

# Márcio Barbosa

Modelagem de Cadeia de Suprimentos de Produtos Farmacêuticos e de Cosméticos,  
usando sistemas de controle discreto – Estudo de Caso.

Dissertação apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Gestão da Produção  
Orientador: Professor Samuel Vieira Conceição  
Belo Horizonte, 2004.



Em memória a meu pai

Antônio Barbosa Filho

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, a minha mulher Rosângela, meus filhos Rafael e Luísa, minha mãe Antonina, pelo amor, carinho, apoio e força, de ontem, hoje e sempre.

Ao meu orientador, professor Samuel Vieira Conceição, pelos ensinamentos e disponibilidade.

Ao professor Ronaldo Pena da UFMG e ao professor Márcio Barroso da Universidade de Itaúna, pelos esclarecimentos na área de Teoria de Controle Digital.

À Clarice, Leonardo, Edílson, pela amizade e companheirismo ao longo deste trabalho.

Ao Leonardo Augusto, Tatiana Freitas, Josiane Gomes, estudantes do curso de graduação de engenharia de produção da UFMG, que me ajudaram voluntariamente.

A todos que contribuíram de alguma forma para a realização desta pesquisa:

**“Os outros são importantes, não por nos ensinar a caminhar, mas por nos ensinar a caminhar de forma diferente”.**

## Sumário

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>10</b>
<b>TABELAS</b> .....	<b>14</b>
<b>NOMENCLATURA</b> .....	<b>15</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>18</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>19</b>
<b>CAPÍTULO I</b> .....	<b>20</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>20</b>
<b>1.1. Contexto do problema</b> .....	<b>21</b>
<b>1.2 Descrição geral do jogo da cerveja (Beer Game)</b> .....	<b>25</b>
<b>1.3 Escopo</b> .....	<b>30</b>
<b>1.4 Objetivos:</b> .....	<b>31</b>
1.4.1 Gerais.....	31
1.4.2 Específicos .....	32
<b>1.5 Metodologia</b> .....	<b>32</b>
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>34</b>
<b>2.1 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>34</b>
<b>2.2 Definições</b> .....	<b>35</b>
<b>2.3 Medição do efeito de chicoteamento</b> .....	<b>38</b>
<b>2.4 A busca pela alta performance de uma cadeia de suprimento</b> .....	<b>42</b>
2.4.1 No plano estratégico .....	43
2.4.2 Trabalhando no plano operacional .....	44

<b>2.5 Configurações de flexibilidade para a administração de cadeia de suprimento.....</b>	<b>45</b>
<b>2.6 Proposição de cadeia de suprimento .....</b>	<b>46</b>
<b>2.7 Impacto na seleção de modelo de uma cadeia de suprimento .....</b>	<b>48</b>
<b>2.8 Impacto do lead time de provedor e previsão da demanda .</b>	<b>51</b>
<b>2.9 Explorando a utilização de um sistema CONWIP.....</b>	<b>52</b>
<b>2.10 Conceitos fundamentais da engenharia de controle .....</b>	<b>53</b>
2.10.1 Tipos de Filtros.....	55
2.10.3 Filtros de Resposta Infinita ao Impulso (IIR) .....	55
2.10.4 Projeto de um Filtro IIR .....	56
2.10.5 Forma básica do filtro – IIR .....	59
<b>2.11 A relação entre chicoteamento e largura de faixa de ruído</b>	<b>61</b>
<b>2.12 O impacto de enriquecimento de informação no efeito de Chicoteamento: Uma perspectiva de engenharia de controle...</b>	<b>68</b>
<b>2.13 Um método de engenharia de controle com regras para investigar reabastecimento .....</b>	<b>72</b>
<b>2.14 Enriquecimento de informação em pedido para políticas OUT .....</b>	<b>76</b>
<b>2.15 Usando amaciamento exponencial na previsão dentro de políticas OUT .....</b>	<b>76</b>
<b>2.16 Usando média móvel para previsão dentro para políticas OUT.....</b>	<b>78</b>
<b>2.17 Usando “sinalização da demanda” para previsão dentro de Políticas OUT .....</b>	<b>79</b>
<b>2.18 Conclusões para políticas OUT .....</b>	<b>82</b>
<b>2.19 Informações compartilhadas com uma regra de reabastecimento suavizadora .....</b>	<b>83</b>
<b>2.20 A regra de decisão .....</b>	<b>83</b>

