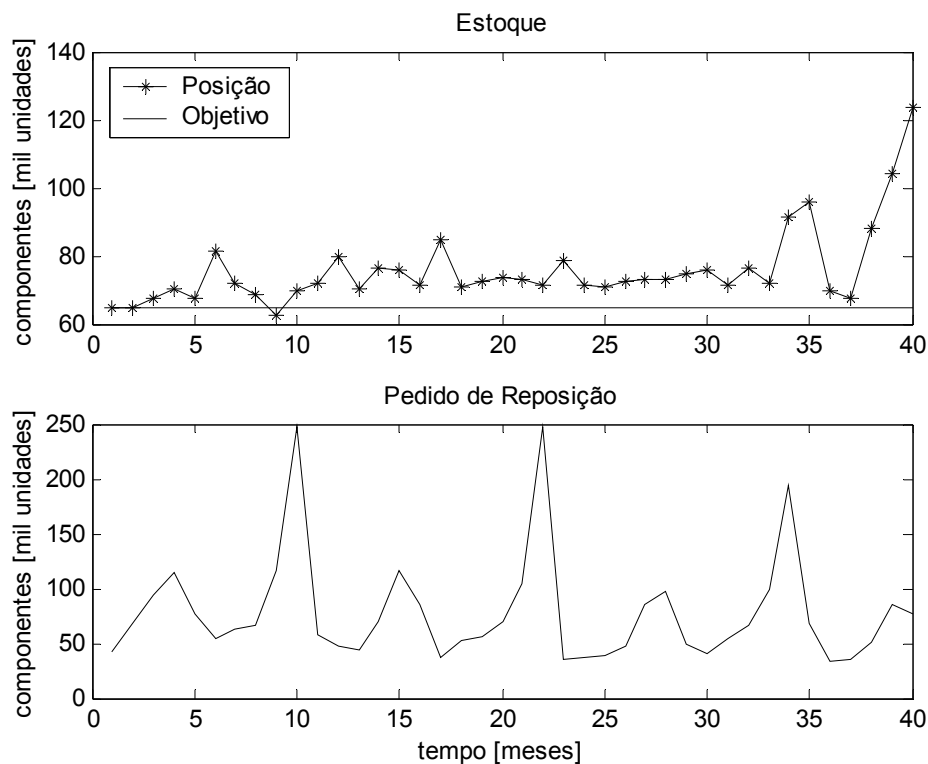


Figura 4.5: Comportamento do sistema produtivo para a reposição por *PL* sem restrições e *lead time* produtivo de um mês.

| Simulação  | Lt | Cfc  | Cfe | Cmc | Ct   |
|------------|----|------|-----|-----|------|
| 1° Cenário | 0  | 3089 | 0   | 845 | 3934 |
| 2° Cenário | 1  | 3124 | 0   | 811 | 3935 |
| 3° Cenário | 2  | 3134 | 0   | 739 | 3873 |
| 4° Cenário | 3  | 3114 | 0   | 688 | 3802 |

Tabela 4.3: Custos do sistema com reposição por *PL* sem restrições produtiva.

Na Tabela 4.3, observa-se que o custo (*Cfc*) apresenta variações não significativas à medida que o *lead time* produtivo aumenta e os custos relacionados a (*Cmc*) diminuem. Com isto, o custo (*Ct*) apresenta redução não significativa a medida que o *lead time* aumenta. Isto ocorre devido aos valores da posição de estoque estarem mais próximos do objetivo de estoque, ou seja, uma menor dispersão dos dados influenciando na redução dos custos de manter componentes em estoque. Observa-se também que não há ruptura de estoque caracterizado pelo custo (*Cfe*).

A seguir, apresenta-se o comportamento do sistema produtivo com reposição por *PL* considerando restrições operacionais idênticas a do exemplo 4.1.1.

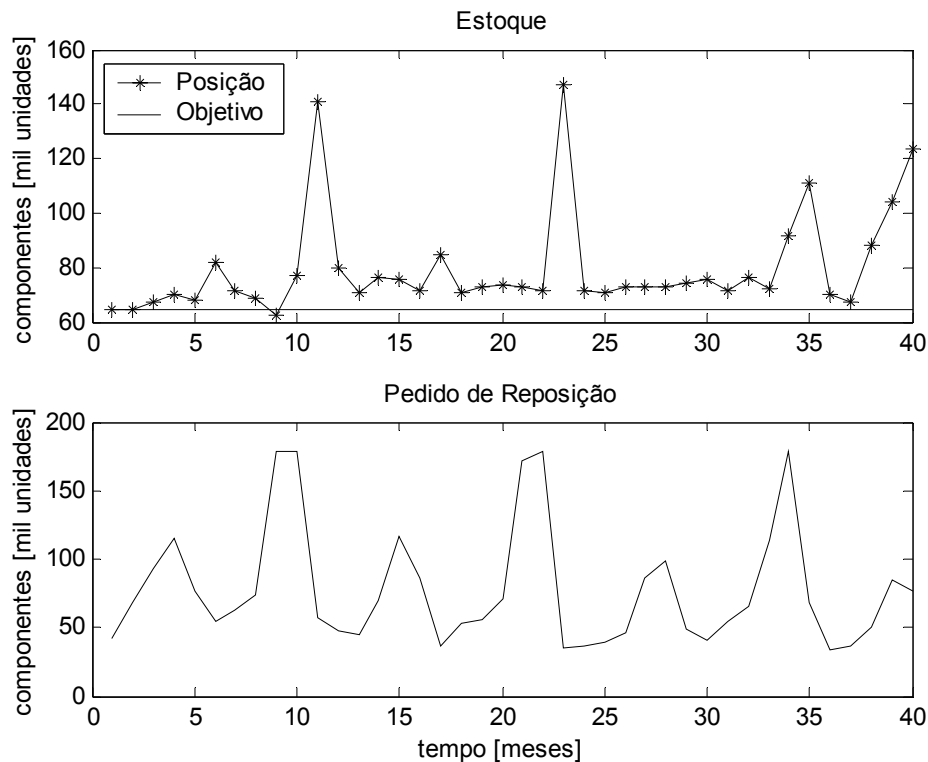


Figura 4.6: Comportamento do sistema produtivo para reposição por *PL* com *lead time* produtivo de um mês e restrições produtivas.

Na Figura 4.6, nota-se que o desempenho da posição de estoque é muito superior em relação ao objetivo de estoque implicando um aumento dos custos para manter os estoques, observados nos meses onde há ocorrência dos picos de mercado. Isto se deve as restrições operacionais do sistema produtivo. Observa-se também, que a fase produtiva não tem capacidade suficiente para atender aos picos de demanda devido as restrições operacionais ilustrado nos pedidos de reposição (conforme definido no exemplo 4.1.1 a capacidade máxima é de 177 mil componentes/mês). Entretanto, não há ocorrência de falta de estoque, com isto, o nível de serviço está garantido. A Tabela 4.4 contém os custos do sistema de reposição por *PL* com restrições produtivas, para diferentes cenários de simulação (variações de *lead times* (*Lt*)).

| Simulação  | Lt | Cfc  | Cfe | Cmc | Ct   |
|------------|----|------|-----|-----|------|
| 1° Cenário | 0  | 3089 | 0   | 880 | 3969 |
| 2° Cenário | 1  | 3124 | 0   | 918 | 4042 |
| 3° Cenário | 2  | 3134 | 0   | 918 | 4052 |
| 4° Cenário | 3  | 3114 | 0   | 927 | 4041 |

Tabela 4.4: Custos do sistema com reposição por *PL* e com restrições produtivas.

Na Tabela 4.4, observa-se que não há variações significativas nos custos totais ( $C_t$ ) e de manter componentes em estoque ( $C_{mc}$ ) devido ao aumento do *lead time*. O custo ( $C_{fe}$ ) não apresentou nenhuma falta caracterizando que não há comprometimento da produção e dos estoques. Com isto, o sistema de reposição baseado em *PL* obteve um bom desempenho em ambas simulações.

#### 4.3.

##### Algoritmo de Reposição Ótima com Variância Mínima

Nesta seção, trata-se o problema de reposição ótima de componentes em estoque utilizando os conceitos de controle ótimo. A lei de controle é definida a partir da minimização, em relação à variável  $u(k)$ , da seguinte função de custo quadrática:

$$J(k) = (\hat{y}(k+j|k) - w(k+j))^2 \quad (4.11)$$

Na eq. (4.11),  $w(k+j)$  é o valor do objetivo de estoque. A minimização da eq. (4.11) significa que o pedido de reposição de estoque no instante de tempo  $k$  será tal que o erro entre o valor previsto da posição de estoque  $\hat{y}(k)$ , no instante de tempo  $k+j$ , e o valor do objetivo para o mesmo seja mínimo (variância mínima), considerando toda a informação disponível até o instante de tempo  $k$ . Para a solução deste problema, é necessário inicialmente conhecer o cálculo da previsão da posição de estoque no instante de tempo  $k+j$  apresentada na eq. (3.33).

Substituindo a eq. (3.33) na função de custo quadrática eq. (4.11) obtém-se:

$$J(k) = (u(k) + \hat{y}_l(k+j|k) - w(k+j))^2 \quad (4.12)$$

Desenvolvendo a eq. (4.12) obtém-se :

$$J(k) = u^2(k) + 2u(k)(\hat{y}_l(k+j|k) - w(k+j)) + (\hat{y}_l(k+j|k) - w(k+j))^2 \quad (4.13)$$

Uma vez que o termo independente de  $u(k)$  não interfere na minimização de  $J(k)$  em relação a  $u(k)$ , obtém-se:

$$J(k) = u^2(k) + 2u(k)(\hat{y}_l(k+j|k) - w(k+j)) \quad (4.14)$$

Portanto a partir da eq. (4.14) há duas soluções possíveis. A primeira solução trata o problema de minimização sem restrição no ambiente produtivo. Neste caso o pedido de reposição ótima é encontrado derivando-se a eq. (4.14) em relação a  $u(k)$  e igualando a zero. Assim sendo, obtém-se:

$$\begin{aligned}\frac{\partial J(k)}{\partial u(k)} &= 2u(k) + 2(\hat{y}_l(k+j) - w(k+j)) \\ u(k) &= w(k+j) - \hat{y}_l(k+j)\end{aligned}\quad (4.15)$$

Substituindo a eq. (3.34) na eq. (4.15) obtém-se o valor da reposição ótima de componentes em estoque. Este valor é dado pela demanda prevista no intervalo de tempo  $k$  até  $k+d$ , pelos pedidos das reposições passadas no intervalo de tempo  $k-1$  até  $k-d$ , pela posição atual e pelo objetivo do estoque em  $k+d+1$ .

$$\begin{aligned}u(k) &= -u(k-1) - u(k-2) - \dots - u(k-d) + \hat{d}(k|k) + \hat{d}(k+1|k) + \dots + \\ &\hat{d}(k+d|k) - y(k) + w(k+d+1)\end{aligned}\quad (4.16)$$

O seu digrama de blocos em malha fechada é apresentado pela Figura 4.7.