<b>2.21 Relação com Políticas OUT .....</b>	<b>84</b>
<b>2.22 O comportamento suavizador da regra para um único nível cadeia de suprimento.....</b>	<b>85</b>
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>91</b>
<b>3.1 Modelagem de uma cadeia de suprimento .....</b>	<b>91</b>
<b>3.2 As equações de controle de estoque .....</b>	<b>92</b>
<b>3.3 Considerações sobre Estabilidade.....</b>	<b>93</b>
3.3.1 Estoque Elevado e Fornecimento Infinito.....	94
3.3.2 Fornecimento Infinito e Estoque pequeno.....	95
3.3.3 Fornecimento Limitado .....	95
3.3.4 Efeito de Chicoteamento .....	96
3.3.5 Pedidos Agressivos.....	97
3.3.6 Previsão de Demanda.....	98
3.3.7 Efeito do <i>Lead Time</i> .....	100
<b>3.4 Implementação do Controle .....</b>	<b>101</b>
3.4.1 Critério para Sintonia do Controlador.....	101
3.4.2 Retroalimentação com previsão de demandas .....	102
3.4.3 Controle em Cascata.....	106
3.4.4 Avaliação do Controlador .....	109
<b>3.5 Função de Transferência de um Elo de Cadeia de suprimento .....</b>	<b>110</b>
3.5.1 Transformada Z.....	111
3.5.2 Como obter a Função de Transferência.....	114
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>117</b>
<b>4. ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>117</b>
<b>4.1 Introdução .....</b>	<b>117</b>
<b>4.2 Escopo do projeto/delimitação da pesquisa .....</b>	<b>117</b>
<b>4.3 Análise dos Dados. ....</b>	<b>118</b>
<b>4.4 Análises das Demandas .....</b>	<b>120</b>

<b>4.5 Gráficos das demandas .....</b>	<b>121</b>
4.5.1 Compras ARMS .....	121
<b>4.6 Cálculo convencional do chicoteamento .....</b>	<b>124</b>
<b>4.7 Modelagem e Cálculo do Chicoteamento por Engenharia de Controle.....</b>	<b>126</b>
4.7.1 Função de Transferência .....	126
<b>4.8 Simulação modelo do estágio ARMS .....</b>	<b>127</b>
<b>4.9 Simulação modelo do estágio FMX .....</b>	<b>128</b>
<b>4.10 Simulação dos 2 elos em cascata.....</b>	<b>132</b>
<b>4.11 Malha de Controle de Estoque .....</b>	<b>133</b>
4.11.1 As equações de controle de estoque .....	134
4.11.2 Simulação de um elo com malha de controle de estoque	136
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>140</b>
<b>5. 1 Conclusão .....</b>	<b>140</b>
<b>6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>142</b>
<b>7. APÊNDICE .....</b>	<b>149</b>
<b>A.1 INVERSA DE MOORE-PENROSE.....</b>	<b>149</b>
A.1.1 Definição .....	149
A.1.2 Obtenção de $A^+$ .....	150
A.1.3 Algoritmo de Dwivedi .....	151
<b>A.2 Programa de cálculo dos coeficientes e simulação dos elos .....</b>	<b>155</b>
<b>A.3 Programa para controle de estoque em malha fechada ....</b>	<b>159</b>
<b>8. ANEXOS .....</b>	<b>161</b>
<b>8.1 Anexo 1 .....</b>	<b>161</b>
<b>8.2 Anexo 2 .....</b>	<b>163</b>