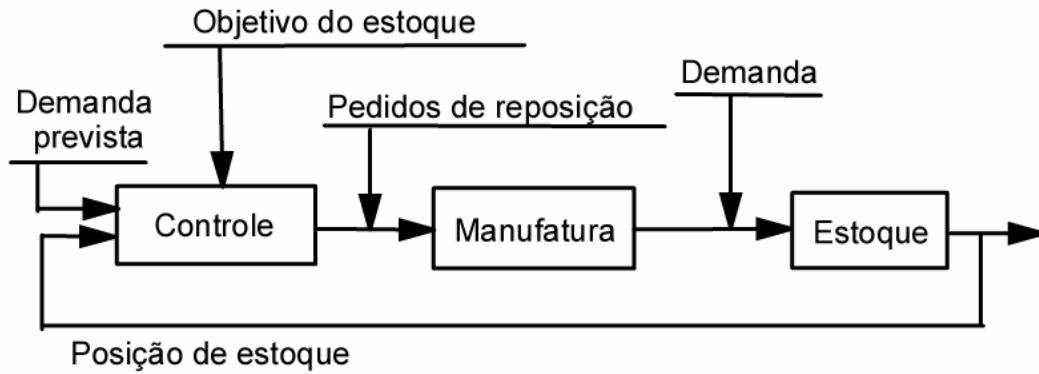


Figura 4.7: Diagrama de blocos do sistema de controle de estoque sem restrições produtivas.

Uma técnica similar a esta aqui apresentada foi descrita em (Vassian, 1954). Neste trabalho citado, foi proposta a utilização de reposição em estoque em cada instante de tempo  $k$ , de modo a minimizar o erro entre o objetivo de estoque e o valor calculado da posição de estoque. O sistema produtivo opera em tempo discreto e está em malha fechada. A equação de reposição de estoque proposta em (Vassian, 1954) é apresentada a seguir:

$$\begin{aligned}u(k) &= -u(k-1) - u(k-2) - \dots - u(k-d) + \hat{d}(k+1|k) + \dots + \hat{d}(k+d+1|k) - \\ &y(k) + w(k)\end{aligned}\quad (4.17)$$

Comparando a eq. (4.16) e eq.(4.17) conclui-se que, apesar das propostas semelhantes, as duas leis de controle apresentam diferenças no conjunto de sinais utilizados para a demanda e objetivo de estoque. Em particular, o algoritmo aqui descrito tem características antecipativas no que diz respeito ao objetivo de estoque.



A seguir resultados de simulação ilustram o desempenho destas duas técnicas de reposição de estoque.

### 4.3.1. Exemplo

Neste exemplo, apresentam-se o desempenho da técnica de controle ótimo e da técnica de reposição em estoque proposta por (Vassian, 1954). O sistema produtivo apresenta as mesmas condições operacionais presentes no exemplo 4.1.1, quando no ambiente produtivo não há restrições produtivas.

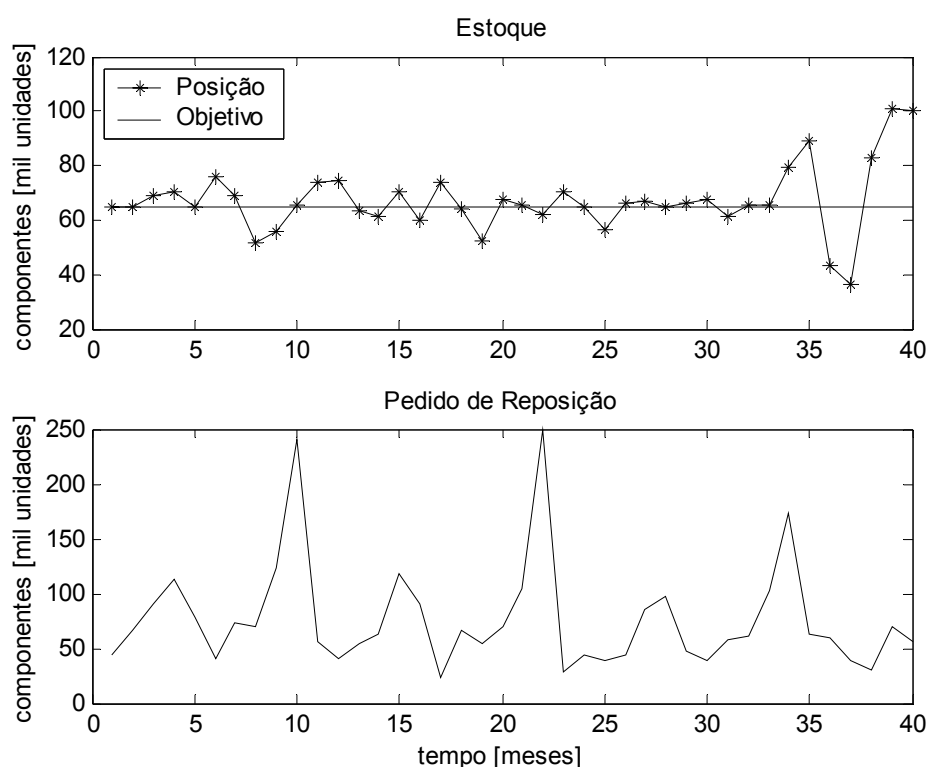


Figura 4.8: Comportamento do sistema produtivo para reposição ótima por VM com *lead time* produtivo de um mês e sem restrições produtivas.

Na Figura 4.8, nota-se que a reposição de componentes consegue atender a demanda de mercado, com isto não há rupturas no estoque. O sistema de reposição é capaz de minimizar o erro entre a posição e o objetivo de estoque reduzindo ao máximo os custos totais de produção. A Tabela 4.5, contém os custos do sistema de reposição ótima por VM descrito na seção anterior, sem restrições produtivas, para diferentes cenários de simulação (representados aqui por variações de *lead times* ( $Lt$ )).

| Simulação  | Lt | Cfc  | Cfe | Cmc | Ct   |
|------------|----|------|-----|-----|------|
| 1° Cenário | 0  | 3028 | 0   | 455 | 3483 |
| 2° Cenário | 1  | 3065 | 0   | 617 | 3682 |
| 3° Cenário | 2  | 3078 | 0   | 665 | 3743 |
| 4° Cenário | 3  | 3061 | 0   | 691 | 3752 |

Tabela 4.5: Custos do sistema de reposição ótima por VM sem restrições produtivas.

Na Tabela 4.5, observa-se que não há uma variação significativa nos custos ( $C_{tc}$ ) do sistema produtivo e não há custos relacionados a falta de componentes em estoque. Entretanto, custos ( $C_{mc}$ ) apresentam baixo crescimento para variações de *lead time* (1,2,3) caracterizando uma convergência da posição de estoque para o objetivo de estoque. Deste modo, o desempenho do sistema produtivo é superior as técnicas analisadas anteriormente.

A seguir a técnica de reposição proposta por (Vassian, 1954) é discutida.

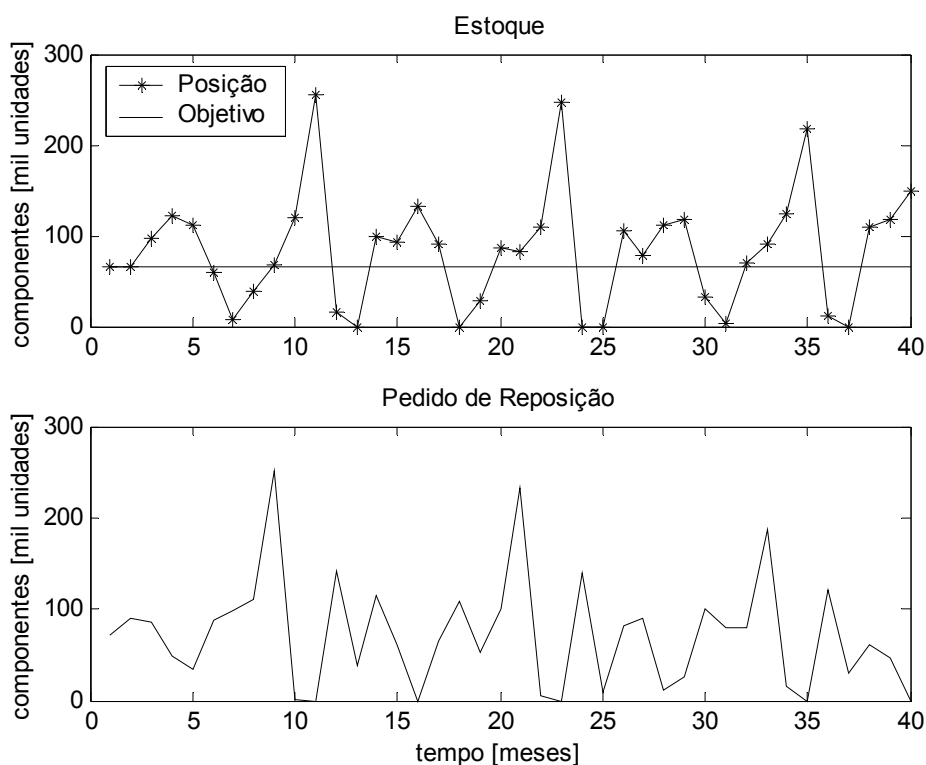


Figura 4.9: Comportamento do sistema produtivo proposto por (Vassian, 1954).

Na Figura 4.9, apresenta-se o desempenho do sistema produtivo para o *lead time* de um mês na proposta de Vassian. Nota-se que este algoritmo não consegue produzir o necessário para atender os picos de demanda do mercado. Com isto, a ruptura de estoque é inevitável devido ao comprometimento do nível de serviço, ou seja, a quantidade de faltas cometidas é superior a prevista conforme descrito no exemplo 4.1.1. A Tabela 4.6, contém os custos do sistema

de reposição proposto em (Vassian, 1954), sem restrições produtivas e para diferentes cenários de simulação (variações de *lead times* (*Lt*)).

| Simulação  | Lt | Cfc  | Cfe | Cmc  | Ct   |
|------------|----|------|-----|------|------|
| 1° Cenário | 0  | 2882 | 276 | 1833 | 4991 |
| 2° Cenário | 1  | 2876 | 444 | 2700 | 6020 |
| 3° Cenário | 2  | 2956 | 388 | 3135 | 6479 |
| 4° Cenário | 3  | 2955 | 275 | 3163 | 6393 |

Tabela 4.6: Custos do sistema com reposição proposta em (Vassian, 1954) sem restrições produtivas.

Na Tabela 4.6, observa-se que não há uma variação significativa nos custos (*Cfc*) do sistema produtivo com o aumento do *lead time*, porém, são observadas faltas (custo *Cfe*) que apesar de terem baixa influência no custo total, implicam em quebra do nível de serviço, comprometendo o sistema produtivo no atendimento ao cliente. O custo (*Cmc*) apresenta variações significativas para aumento de *lead time*, isto caracteriza que não há uma convergência da posição de estoque para o objetivo de estoque. O custo total (*Ct*) é superior quando comparado com as técnicas de reposição por controle ótimo e programação linear.

A seguir, o problema de reposição de componentes em estoque na presença de restrições produtivas é analisado. Restrições produtivas são consideradas no modelo com o intuito de descrever e analisar a realidade de um sistema produtivo. Uma técnica que incrementa o estoque estratégico é proposta para auxiliar a produção nos períodos em que há previsão de picos de demanda do mercado.