<b>8.3 Anexo 3.....</b>	<b>164</b>
<b>8.4 Anexo 4 .....</b>	<b>165</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Cadeia de Suprimento .....	23
Figura 2 – Cadeia com pedidos amplificados.....	24
Figura 3– Cenário do jogo da cerveja .....	28
Figura 4 - Fluxo de Informações e materiais .....	29
Figura 5 – Esquema da cadeia de suprimentos da FMX .....	31
Figura 6– Recorte de uma Cadeia de Suprimento .....	34
Figura 7– Distorção no padrão de demanda .....	36
Figura 8- Fluxo de informações e matérias na cadeia de suprimento .....	54
Figura 9 – Forma básica IIR.....	59
Figura 10 - Chicoteamento e Sensibilidade.....	67
Figura 12 - Cadeia com informação enriquecida.....	71
Figura 13 - Redução da distorção .....	79
Figura 14 – Sinalização e Amplificação da demanda.....	81
Figura 15 - Relações de Amplificação.....	87
Figura 16 - Suavizador Exponencial.....	88
Figura 17 – Cadeia de Suprimento.....	91

Figura 18 - Diagrama de blocos de um nó $j$ de uma cadeia de suprimentos.....	93
Figura 19 - Razão de Magnitudes de Pedidos vs freqüência para vários valores de ganho do controlador. ....	98
Figura 20 - Diagrama de blocos da cadeia de suprimentos com previsão de demanda.....	99
Figura 21 – Resposta em Freqüência da razão de pedidos no caso com previsão de demanda .....	100
Figura 22 – Respostas freqüenciais para vários valores do Lead Time (L).....	100
Figura 23 – Respostas em Freqüência para diferentes ganhos do controlador-P.....	103
Figura 24 - Comparação entre demanda e pedidos de um elo de cadeia de suprimento com controlador-P.....	103
Figura 25 – Resultados da simulação de uma cadeia de suprimentos utilizando um controlador P com ganho $K_j=0.7$ .....	104
Figura 26 – Resposta em freqüência de para diferentes ganhos.	105
Figura 27 – Diagrama de contorno de $MR\pi$ e picos de ressonâncias (RP) em função do ganho $K_j$ e constante de tempo para um controlador PI. ....	105

Figura 28 – Diagrama de Blocos com controladores em cascata em um elo de cadeia de suprimento. ....	106
Figura 29 – Diagrama de Bode para PI e controle em cascata.....	107
Figura 30 – Diagrama de contorno para $MR_{\pi}$ e pico de ressonância RP .....	108
Figura 31 – Resultados da simulação da dinâmica de um elo de cadeia de suprimentos com previsão de demanda utilizando um controlador PI em cascata.....	108
Figura 32 - Processo de discretização dos dados.....	110
Figura 33 - Relação entre Transformada de Laplace Discreta Transformada Z.....	111
Figura 34 - Translação real em Retardo.....	112
Figura 35 – Função de Transferência .....	114
Figura 36 - Elos da cadeia.....	118
Figura 37 - Demanda Din vs tempo de ARMS .....	121
Figura 38 - Diagrama de barras Din.....	122
Figura 39 - Histograma com curva normal .....	122
Figura 40 - Gráfico de Probabilidade Normal .....	123
Figura 41 - Gráfico sumário.....	124
Figura 42 – Simulação 1º Estágio .....	127

Figura 43 - Simulação 2º Estágio .....	128
Figura 44 - Bloco 1º Estágio.....	128
Figura 45 - Zeros e polos da $F1(z)$ .....	129
Figura 46 - Função de Transferência vs Frequência.....	129
Figura 47 - Suavizador proposto por Chen (2000).....	130
Figura 48 - Diagrama de bloco do 2 Estágio .....	130
Figura 49 - Zeros e pólos de $F2(z)$ .....	131
Figura 50 – $FT2$ vs freqüência.....	131
Figura 51 - Diagrama de blocos da cadeia parcial .....	132
Figura 52 - Simulação saída da cadeia parcial .....	132
Figura 53 - Simulação cadeia parcial .....	133
Figura 54 - Modelo de cadeia para malha de controle de estoque	134
Figura 55 - Elo ARMS com malha de controle de estoque .....	136
Figura 56 - simulação da ação de controle $U_{ji}$ .....	137
Figura 57 - simulação da ação de controle $Y_{jk}$ .....	137
Figura 58 - Simulação da ação de controle de $U_{ji}$ .....	138
Figura 59 - simulação da ação de controle $Y_{jk}$ .....	138

## **Tabelas**

Tabela 1 - Diferentes cálculos para o efeito de chicoteamento.....	39
Tabela 2 – Previsões para políticas OUT .....	81
Tabela 3 - Resultados .....	89
Tabela 4 - Índices de performance de diferentes estratégias de controle.....	110
Tabela 5 – Demandas dos elos FMX e ARMS .....	120

## Nomenclatura

$\alpha$  - Constante de previsão usado em suavizador exponencial preditivo,  $\alpha = 1/(1 + T_a)$

como fator de sinalização.

AR – Relação de Amplitude

D - Demanda

$D_t$  -Demanda no tempo t

$\hat{D}_t$  -Demanda prevista no tempo t

$\hat{D}_t^L$  - Demanda prevista após L unidades de tempo no tempo t

$\hat{D}_t^{T_a}$  - Demanda que foi prevista com suavizador constante  $T_a$  no tempo t

DWIPt – Trabalho em progresso desejado no tempo t

e – Base do logaritmo natural, 2.7182. . .

FR - Resposta em frequência

i – Número imaginário  $\sqrt{-1}$

i.i.d. – Distribuição independente e identicamente normal

n, j – Elo da cadeia de suprimento.

k – Variável normal usada para determinar o estoque de segurança no modelo de pedidos

a montante

L – Tempo de espera

NSt – Estoque líquido no tempo t

$\hat{\sigma}$  - Desvio padrão estimado

$\hat{\sigma}_n^L$  - Desvio padrão estimado no nível n após L unidades de tempo

OUT – Pedidos a montante

$O_n$  - Pedidos no elo n

$O_t$  - Pedidos no tempo t

$O_t^n$  - Pedidos do elo n no tempo t

$St$  – Estoque no tempo t

t – Tempo

$T_a$  – Tempo médio previsto do suavizador exponencial

TF – Função de transferência de pedidos

$T_m$  – Número de períodos usado na média móvel

$T_n$  – Tempo de ajuste para erros em estoque líquido

$TNS_t$  – Estoque líquido alvo no tempo t

$T_p$  – tempo físico de produção

$T_w$  – Tempo para ajuste do erro de trabalho em progresso

Var - Variância

VMI – Vendedor administrador de estoque

$\omega$  - Frequência (rad/s)

WIP – Trabalho em progresso

$WIP_t$  - Trabalho em progresso no tempo t

$W_N$  - Largura de faixa de ruído

Z – Operador da transformada z

OEMs – Equipamentos Originais de Manufatura

*CONWIP* – Trabalho em processo constante

SCM – Administração de cadeia de suprimento

IT – Tecnologia da informação

JIT – No Tempo justo

DLT – Transformada de Laplace Discreta

APIOBPCS – Oleoduto automático, Estoque e pedido baseado em sistema de controle de produção

CAD – Computer aided design.

## RESUMO

Esta dissertação tem como objetivo utilizar modelos digitais na previsão de demanda para elos de uma cadeia de suprimentos de produtos farmacêuticos e de cosméticos, principalmente para a empresa FMX, que se constitui no elo fraco da cadeia.

A metodologia está baseada em sistema de controle que cria e permite ganhar habilidades no conhecimento dinâmico em cadeia de suprimento e regras de reabastecimento. Também introduz conceitos da área de engenharia de controle para quantificar o efeito de chicoteamento (efeito Forrester), redução da variância da demanda e, como consequência, o enxugamento de estoques ao longo da cadeia de suprimentos, tornando-a competitiva. A metodologia utilizada foi o Estudo de Caso, em dois elos da cadeia, através de dados reais, constituídos de demandas de entrada e de saída, ou seja, pedidos de elo a jusante para elo a montante e vice versa ao longo da cadeia. Ao final foram comparadas as sinalizações de demandas (previsões de demanda) com e sem filtros em diferentes elos, assim como a influência do profissional que decide ao sinalizar a demanda.

**Palavras-chaves:** Cadeia de suprimento; Efeito de chicoteamento; Teoria de controle; Transformada z; filtros; suavizador exponencial.

## ABSTRACT

The objective of this essay is to use digital models predictors for echelon of a supply chain of pharmacist products and cosmetics, mainly for FMX Company that represents the weak echelon of the chain.