A solução tratada a seguir aborda o problema de minimização com restrição do ambiente produtivo. Neste caso, a reposição ótima para o sistema de estoque no instante de tempo  $k$  é obtida resolvendo-se o seguinte problema de otimização quadrática de uma variável (eq. (4.14)):

$$\begin{aligned} \min_{u(k)} \quad & u^2(k) + 2u(k)(\hat{y}_l(k+j|k) - w(k+j)) \\ \text{s.to} \quad & u_{\min} \leq u(k) \leq u_{\max} \end{aligned} \quad (4.18)$$

Geralmente o sistema de controle da posição de estoque não pode atender a chegada de picos de demanda de longa duração, devido às restrições de capacidade da manufatura. É comum utilizar um estoque de segurança/estratégico ou ambos para prevenir a falta de componentes (Tubino, 2000) (Slack *et al.*, 1999) e (Corrêa *et al.*, 2000). Assim, uma estratégia que incrementa a quantidade de componentes no estoque antes da chegada de tais

picos, evitando a falta de componentes no estoque é necessária. Nesta seção propõe-se uma metodologia para solucionar este tipo de problema. Isto é feito alterando o objetivo do estoque antecipando a chegada do pico, de tal forma que, mesmo com a capacidade limitada o sistema de gestão é capaz de atender a demanda prevista.

O método se resume em: suponha que um pico de demanda que extrapola a capacidade produtiva  $Cp(k)$  é previsto “ $p$ ” unidades de tempo no futuro. Uma taxa  $T_x(k)$  constante incrementa a taxa de ajuste  $P_d(k)$  conforme é apresentada na eq. (4.19). A partir de um determinado valor definido a priori, o objetivo de estoque  $w(k)$  é incrementado pelo valor de  $P_d(k)$  conforme a eq. (4.20) até o horizonte “ $p$ ”.

$$T_x(k) = \frac{\hat{d}(k) - Cp(k)}{p} \quad (4.19)$$

$$P_d(k) = P_d(k-1) + T_x(k)$$

$$w(k+1) = w(k) + P_d(k) \quad (4.20)$$

Substituindo a eq. (4.19) na eq. (4.20) tem-se:

$$w(k) = \frac{P_d(k-2)}{(1-q^{-1})} + \frac{\hat{d}(k-1) - Cp(k-1)}{p(1-q^{-1})} \quad (4.21)$$

Na Figura 4.11, apresenta-se a composição das duas estratégias que compõem o sistema de reposição de componentes em estoque quando há restrição de capacidade na manufatura. Na estratégia de supervisão a prevenção de falta de componentes é tratada e na estratégia de controle os pedidos ótimos de reposição.

Nesta figura, o objetivo de estoque (na estratégia de supervisão) é ajustado com base, no valor do objetivo do estoque definido a priori, da demanda prevista, na capacidade produtiva e na previsão do pico de demanda. O valor do objetivo de estoque é modificado quando o sistema percebe a chegada de picos de demanda que não podem ser atendidos com a capacidade de manufatura instalada. Com base no valor do objetivo calculado para o estoque, na demanda prevista e na posição atual do estoque, o sistema de controle (posicionado na estratégia de controle) calcula um pedido ótimo de reposição, que entra na manufatura e leva  $d$  unidades de tempo (*lead time* de manufatura) para ser recebido pelo estoque.

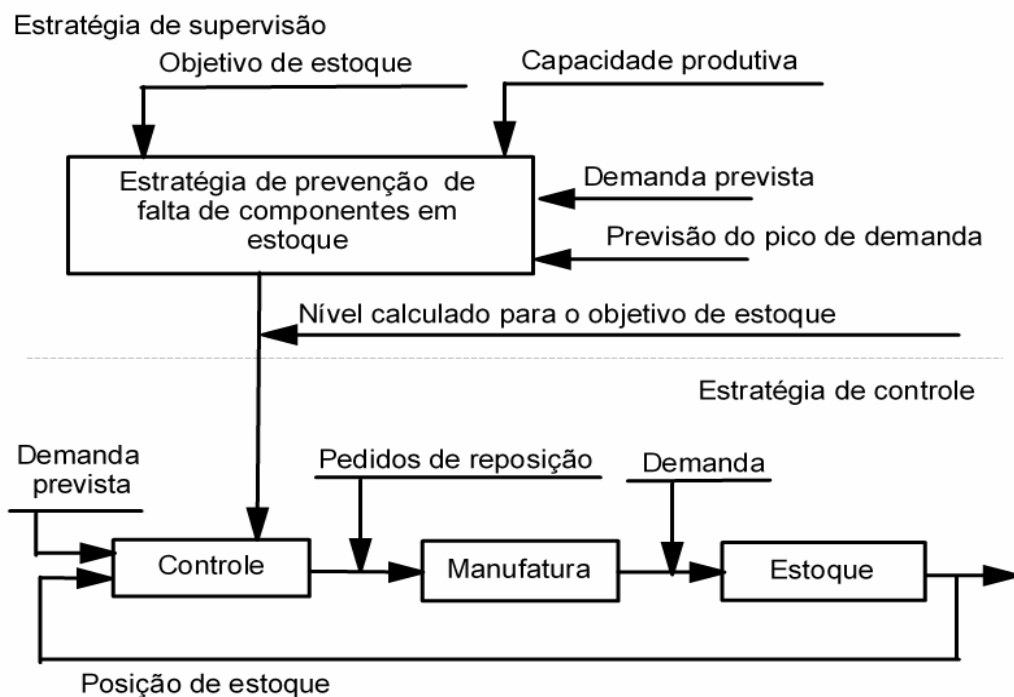


Figura 4.10: Sistema de controle de estoque composto de duas estratégias.

A Figura 4.11 apresenta as variáveis envolvidas na estratégia do sistema de controle e na estratégia para a prevenção do pico de demanda.

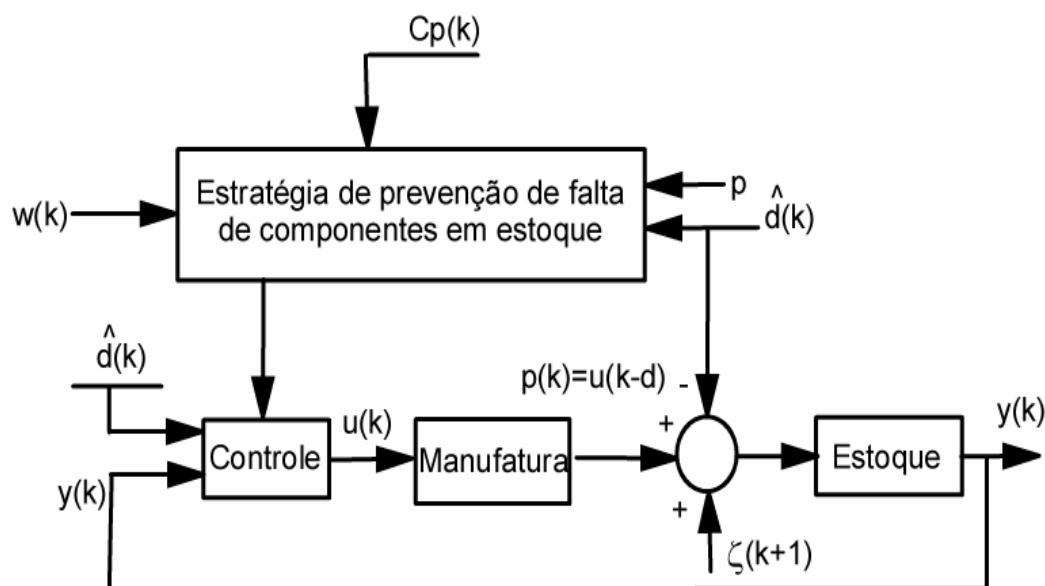


Figura 4.11: Diagrama de blocos do sistema de reposição de componentes em estoque composto de duas estratégias para prevenção do pico de demanda.

### 4.3.2. Exemplo

Neste exemplo apresenta-se o desempenho da técnica de controle ótimo. O sistema produtivo apresenta as mesmas condições operacionais presentes no exemplo (4.1.1) quando no ambiente produtivo considera-se restrições produtivas.

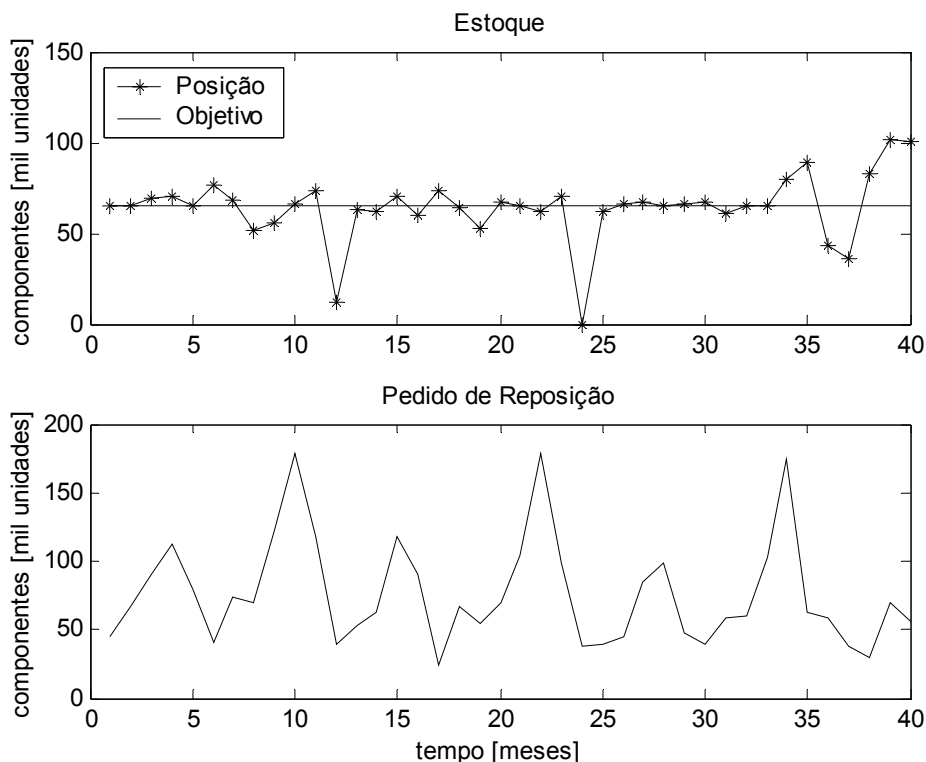


Figura 4.12: Comportamento do sistema produtivo para reposição ótima por VM com *lead time* produtivo de um mês e com restrições produtivas.

Na Figura 4.12, observa-se que o sistema de reposição ótima de componentes não consegue atender a demanda de mercado devido as condições de restrições impostas ao ambiente produtivo. Com isto, uma ruptura de estoque é observada implicando em perdas para o sistema produtivo, entretanto, o nível de serviço está garantido. Observa-se também que o sistema de reposição é capaz de minimizar o erro entre a posição e o objetivo de estoque reduzindo ao máximo os custos totais de produção. A Tabela 4.7, contém os custos do sistema de reposição ótima por VM com restrições produtivas, para diferentes cenários de simulação (representados aqui por variações de *lead times* ( $Lt$ )).

| Simulação  | Lt | Cfc  | Cfe | Cmc | Ct   |
|------------|----|------|-----|-----|------|
| 1° Cenário | 0  | 3024 | 127 | 537 | 3688 |
| 2° Cenário | 1  | 3059 | 4   | 672 | 3735 |
| 3° Cenário | 2  | 3051 | 7   | 753 | 3831 |
| 4° Cenário | 3  | 3055 | 25  | 778 | 3858 |

Tabela 4.7: Custos do sistema com reposição ótima por VM com restrições produtivas.