The methodology is based on control systems and allows us to gain valuable insights into the dynamic behavior of supply chain replenishment rules. Also introduce engineering control concepts to quantify the variance amplification bullwhip effect (Forrester Effect) or variance reduction and in consequence the decreasing inventories throughout the chain, making it competitive. The applied methodology was the case study, within two echelons of the chain through real data and composed of up to and out order, it means, orders from an echelon down to and up to another one.

At the end signaling demands were compared with and without filters, indifferent echelons, as well as the influence of the professional that is in charge of signaling the demand.

**Keyword:** Supply chain; Bullwhip effect; Control theory; Z-Transform; Filters; smoothing exponential;

## CAPÍTULO I

### 1. Introdução

À medida que produtos fabricados ficam mais complexos e com ciclo de vida cada vez menor, a previsão das demandas requer cada vez mais recursos que crescentemente estão sendo compartilhados (suprimentos/valores) entre os membros da cadeia. A competição está sendo tipificada menos através de empresa contra empresa e mais por cadeia de suprimento contra cadeia de suprimento. (Bhattacharya & Coleman, 1995). Em um sistema, qualquer movimento em um dos seus componentes tem efeito sobre os demais componentes do mesmo sistema. A tentativa de otimização de cada um dos componentes, isoladamente, não leva à otimização de todo o sistema. Ao contrário, leva à sub-otimização.

A utilização de filtros digitais contribui para o planejamento e controle de estoques, pois, embora a demanda do consumidor seja estocástica, a média desta demanda pode estar sujeita a perturbações de alta frequência (variabilidades) tais como um degrau ou mudanças sazonais nas vendas. Um controlador de nível de estoque (quantidade em estoque), tem por objetivo manter a posição de estoque na presença de perturbações de alta frequência. Entretanto, além de atingir a meta da posição de estoque, os objetivos de um administrador de cadeia de suprimentos também incluem definir uma meta de posição de estoque que não seja muito alta (resultando em custos de estoque elevados) nem muito baixa (resultando em insatisfação do cliente devido à demanda não atendida).

## **1.1. Contexto do problema**

Fabricar tornou-se um negócio globalmente organizado e geralmente dominado por grandes companhias internacionais. Dessa forma, torna-se difícil para qualquer empresa administrar os recursos necessários para projetar e fabricar produtos. Assim, a montagem final na grande cadeia de valor (Porter 1985, Lindberg e Trygg 1991) concentra-se em atividades com foco nas competências da empresa (Prahalad e Hamel 1990) e do restante dos parceiros na cadeia de suprimento, criando oportunidades para fornecedores pequenos e grandes, e, assim, abrir nichos e oportunidades. Com tal redistribuição de atividades de adição de valores entre os parceiros da cadeia de suprimento, estaria mais correto dizer que produtos pertencem à cadeia de suprimento e não a uma empresa isoladamente. Esses produtos complexos requerem logísticas nas cadeias de suprimentos, para serem produzidos a preços competitivos. Para alcançarem tais metas as grandes companhias estão racionalizando suas cadeias de suprimento. Como a competição é tipificada menos por empresa contra empresa e mais por cadeia de suprimento contra cadeia de suprimento, os líderes da cadeia de suprimento, as grandes empresas, na maioria dos casos, estão se integrando (Stevens 1989), ou em “reengenharia de processo empresarial” (Evans et al. 1994), ou em “corporações virtuais” (Johnson et al. 1993). Alguns autores chamam esta configuração de modelo integrado de cadeia de suprimento ou modelo “partnership”, (Lamming 1993, Presutti Jr. 1992, Lyons et al. 1990).

A administração de cadeia de suprimento veio à vanguarda de prática organizacional durante a última década. Através da Tecnologia da Informação,

companhias unem seus fornecedores, para operações interfuncionais dentro de suas organizações, estabelecendo conexões eletrônicas com clientes chave. A meta é melhorar o desempenho da cadeia. A “Tecnologia de Informação” (IT) tornou-se um componente integrante da administração de cadeia de suprimento, sendo enorme o seu impacto nas organizações de hoje (Byrda, Davidson, 2003).