Na Tabela 4.7, observa-se que não há uma variação significativa nos custos ( $C_{fc}$ ) do sistema produtivo com o aumento do *lead time*, porém, são observadas faltas (custo  $C_{fe}$ ) que apesar de terem baixa influência no custo total, não implicam em quebra do nível de serviço com isto, não comprometendo o sistema produtivo no atendimento ao cliente. O custo ( $C_{mc}$ ) apresenta crescimento para aumento de *lead time*, isto caracteriza que não há uma convergência da posição de estoque para o objetivo de estoque. O custo total ( $C_t$ ) é menor quando comparado com as técnicas por compensação *feedforward* e de programação linear.

A seguir o sistema de prevenção de falta de componentes em estoque é utilizado no sentido de evitar a ruptura de estoque e assume-se uma previsão de quatro meses para o início do acúmulo de componentes em estoque.

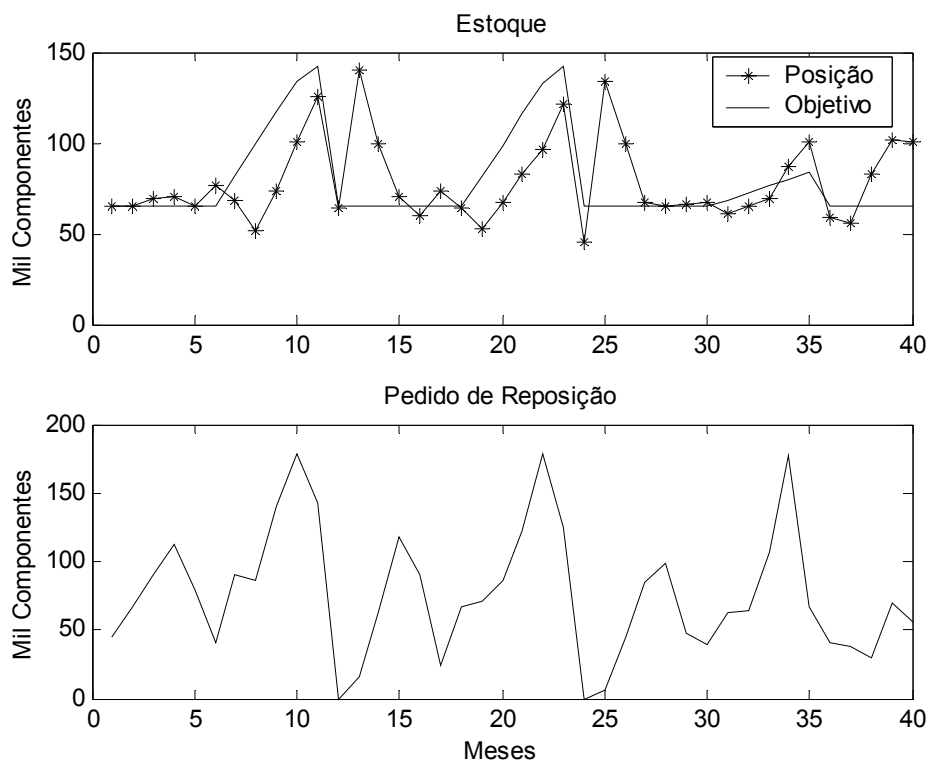


Figura 4.13: Comportamento do sistema produtivo utilizando a estratégia de prevenção de falta de componentes.

Na Figura 4.13, nota-se que a reposição de componentes consegue atender a demanda de mercado mesmo com um *lead time* produtivo de um mês e restrições produtivas. Não há rupturas no estoque e o nível de serviço está garantido. Observa-se também que um estoque estratégico foi adicionado ao objetivo de estoque com o intuito de evitar faltas, e o incremento foi iniciado quatro meses antes da chegada do pico. Por exemplo, no intervalo de tempo referente aos meses 7 e 11. Após o término do pico de mercado o objetivo de estoque retorna ao seu valor definido a priori. A Tabela 4.8, contém os custos do sistema de reposição ótima por VM com restrições produtivas, para diferentes cenários de simulação (variações de *lead times* (*Lt*)).

| Simulação  | Lt | Cfc  | Cfe | Cmc  | Ct   |
|------------|----|------|-----|------|------|
| 1° Cenário | 0  | 3028 | 0   | 3882 | 6910 |
| 2° Cenário | 1  | 3065 | 0   | 3882 | 6947 |
| 3° Cenário | 2  | 3082 | 0   | 3882 | 6964 |
| 4° Cenário | 3  | 3065 | 0   | 3882 | 6947 |

Tabela 4.8: Custos do sistema com reposição ótima por VM quando é utilizada a estratégia de prevenção de falta de componentes.

Na Tabela 4.8, observa-se que não há uma variação significativa nos custos do sistema produtivo. Um aumento do custo relacionado ao incremento do estoque de segurança é observado no custo (*Cmc*) que assume um valor constante independente do *lead time* produtivo. Com isto, o custo (*Ct*) é superior se comparado as técnicas anteriores. O aumento do custo pode ser explicado, devido a um acréscimo de 612 unidades padrão monetária relacionada ao estoque estratégico que influencia o desempenho total do sistema.

A seguir utilizam-se os mesmos critérios considerados acima, porém com a redução de 70% do objetivo de estoque, ou seja, o estoque de segurança assume o valor de  $ss = 0.30 \cdot 64000$  e  $ss = 19200$  componentes. Analisa-se o desempenho do sistema produtivo utilizando a estratégia de pico. A Tabela 4.9 contém o desempenho do sistema produtivo.

| Simulação  | Lt | Cfc  | Cfe | Cmc  | Ct   |
|------------|----|------|-----|------|------|
| 1° Cenário | 0  | 3026 | 33  | 1135 | 4194 |
| 2° Cenário | 1  | 3065 | 0   | 1164 | 4229 |
| 3° Cenário | 2  | 3056 | 206 | 1106 | 4368 |
| 4° Cenário | 3  | 3003 | 206 | 1106 | 4316 |

Tabela 4.9: Custos do sistema com reposição ótima por VM quando é utilizada a estratégia de prevenção de falta de componentes e redução do objetivo de estoque.



Na Tabela 4.9, observa-se que não há uma variação significativa nos custos ( $C_t$ ), ( $C_{fc}$ ) e ( $C_{mc}$ ) do sistema produtivo. Observa-se também que há uma redução da ordem de 40% nos custos de manter o componente em estoque. O custo ( $C_{fe}$ ), apresenta valores caracterizando que há falta de estoque em determinados meses do período produtivo, porém sem comprometer o nível de serviço. Com isto, conclui-se que esta estratégia possui grande flexibilidade para gestão de estoque e facilita a inserção de outras configurações de planejamento para redução dos estoques.

#### 4.4.

#### Algoritmo de Reposição Ótima com Horizonte Rolante

A aplicação e implementação de controladores preditivos têm sido feita ao longo dos anos e demonstra grande versatilidade e capacidade para solucionar problemas em diversas áreas de pesquisa. Por exemplo, controle (Richalet, 1978) (Clarke *et al.*, 1987) (Clarke & Mohtadi, 1989) (Souza & Lima, 1990) (Rossiter *et al.*, 1991).

Nesta seção, trata-se do problema da reposição ótima de componentes em estoque utilizando a técnica de controle ótimo com horizonte rolante. Os sinais de controle gerados são baseados nas informações previstas do sistema  $j$  passos à frente conforme descrito na subseção (3.3.2.).

O procedimento para gestão de estoques está baseado na representação do desempenho do sistema de estoque através de uma função de custo e na minimização desta função em relação às futuras ordens de fabricação de componentes, isto é, o vetor  $\mathbf{u}(k)$ .

Seja a função de custo dada por:

$$J(k) = \|\hat{\mathbf{y}}(k) - \mathbf{w}(k)\|_{n,\Xi} + \|\mathbf{u}(k)\|_{n,\Gamma} \quad (4.22)$$

Substituindo a eq. (3.49) de previsão da saída  $\hat{\mathbf{y}}(k)$  nesta equação e, sem perda de generalidade, considerando  $\Xi$  um vetor cujos  $N_y$  componentes são iguais a 1 tal como  $\Xi = [1, 1, \dots, 1]$  e  $\Gamma$  um vetor cujos  $N_u$  componentes são iguais a  $\lambda$ , tal como  $\Gamma = [\lambda, \lambda, \lambda, \dots, \lambda]$ , obtém-se:

$$J(k) = \|\mathbf{H}\mathbf{u}(k) + \mathbf{y}_l(k) - \mathbf{w}(k)\|_n + \|\lambda\mathbf{u}(k)\|_n \quad (4.23)$$

A minimização deste critério de custo em relação às futuras ordens de reposição é dada por:

$$\begin{aligned}
& \min_{\mathbf{u}(k)} J(k) \\
& \text{s.to } \mathbf{y}_{\min} \leq \hat{\mathbf{y}}(k) \leq \mathbf{y}_{\max} \\
& \quad \mathbf{u}_{\min} \leq \mathbf{u}(k) \leq \mathbf{u}_{\max}
\end{aligned} \tag{4.24}$$

onde  $\mathbf{y}_{\min}$ ,  $\mathbf{y}_{\max}$ ,  $\mathbf{u}_{\min}$  e  $\mathbf{u}_{\max}$  são vetores cujas componentes são  $y_{\min}$ ,  $y_{\max}$ ,  $u_{\min}$  e  $u_{\max}$ . Este problema de otimização é equivalente a:

$$\begin{aligned}
& \min_{\mathbf{u}(k)} \|\mathbf{H}\mathbf{u}(k) + \mathbf{y}_1(k) - \mathbf{w}(k)\|_n + \|\lambda \mathbf{u}(k)\|_n \\
& \text{s.to } \mathbf{y}_{\min} - \mathbf{y}_1(k) \leq \mathbf{H}\mathbf{u}(k) \leq \mathbf{y}_{\max} - \mathbf{y}_1(k) \\
& \quad \mathbf{u}_{\min} \leq \mathbf{u}(k) \leq \mathbf{u}_{\max}
\end{aligned} \tag{4.25}$$

Utilizando o quadrado da norma 2<sup>2</sup>, no critério de custo, chega-se a um problema clássico de programação quadrática, cuja solução é largamente estudada na literatura (Bazaraa & Shetty, 1979).

$$\begin{aligned}
& \min_{\mathbf{u}(k)} (\mathbf{H}\mathbf{u}(k) + \mathbf{y}_1(k) - \mathbf{w}(k))^2 + \lambda \mathbf{u}^2(k) \\
& \text{s.to } \mathbf{y}_{\min} - \mathbf{y}_1(k) \leq \mathbf{H}\mathbf{u}(k) \leq \mathbf{y}_{\max} - \mathbf{y}_1(k) \\
& \quad \mathbf{u}_{\min} \leq \mathbf{u}(k) \leq \mathbf{u}_{\max}
\end{aligned} \tag{4.26}$$

Desenvolvendo o problema (4.26) obtém-se:

$$J(k) = (\mathbf{H}\mathbf{u}(k) + \mathbf{y}_1(k) - \mathbf{w}(k))^T (\mathbf{H}\mathbf{u}(k) + \mathbf{y}_1(k) - \mathbf{w}(k)) + \lambda \mathbf{u}^T(k) \mathbf{u}(k) \tag{4.27}$$

ou:

$$J(k) = (\mathbf{u}^T(k) \mathbf{H}^T + (\mathbf{y}_1(k) - \mathbf{w}(k))^T) (\mathbf{H}\mathbf{u}(k) + \mathbf{y}_1(k) - \mathbf{w}(k)) + \lambda \mathbf{u}^T(k) \mathbf{u}(k) \tag{4.28}$$

Desenvolvendo-se a eq. (4.28) chega-se a seguinte equação:

$$\begin{aligned}
J(k) = & \mathbf{u}^T(k) (\mathbf{H}^T \mathbf{H} + \lambda \mathbf{I}) \mathbf{u}(k) + 2(\mathbf{y}_1(k) - \mathbf{w}(k))^T \mathbf{H}\mathbf{u}(k) + \\
& (\mathbf{y}_1(k) - \mathbf{w}(k))^T (\mathbf{y}_1(k) - \mathbf{w}(k))
\end{aligned} \tag{4.29}$$

Que corresponde ao seguinte problema de otimização:

$$\begin{aligned}
& \min_{\mathbf{u}(k)} \mathbf{u}^T(k) (\mathbf{H}^T \mathbf{H} + \lambda \mathbf{I}) \mathbf{u}(k) + 2\mathbf{u}^T(k) \mathbf{H}^T (\mathbf{y}_1(k) - \mathbf{w}(k)) \\
& \text{s.to } \mathbf{y}_{\min} - \mathbf{y}_1(k) \leq \mathbf{H}\mathbf{u}(k) \leq \mathbf{y}_{\max} - \mathbf{y}_1(k) \\
& \quad \mathbf{u}_{\min} \leq \mathbf{u}(k) \leq \mathbf{u}_{\max}
\end{aligned} \tag{4.30}$$

onde  $\mathbf{I}$  é a matriz identidade. Nota-se que, no problema de otimização (4.27) todos os elementos, exceto o vetor a ser otimizado  $\mathbf{u}(k)$  podem ser calculados a

---

<sup>2</sup> A norma 2 é representada através do somatório dos módulos do vetor  $\mathbf{x}$  ao quadrado e extraído a sua raiz quadrada tal como:  $\|\mathbf{x}\|_2 = \left( \sum_{i=1}^n |x_i|^2 \right)^{1/2}$

priori no instante de tempo  $k$ , através das eq. (3.45), eq. (3.48) e eq.(3.50). Este esquema é implementado no sistema iterativamente, ou seja, para cada instante de tempo  $k$ , calcula-se um novo valor ótimo para o vetor  $\mathbf{u}(k)$  considerando o horizonte de previsão do sinal de controle  $N_u$  e calcula-se o vetor  $\hat{\mathbf{y}}(k)$ , considerando o horizonte de previsão do sinal de saída  $N_y$ , até o final do horizonte produtivo  $N$ . Neste tipo de problema considera-se somente o primeiro elemento do vetor  $\mathbf{u}(k)$  para ser implementado no sistema.

Esta equação é equivalente à:

$$J = \frac{1}{2} [\mathbf{u}^T(k) \mathbf{Q} \mathbf{u}(k)] + \mathbf{C}^T \mathbf{u}(k) \quad (4.31)$$

onde:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{H}^T \mathbf{H} + \lambda \mathbf{I} \quad (4.32)$$

$$\mathbf{C}^T = (\mathbf{y}_1(k) - \mathbf{w}(k))^T \mathbf{H}$$

As restrições do problema (4.27) são descritas como uma desigualdade matricial do tipo  $\mathbf{A} \mathbf{u}(k) \leq \mathbf{B}$  onde  $\mathbf{A}$  e  $\mathbf{B}$  são matrizes determinadas em função do tipo de restrições presentes no problema de controle, que neste caso são definidas na eq. (3.20). A composição desta matriz é descrita a seguir:

$$\mathbf{A} \mathbf{u}(k) \leq \mathbf{B} \Rightarrow \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \end{bmatrix} \mathbf{u}(k) \leq \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{B}_2 \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

Cada submatriz representa um tipo de restrição, a submatriz  $\mathbf{A}_1$  em  $\mathbf{A}_1 \mathbf{u}(k) \leq \mathbf{B}_1$  contém as restrições na amplitude do sinal de controle (eq. (3.20)) e  $N_u$  representa o horizonte de previsão do sinal de controle esta representação tem a seguinte forma:

$$\mathbf{A} \mathbf{u}(k) \leq \mathbf{B} \Rightarrow \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \end{bmatrix} \mathbf{u}(k) \leq \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{B}_2 \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

As submatrizes  $\mathbf{A}_1$ ,  $\mathbf{u}(k)$  e  $\mathbf{B}_1$  tem a seguinte representação:

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & \vdots \\ -1 & -1 & 0 & \vdots \\ 1 & 1 & 0 & \vdots \\ \dots & & & \end{bmatrix}, \mathbf{u}(k) = \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ u(k+2) \\ \vdots \\ u(k+N_u) \end{bmatrix} \text{ e } \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} -u_{min} \\ u_{min} \\ -u_{max} \\ u_{max} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

A restrição da submatriz  $\mathbf{A}_2$  em  $\mathbf{A}_2 \mathbf{u}(k) \leq \mathbf{B}_2$  contém as restrições na amplitude do sinal de saída (eq. (3.20)) e tem a seguinte forma:

$$A u(k) \leq B \Rightarrow \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} u(k) \leq \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

As submatrizes  $A_2$ ,  $u(k)$  e  $B_2$  tem a seguinte representação:

$$A_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{H} \\ -\mathbf{H} \end{bmatrix}, u(k) = \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ u(k+2) \\ \vdots \\ u(k+N_u) \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad B_2 = \begin{bmatrix} y_{\max} - \mathbf{y}_1(k) \\ -y_{\min} + \mathbf{y}_1(k) \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

A seguir analisa-se o comportamento do sistema produtivo sem e com restrições operacionais utilizando a técnica de controle ótimo com horizonte rolante.

#### 4.4.1. Exemplo

Neste exemplo apresenta-se o desempenho da técnica de controle ótimo com horizonte rolante. O sistema produtivo apresenta as mesmas condições operacionais presentes no exemplo 4.1.1 quando no ambiente produtivo não se considera restrições produtivas.

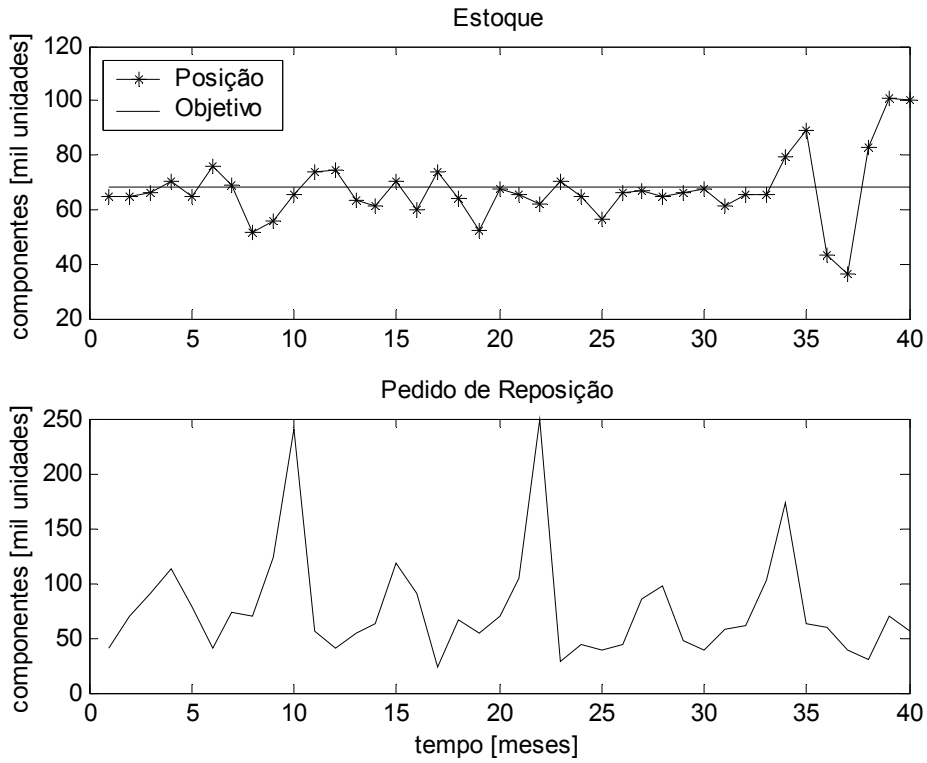


Figura 4.14: Comportamento do sistema produtivo para reposição ótima com horizonte rolante, *lead time* produtivo de um mês sem restrições produtivas.

Na Figura 4.14, nota-se que a reposição de componentes consegue atender a demanda de mercado mesmo com um *lead time* produtivo de um mês. Rupturas de estoque não são observadas e o nível de serviço do estoque está garantido. Este tipo de sistema de reposição está baseado no ajuste de determinados parâmetros (horizonte de previsão ( $N_y = 2$ ), horizonte do sinal de controle ( $N_u = 1$ ) e fator de ponderação representado por  $\lambda = 0$ ). Nesta figura, observa-se também que o seu comportamento é similar ao da técnica de previsão de um passo. A seguir a Tabela 4.10, contém os custos do sistema de reposição sem restrições produtivas e os parâmetros definidos para diferentes cenários de simulação (variações de *lead times* ( $Lt$ )).

| Simulação  | Lt | Cfc  | Cfe | Cmc  | Ct    | $N_y$ | $N_u$ | $\lambda$ |
|------------|----|------|-----|------|-------|-------|-------|-----------|
| 1° Cenário | 0  | 3028 | 0   | 455  | 3483  | 1     | 1     | 0         |
| 2° Cenário | 1  | 3064 | 0   | 602  | 3666  | 2     | 1     | 0         |
| 3° Cenário | 2  | 3083 | 0   | 2461 | 5544  | 2     | 2     | 0.69      |
| 4° Cenário | 3  | 3187 | 0   | 7743 | 10930 | 5     | 5     | 1         |

Tabela 4.10: Custos do sistema para reposição ótima com horizonte rolante, sem restrições produtivas.

Na Tabela 4.10, observa-se que há uma variação significativa no custo total do sistema produtivo em função do aumento do *lead time*, rupturas de estoque não são observadas e com isto, garante-se o nível de serviço. Observa-se também, que o custo ( $Cmc$ ) apresenta crescimento acentuado para o 3° e 4° cenário de simulação, caracterizando um aumento no erro entre a posição e o objetivo e estoque. Por consequência há um acréscimo de produtos a serem armazenados no estoque. Devido à flexibilidade deste algoritmo, outras configurações para os parâmetros ( $N_y$ ,  $N_u$  e  $\lambda$ ) podem produzir reduções significativas nos custos do sistema produtivo.

A seguir apresenta-se o desempenho desta técnica de controle. Considerando as mesmas condições operacionais presentes no exemplo 4.1.1 (i.e., quando no ambiente produtivo se considera restrições produtivas).

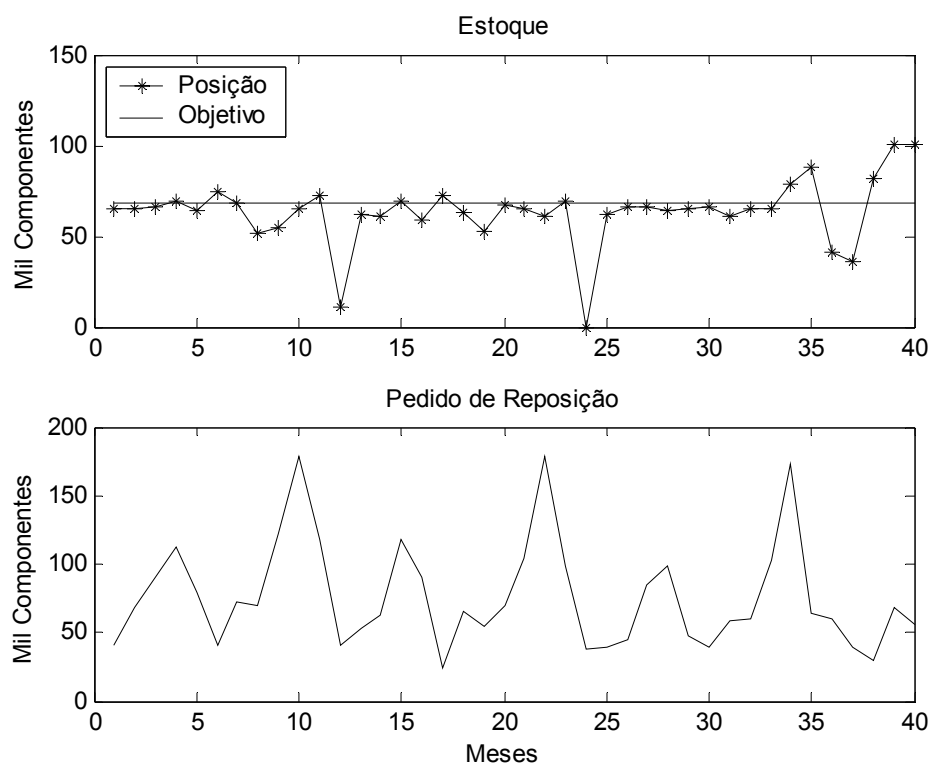


Figura 4.15: Comportamento do sistema produtivo para reposição ótima com horizonte rolante, *lead time* produtivo de um mês com restrições produtivas.

Na Figura 4.15, nota-se que a reposição de componentes consegue atender a demanda de mercado com um *lead time* produtivo de um mês e restrições produtivas. Neste caso, os parâmetros do sistema de reposição foram  $N_y = 2$ ,  $N_u = 1$  e  $\lambda = 0.01$ . Uma ruptura é observada e não compromete o nível de serviço. Nota-se que uma quantidade representativa de componentes repostos em estoque assume valor próximo do objetivo de estoque como era o esperado. A seguir a Tabela 4.11, contém os custos, e os parâmetros do sistema de reposição ótima com horizonte rolante na presença de restrições produtivas, para diferentes cenários de simulação (variações de *lead times* ( $Lt$ )).

| Simulação  | $Lt$ | $C_{fc}$ | $C_{fe}$ | $C_{mc}$ | $C_t$ | $N_y$ | $N_u$ | $\lambda$ |
|------------|------|----------|----------|----------|-------|-------|-------|-----------|
| 1° Cenário | 0    | 3024     | 127      | 537      | 3688  | 1     | 1     | 0         |
| 2° Cenário | 1    | 3054     | 3        | 659      | 3721  | 2     | 1     | 0.01      |
| 3° Cenário | 2    | 3134     | 0        | 1732     | 4866  | 6     | 4     | 0         |
| 4° Cenário | 3    | 3067     | 195      | 1837     | 5099  | 10    | 6     | 0         |

Tabela 4.11: Custos do sistema para reposição ótima com horizonte rolante, com restrições produtivas.

Na Tabela 4.11, observa-se que há uma variação significativa nos custos totais do sistema produtivo. Observa-se também, que o custo ( $C_{mc}$ ) apresenta

crescimento acentuado para o 3° e 4° cenário de simulação, caracterizando um aumento no erro entre a posição e o objetivo de estoque. Por consequência há um acréscimo de componentes a serem armazenados no estoque. Os custos relacionados a falta de componentes em estoque ( $C_{fe}$ ) apresentam valores não significativos se comparados aos custos totais do sistema produtivo, apesar de rupturas de estoque serem observadas não há comprometimento do nível de serviço. Devido à flexibilidade deste algoritmo, outras configurações para os parâmetros ( $N_y$ ,  $N_u$  e  $\lambda$ ) podem produzir reduções significativas nos custos do sistema produtivo apesar de serem consideradas as restrições no sistema produtivo.

#### 4.4.2.

#### Análise de Desempenho dos Algoritmos de Reposição Ótima em Estoque

A seguir apresenta-se uma análise comparativa entre os quatro algoritmos de reposição em estoque desenvolvidos. Inicialmente, analisa-se o desempenho do sistema produtivo quando não há restrições operacionais produtivas e posteriormente quando há restrições operacionais produtivas. Na análise comparativa, cria-se um ranking de desempenho do sistema produtivo baseado no custo total e no *lead time* do sistema produtivo. Conforme apresentado nas tabelas anteriores. Em negrito destaca-se o desempenho do melhor sistema de reposição para cada *lead time* produtivo.

A Tabela 4.12, apresenta a análise comparativa dos algoritmos de reposição em estoque quando não há restrições produtivas.

| Desempenho dos Algoritmos de Reposição em Estoque |                         |                   |                  |                    |         |
|---------------------------------------------------|-------------------------|-------------------|------------------|--------------------|---------|
| Lt                                                | Compensação Feedforward | Horizonte Rolante | Variância Mínima | Programação Linear | Vassian |
| 0                                                 | 3597                    | <b>3483</b>       | <b>3483</b>      | 3934               | 4991    |
| 1                                                 | 3668                    | <b>3666</b>       | 3682             | 3935               | 6020    |
| 2                                                 | <b>3739</b>             | 5544              | 3743             | 3873               | 6479    |
| 3                                                 | 3791                    | 10930             | <b>3752</b>      | 3802               | 6393    |

Tabela 4.12: Análise comparativa do desempenho dos algoritmos de reposição em estoque quando não há restrições produtivas.

Na Tabela 4.12, observa-se que os algoritmos de reposição ótima por variância mínima e horizonte rolante apresentam desempenho superior em comparação com as outras técnicas de reposição. Entretanto, para aumento do *lead time* produtivo a técnica de horizonte rolante apresenta um baixo desempenho, isto pode ser justificado através da escolha dos parâmetros ( $N_y$ ,  $N_u$

e  $\lambda$ ). Por apresentar flexibilidade de ajuste, o algoritmo por horizonte rolante oferece infinitas soluções e novos ajustes nos parâmetros podem alterar os custos totais e melhorar o desempenho do sistema produtivo. Os algoritmos por compensação *feedforward* e programação linear apresentaram um bom desempenho se forem analisadas as condições operacionais do sistema em malha aberta. O algoritmo proposto por Vassian, apresenta um desempenho abaixo da expectativa, isto se deve ao fato de que, o algoritmo não possui características antecipativas em relação ao objetivo de estoque.

A Tabela 4.13, contém a análise comparativa dos algoritmos de reposição em estoque quando há restrições produtivas.

| Desempenho dos Algoritmos de Reposição em Estoque |                         |                   |                  |                    |                                         |
|---------------------------------------------------|-------------------------|-------------------|------------------|--------------------|-----------------------------------------|
| Lt                                                | Compensação Feedforward | Horizonte Rolante | Variância Mínima | Programação Linear | Variância Mínima com Estratégia de Pico |
| 0                                                 | 4832                    | <b>3688</b>       | <b>3688</b>      | 3969               | 6910                                    |
| 1                                                 | 5062                    | <b>3721</b>       | 3735             | 4042               | 6947                                    |
| 2                                                 | 5537                    | 4866              | <b>3831</b>      | 4052               | 6964                                    |
| 3                                                 | 5720                    | 5099              | <b>3858</b>      | 4041               | 6947                                    |

Tabela 4.13: Análise comparativa do desempenho dos algoritmos de reposição em estoque quando há restrições produtivas.

Na Tabela 4.13, observa-se que os algoritmos de reposição ótima por variância mínima e horizonte rolante apresentam desempenho superior em comparação com as outras técnicas de reposição, mesmo apresentando rupturas de estoque. O algoritmo por programação linear possui um bom desempenho se for analisada a condição de operação do sistema em malha aberta. Os algoritmos por compensação *feedforward* e por variância mínima com estratégia de tratamento de pico de mercado apresentam um baixo desempenho. Para o algoritmo por compensação *feedforward* pode-se justificar o baixo desempenho em função do sistema ser em malha aberta e pelas restrições operacionais do sistema que influenciam nas características antecipativas da demanda prevista apresentada na eq. (4.1). No algoritmo por variância mínima com a estratégia de tratamento de pico de mercado, observa-se um aumento nos custos totais de produção, devido ao incremento do objetivo de estoque. Entretanto, o aumento nos custos garante que nenhuma falta é cometida e por conseqüência não há perda de competitividade no mercado. Neste ponto pode-se colocar a seguinte discussão: o que seria melhor para um sistema produtivo aumentar os seus custos operacionais e atender aos seus clientes ou perder uma fatia do mercado consumidor devido a problemas



operacionais restritivos. As informações apresentadas na Tabela 4.9, não foram consideradas nesta análise. Por se tratar de um exemplo, que apresenta a flexibilidade do sistema de reposição por variância mínima quando se utiliza a estratégia de tratamento de pico de mercado e redução do objetivo de estoque.

## 5. Conclusões e Trabalhos Futuros

O problema de gerenciamento de estoques quer seja em ambiente produtivo ou na cadeia de suprimentos, torna-se um fator cada vez mais relevante para as empresas que desejam manter um nível de competitividade dentro de um mercado dinâmico que evolui a todo instante. Estoques na atualidade representam não somente capital investido ou custos, mas atendem as necessidades da produção, montagem, entrega, transporte, distribuição e facilitam a chegada dos produtos finais ao mercado consumidor.

A proposta desta pesquisa foi analisar e buscar soluções para gerenciar a posição de estoque em ambientes produtivos monocomponente, mononível (um echelon) composto de uma fase produtiva que pode ser de manufatura, entrega ou montagem de componentes para um estoque de segurança ou estratégico. Assumindo-se que o ambiente produtivo está sob a influência de incertezas na demanda prevista e sob ação de picos de demanda de mercado, dentro de um horizonte de planejamento produtivo. Considerou-se restrições na capacidade da fase produtiva bem como o seu *lead time*. Assim, procurou-se representar a realidade de um ambiente produtivo.

Como abordagem para este problema propôs-se a utilização de uma metodologia baseada na análise da dinâmica de sistemas produtivos, denominada *System Dynamics* (SD) ou Dinâmica de Sistemas. Esta abordagem tem como base a construção de modelos para capturar a estrutura organizacional do ambiente produtivo e analisar seu comportamento dinâmico seguindo ao longo do tempo. Uma vez que o contexto do trabalho foi a gerência de sistemas de armazenagem, os principais conceitos relativos a este subproblema presente em ambientes produtivos foram revisados. Baseado na metodologia de dinâmica de sistemas, construiu-se modelos de ambientes produtivos tipo IOBPCS em tempo contínuo com um nível produtivo e também formando cadeia de suprimentos (com os níveis do mercado varejista, do distribuidor e de fabricação de componentes). Destaca-se que estes modelos (IOBPCS) estavam sob ação da demanda prevista modelada através de uma função de primeira ordem em tempo contínuo e provou-se que esta demanda encontra o seu similar no modelo de previsão do alisamento exponencial simples em tempo discreto. Através do modelo do sistema, observou-se o efeito chicote e propôs-se soluções da sua redução. Para tanto, utilizou-se a redução do parâmetro de gestão ou projeto, ou seja, o controle do sistema. Deste modo, comprovou-se que variando o parâmetro de projeto do sistema pode-se obter

não somente a redução do efeito chicote, mas também a redução do regime transitório do sistema e com isto, obtendo uma convergência mais rápida para os valores definidos a priori conforme apresentado nas simulações. Tanto para um nível IOBPCS como também para os níveis da cadeia de suprimentos.

Um ambiente IOBPCS porém em tempo discreto foi proposto. A modelagem foi feita utilizando equações a diferenças e neste tipo de problema a característica principal apresentada foi a representação explícita do erro de previsão da demanda na equação do modelo. Restrições de capacidade produtiva e a demanda futura prevista foram consideradas. Algoritmos que tratam da reposição de componentes em estoque foram desenvolvidos e destacam-se os baseados em controle ótimo. Equações de previsão futura do comportamento do estoque, foram derivadas para composição dos algoritmos de controle ótimo por variância mínima e horizonte rolante. Estes dois algoritmos de reposição têm como característica principal o sistema em malha fechada que garante uma correção do pedido de reposição em função da posição atual do estoque. Deste modo o sistema em malha fechada torna-se menos sensível a variações nas incertezas de mercado. Entretanto, algoritmos de reposição baseados em programação linear e na compensação *feedforward* também foram analisados. As características destes dois últimos algoritmos são a estimação do pedido de reposição em malha aberta caracterizando que não há uma correção do pedido de reposição em função da posição atual do estoque e com isto, o sistema produtivo torna-se mais sensível as variações nas incertezas de mercado.

Na solução do problema de atendimento do pico de demanda quando há restrições de capacidade produtiva, uma estratégia relacionada a prevenção da falta de componentes em estoque foi adicionada ao sistema de controle ótimo por variância mínima para compor o algoritmo de reposição. Esta estratégia demonstrou grande versatilidade para prever a chegada do pico de demanda de mercado. Entretanto, custos foram adicionados ao sistema produtivo devido ao incremento de um estoque estratégico ao estoque de segurança. No qual influenciou o baixo desempenho do sistema quando foi considerado na análise do custo total produtivo. Por outro lado, obteve-se um atendimento ao cliente em sua plenitude, ou seja, não foi detectada nenhuma ruptura de estoque. Uma simulação que inclui a redução drástica da ordem de 70% do objetivo de estoque foi feita no sentido de demonstrar a flexibilidade desta técnica. Os resultados da simulação foram bastante satisfatórios, pois rupturas de estoque foram detectadas sem comprometer o nível de serviço e uma redução do custo de

manter componentes em estoque foi observada, sem a perda da operacionalidade do sistema produtivo.

Simulações em tempo discreto considerando ou não as restrições operacionais na manufatura e incertezas na demanda de mercado foram feitas no sentido de validar as técnicas de controle ótimo apresentadas neste trabalho de pesquisa. Os resultados obtidos quando não há restrições operacionais demonstraram que os algoritmos de controle ótimo por variância mínima e horizonte rolante apresentaram desempenho muito satisfatório se comparado com as técnicas mais usuais tais como a programação linear. Entretanto, a técnica de variância mínima destaca-se por apresentar baixa variação nos custos relacionados a fabricação de componentes e para manter os componentes em estoque, para o incremento do *lead time* produtivo. A técnica de horizonte rolante para o incremento do *lead time* produtivo apresenta crescimento nos custos relacionados a manter os componentes em estoque que influenciam diretamente o desempenho do custo total do sistema produtivo. A técnica de reposição baseada na compensação *feedforward* merece destaque por apresentar um bom desempenho para incrementos de *lead time* produtivo conforme o quadro comparativo. Se caso fosse necessário escolher as técnicas de reposição adequada para cada variação do *lead time* produtivo de zero à 3 meses o seguinte ranking seria necessário: variância mínima ou horizonte rolante, horizonte rolante, compensação *feedforward* e variância mínima.

Através dos resultados obtidos quando há restrições operacionais produtivas o desempenho apresentado pela técnica de controle ótimo por variância mínima destaca-se das demais por ser a técnica de reposição que melhor se adapta ao ambiente produtivo, mesmo apresentando rupturas de estoque que não influenciaram no nível de serviço. A técnica de programação linear apresenta um ótimo desempenho se forem considerados somente os custos relacionados a falta de componentes em estoque. O que se pode destacar foi a baixa variação nos custos do sistema produtivo para o incremento do *lead time* e a ausência de rupturas de estoque. A técnica de horizonte rolante apresentou um crescimento nos seus custos para o incremento de *lead time* demonstrando não ser uma técnica muito adequada para altos valores de *lead time*. Entretanto, por ser uma técnica de grande versatilidade, outras configurações nos seus parâmetros devem ser testadas e podem melhorar o desempenho, superando inclusive a técnica por variância mínima. Se caso fosse necessário escolher as técnicas de reposição adequada para cada variação do *lead time* produtivo de zero à 3 meses o seguinte ranking seria necessário:

variância mínima ou horizonte rolante, horizonte rolante, variância mínima e variância mínima. Assim, as estratégias de reposição ótima demonstraram versatilidade para o problema de gerenciamento de estoque em sistemas dinâmicos mesmo quando há incertezas na demanda prevista e restrições no ambiente produtivo.

## 5.1 Trabalhos Futuros

Em trabalhos futuros pode-se contemplar:

- i) Modelos de ambientes produtivos tipo IOBPCS, que tratam da gestão de estoque incorporando processos para os casos onde se analisa estoque em processamento (*work in process*).
- ii) Aplicação dos conceitos de *SD* em ambientes produtivos IOBPCS para os casos multiníveis e multicomponentes, com o objetivo de controlar otimamente o comportamento de todos os estoques ao longo da cadeia de suprimentos.
- iii) A implementação das estratégias de controle ótimo em ambientes produtivos diferentes do IOBPCS.
- iv) A diversificação da equação dinâmica que representa o sistema produtivo para o tratamento de outros problemas. Por exemplo, na medida de desempenho dos funcionários de uma empresa guardando suas devidas proporções.
- v) O tratamento do sistema logístico ou de abastecimento sob a ótica da dinâmica de sistemas utilizando os critérios do IOBPCS.
- vi) Implementação da metodologia de dinâmica de sistemas em filosofias de gestão de produção. Por exemplo, just in time.
- vii) Os pedidos de reposição em estoque podem servir como entrada de dados para o MRP.

## 6

**Referências Bibliográficas**

ALFELD, L. E.; GRAHAM, A. K. **Introduction to urban dynamics**. Cambridge MA: Productivity Press, 1976.

ANSOFF, H. I.; SLEVIN, D. P. An appreciation of industrial dynamics. *Management Science*, v. 14, n. 7, p. 383-397, 1968.

ASTROM, K. J.; WITTENMARK, B. **Adaptive control**. Addison Wesley Publishing Company, Inc., 2. ed., 1995.

ASTROM, K. J.; WITTENMARK, B. **Computer controlled systems, theory and design**. Prentice-Hall, Inc., 3. ed., 1997.

BALLOU, R. H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos**: planejamento, organização e logística empresarial, 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

BARCHET, V. M. F.; LARA, C. S.; SAIBT, E. Métodos para planejamento agregado. *Anais do XIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, v. 2, p. 951-956, 1993.

BAZARAA, M. S.; SHETTY, C. M. **Nonlinear programming**. John Wiley & Sons, Inc., 1979.

BLANCHINI, F.; PESENTI, R.; RINALDI, F.; UKOVICH, W. Feedback control of production distribution systems with unknown demand and delays. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*; v. 16; n. 3; p. 313-317, 2000.

BLANCHINI, F.; PESENTI, R. Min-max control of uncertain multi-inventory systems with multiplicative uncertainties. *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 46, n. 8, p. 955-959, 2001.

BLANCHINI, F.; STEFANO, M.; PESENTI, R.; RINALDI, F. Control policies for multi-inventory systems with uncertain demand and setups. *Proceedings of the 40<sup>th</sup> IEEE. Conference on Decision and Control*, p. 1941-1946, 2001.

BOJADZIEV, G.; BOJADZIEV, M. **Fuzzy logic for business, finance and management**. Word Scientific, 1997.

BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J. **Logística empresarial**: o processo de integração da cadeia de suprimentos, 4. ed. São Paulo: Atlas, 2001.

BRANDOLESE, A.; CIGOLINI, R. A new model for strategic management of inventories subject to peaks in market demand. *International Journal of Production Research*, v. 37, n 8, p. 1859-1880, 1999.

BRANDOLESE, A.; CARTEGNI, E.; CIGOLINI, R. Improving productivity by using strategic inventories: theoretical issues and field results. *International Journal of Production Research*, v. 39, n. 18, p. 4179-4196, 2001.

BUCKLEY, J. J.; FEURING, T.; HAYASHI, Y. Solving fuzzy problems in operations research: inventory control. *Proceedings of the FUZZ-IEEE*, v. 1, p. 2704-2707, 2001.

BURBIDGE, J. L. Automated production control with a simulation capability. *Proceedings IFIP Conference WG 5-7*, Copenhagen, Denmark, p. 1-14, 1984.

CARIDI, M.; CIGOLINI, R. Managing safety and strategic stocks to improve manuals requirements planning performance. *Proceedings Instn Engrs*, v. 216, p. 1061-1065. Part B:J Engineering Manufacture, 2002.

CHOPRA, S.; MEINDL, P. **Supply Chain Management Strategy, Planning and Operation**. Prentice-Hall, 2001.

CLARKE, D. W.; Mohtadi, C.; Tuffs, P. S. Generalized predictive control – part 1 – The basic algorithm, part 2 – Extensions and Interpretations. *Automática*, v. 23, n. 2, p. 137-160, 1987.

CLARKE, D. W.; Mohtadi, C. Proprieties of generalized predictive control. *Automática*, v. 25, n. 6, p. 859-875, 1989.

CLARKE, D. W. **Advances in model based predictive control**. Oxford University Press, 1994.

CONTANDRIOPOULOS, A. P.; CHAMPAGNE, F.; POTVIN, L.; DENIS, J. L.; BOYLE, P. **Saber preparar uma pesquisa**: definição, estrutura e financiamento, 3. ed. São Paulo: Hucitec Abrasco, 1999.

CORRÊA, H. L.; GIANESI, I. G. N.; CAON, M. **Planejamento, programação e controle da produção MRPII/ERP**, 3. ed. São Paulo: Atlas, 2000.

CORRÊA, H. L.; GIANESI, I. G. N.; CAON, M. **Planejamento, programação e controle da produção**, 4. ed. São Paulo: Atlas, 2001.

COYLE, R. G. **Management system dynamics**. New York: John Wiley & Sons Inc., 1977.

CRAIG, J. J.; KNIGHT, K. **Introduction to robotics**: mechanics and control. 2. nd. Addison-Wesley, 1989.

DIAS, M. A. P. **Administração de materiais**: uma abordagem logística, 4. ed. São Paulo: Atlas, 1993.

DIAZ, C. A. P.; PIRES, S. R. I. Variação da demanda ao longo da cadeia de suprimentos: o efeito da amplificação de demanda. *Anais do XXIII - Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP)*, 2003.

DISNEY, S. M.; NAIM, M. M.; TOWILL, D. R. Genetic algorithm optimization of a class of inventory control systems. *International Journal of Production Economics*, v. 68, p. 259-278, 2000.

DISNEY, S. M.; TOWILL, D. R. A discrete transfer function model to determine the dynamic stability of a vendor managed inventory supply chain. *International Journal of Production Research*, v. 40, n. 1 p. 179-204, 2002.

EDGHILL, J.; OLSMATS, C.; TOWILL, D. R. Industrial case-study of the dynamics and sensitivity of a close-coupled. Production-Distribution System. *International Journal of Production Research*, v. 26, n. 10, p. 1681-1693, 1988.

EILON, S. Two inventory control models. *International Journal of Production Research*, v. 37; n. 8; p. 48-55, 1961.

EVERS, P. T. The effect of lead times on safety stocks. *Production and Inventory Management Journal*, p. 6-8, 1999.

FAVIER, G.; DUBOIS D. A Review of k-Step-ahead predictors. *Automatica*, v. 26 n. 1, p. 75-84, 1990.

FEY, W. R. **An industrial dynamics case study**. MIT Press, 1962.

FIORIOILLI, J. C.; FOGLIATTO, F. S. Técnicas de informação na modelagem de sistemas hierárquicos de estoques. *Anais do XXI - Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP)*, 2001.

FIORIOILLI, J. C.; FOGLIATTO, F. S. Otimização de sistemas hierárquicos de estoques. *Anais do XXII - Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP)*, 2002.

FORRESTER, J. W. **Advertising: a problem in industrial dynamics**. Harward Business Review, p. 100-110, 1959.

FORRESTER, J. W. **Industrial dynamics**. MIT Press, Cambridge, Mass, 1961.

FORRESTER, J. W. Comom foundation underlying engineering and management. *IEEE Spectrum*. p. 66-77, 1964.

FORRESTER, J. W. Industrial dynamics – After the first decade. *Management Science*, v. 7, n. 2, p. 399-415, 1968.

FORRESTER, J. W. **Collected Papers of Jay W. Forrester**. Cambridge MA: Productivity Press, 1975.

FORRESTER, J. W. The beginnings of system dynamics (Working Paper N°. D-4165). *System Dynamics Group, Sloan School of Management MIT*, Cambridge MA, 1989.

FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; NAEINI, E. A. **Feedback control of dynamic systems**. Addison Wesley Publishing Company, Inc., 1994.

FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; WORKMAN, L. M. **Digital control of dynamic systems**. Addison Wesley Publishing Company, Inc., 1997.

GARDINER, L. K.; SHRECKENGOST, R. C. A system dynamics model for estimating heroin imports into the United States. *System Dynamics Review*, v. 3, n. 1, p. 8-27, 1987.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa científica**, 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GUSTAVSEN, B.; SEMLYEN, A. Rational approximation on frequency domain responses by vector fitting. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 14, n. 3, 1999.

HAYKIN, S.; VAN VENN, B. **Sinais e sistemas**. Bookman, 2001.



HEMERLY, E. M. **Controle por computador de sistemas dinâmicos**, 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2000.

JONES, T. C.; RILEY, D. W. Using inventory for competitive advantage through supply chain management. *International Journal of Physical Distribution and Materials Management*, v. 19, n. 8, p. 3-8, 1985.

KHATOR, S. K.; DESHMUKH, M. System dynamics modeling of agility in supply chain. Technical and Organizational Integration of Supply Chains. *Proceedings of the XXII International Conference on Industrial Engineering and Operational Managements (Part One: Operations Management)*, p. 17-23, 2002.

KHMELNITSKY, E.; GERCHAK, Y. Optimal control approach to production systems with inventory-level-dependent demand. *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 47, n. 2, p. 289-292, 2002.

LAGODIMOS A. G.; ANDERSON, E. J. Optimal positioning on safety stocks in MRP. *International Journal of Production Research*, v. 31, n. 8, p. 1797-1813, 1993

LUYBEN, W. L. **Process modelling simulation and control for chemical engineers**, 2. ed. McGraw-Hill, 1989.

MAN, K. F.; TANG, K. S.; KWONG, S. Genetic algorithms: concepts and applications. *IEEE Transactions on Industrial Eletronics*, v. 43, n. 5, p. 519-534, 1996.

MAPES, J. The effect of capacity limitations on safety stock. *International Journal of Operations and Production Management*, v.13, n. 10, p.1992.

MINH, S. H. **Re-engineering the UK private house building supply chain**. Phd thesis. University of Walles, UK, 2002.

MORECROFT, J. D. W. System dynamics and microworlds for policymakers. *European Journal of Operations Research*, v. 35, n. 3, p. 301-320, 1988.

MOREIRA, D. A. **Administração da produção e operações**, 1. ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 1993.

OLIVEIRA, G. A. **Sistema de controle de estoques utilizando a metodologia Box e Jenkins de séries temporais**. Tese de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia. Universidade Federal do Paraná (UFPR), 2002.

OLIVEIRA, G. H. C.; PACHECO, E. O. Estratégia baseada em horizonte rolante para gestão de estoques. *Anais do XXIII - Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP)*, 2003.

OLIVEIRA, G. H. C.; PACHECO, E. O. Análise de cadeia de suprimentos e do efeito chicote usando sistemas dinâmicos. *Anais do XXIV - Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP)*, 2004.

OPPENHEINM, A. V.; WILLISKY, A. S.; NAWAB, S. H. **Signals & systems**, 2. nd. Prentice Hall, 1997.

PACHECO, E. O.; OLIVEIRA, G. H. C.; PACHECO, R. F. Utilização dos conceitos de variância mínima na gestão de estoques. *Anais do XXII - Encontro Nacional de Engenharia de Produção* (ENEGEP), 2002.

PACHECO, E. O.; OLIVEIRA, G. H. C. Using MV control concepts in inventory management subject to uncertain demand. *Annual meeting of the Production and Operations Management Society* (POMS' 03), 2003 a.

PACHECO, E. O.; OLIVEIRA, G. H. C. Controle ótimo de estoques sujeitos a picos de demanda do mercado. *Anais do XXIII - Encontro Nacional de Engenharia de Produção* (ENEGEP), 2003 b.

PACHECO, E. O.; OLIVEIRA, G. H. C. Comparação do desempenho de métodos de reposição ótima de componentes em estoque. *Anais do XXIV - Encontro Nacional de Engenharia de Produção* (ENEGEP), 2004.

POPPELWELL, K.; BONNEY, M. C. The application of discrete linear control theory to the analysis and simulation of multi-product, multi-level production control systems. *International Journal of Production Research*, v. 25, p. 45-56, 1987.

POZO, H. **Administração de recursos materiais e patrimoniais**: uma abordagem logística. São Paulo: Atlas, 2001.

QUINTÃO, R. T.; CONCEIÇÃO, S. V.; DRUMOND, M. F. B. Avaliação da utilização de indicadores logísticos de desempenho na cadeia brasileira de suprimentos de refrigerantes. *Anais do XXIII - Encontro Nacional de Engenharia de Produção* (ENEGEP), 2003.

RICHALET, J.; RAULT, A.; TESTUD, J. L.; PAPON, J. Model predictive heuristic control applications to industrial process. *Automática*, v. 14, n. 6, p. 413-428, 1978.

RICHMOND, B. STELLA, Software for bringing system dynamics to the other 98%. *Proceedings of the International Conference of the System Dynamics*, p. 706-718. STELLA High Performance Systems, [www.hps-inc.com](http://www.hps-inc.com), 1985.

ROBERTS, E. B. **Managerial applications of systems dynamics**. Master Thesis. Cambridge, MA: Productivity Press, 1978.

ROSSITER, J. A.; KOUVARITAKIS, B.; DUNNET, R. M. Application of generalized predictive control to a boiler – turbine unit for electricity generation. *IEE Proceedings D*, v. 138, n. 1, p. 59-67, 1991.

RUDIO, F. V. **Introdução ao projeto de pesquisa científica**, 28. ed. Petrópolis: Vozes, 2000.

SCHWITZKY, M. **Acuracidade dos métodos de previsão e a sua relação com o dimensionamento dos estoques de produtos acabados**. Tese de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2001.

SIMON, H. A. On the application of servomechanism theory in the study of production control. *Econometrica*, v. 20, p. 247-268, 1952.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; HARLAND, C.; HARRISON, A.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**, 4. ed. São Paulo: Atlas, 1999.

SOUZA, M. B.; LIMA, E. L. Simulação do controle preditivo generalizado numa coluna de destilação. *Anais do 8º Congresso Brasileiro de Automática (CBA)*, Belém – Pa, p. 99-104, 1990.

STEVENS, G. Integrating the supply chain. *International Journal of Physical Distribution and Materials Management*, v.19, n. 8, p. 3-8, 1989.

TOWILL, D. R. Dynamic Analysis of an inventory and order based production control system. *International Journal of Production Research*, v. 20, p. 671-678, 1982.

TOWILL, D. R.; DEL VECCHIO, A. L. The application of filter theory to the study of supply chain dynamics. *Production Planning and Control*, v. 5, n. 1, p. 82-96, 1994.

TOWILL, D. R. Industrial dynamics modelling of supply chains. *Logistics Information Management*, v. 9, n. 4, p. 43-56, 1996.

TOWILL, D. R.; EVANS, G. N.; CHEEMA, P. Analysis and design of an adaptive minimum reasonable inventory control system. *Production Planning and Control*, v. 8, n. 6, p. 545-557, 1997.

TUBINO, D. F. **Manual de planejamento e controle da produção**, 2. ed. São Paulo: Atlas, 2000.

VASSIAN, H. J. Application of discrete variable servo theory to inventory control. *Operations Research Society of America*, p. 272-282. Chicago, Illinois, 1954.

VIEIRA, C. S.; BARBOSA, M.; CONCEIÇÃO, S. V. O efeito do chicoteamento (bullwhip effect) na cadeia de suprimentos para a empresa FMX de produtos farmacêuticos e cosméticos. *Anais do XXIII - Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP)*, 2003.

## **7**

### **Anexo A**