Alguns autores desenvolveram avanços importantes no sentido de integrar e melhorar o desempenho de uma cadeia de suprimento (CS), compartilhando informações através de tecnologias de comunicação descentralizada. Uma alternativa para melhorar o desempenho em uma CS pode ser introduzir um CONWIP (generalização do sistema Kanban) para cadeia de suprimento (CONWIP SC), com uma política centralizada na administração de cadeia de suprimento. CONWIP é o sistema obtido da generalização do Kanban convencional aplicado a uma cadeia de suprimento (Ovalle, Márquez, 2001).

Uma maneira de medir o grau da complexidade de uma cadeia é através do nível de estoques pelos quais materiais, bens semi-acabados e bens acabados têm que passar pelos seus trajetos de fornecedores para clientes.

A cadeia de suprimento na Figura 1 tem cinco estágios de estoques de matérias-primas. Seu conhecimento será instável, se cada estoque for administrado independente dos outros. São mostrados exemplos desta independência quando cada ação é efetivada e que os pedidos são feitos por lógica de quantidade do ponto de pedido que é o método usualmente mais comum. Esse comportamento desencadeia o efeito Forrester, identificado nos anos cinquenta e que resultou no conceito de Administração de Cadeia de Suprimento (SCM).

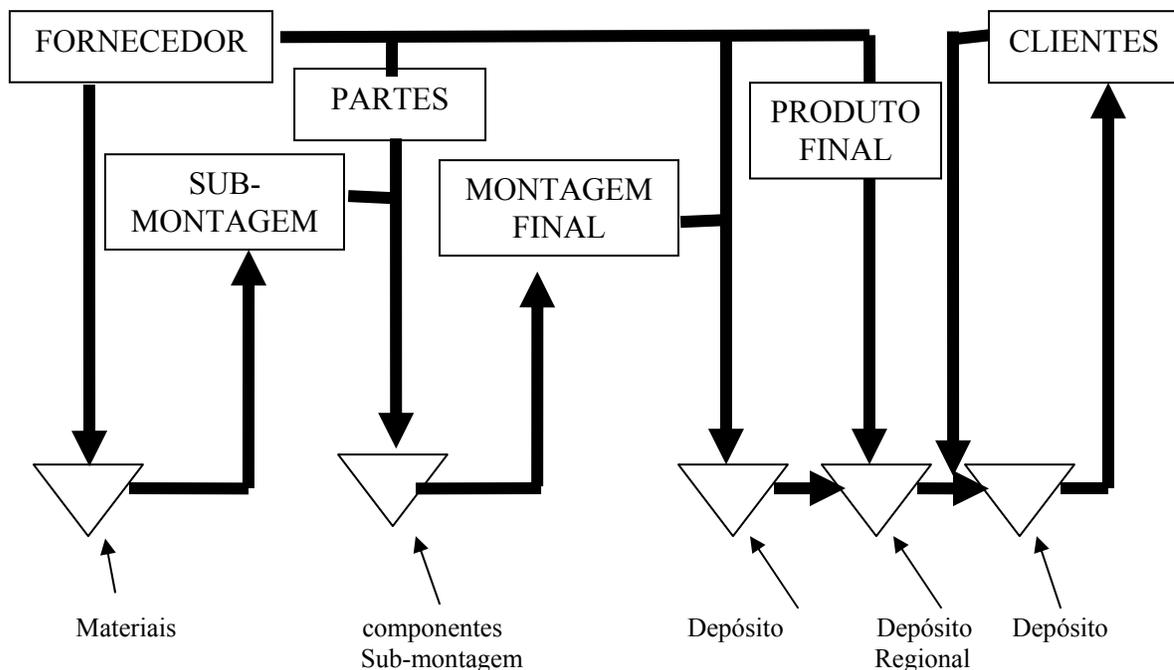


Figura 1- Cadeia de Suprimento  
 Fonte: Adaptado de Rod Inger et al. (1995)

A SCM emergiu em meados de 1970 e é fundamentada em logística e otimização. O efeito de amplificação de demanda está ilustrado na Figura 2 (Forrester 1961, Towill 1991). Forrester claramente identificou que o atraso de reações locais de cada elo para mudanças de demanda produz desequilíbrio dos estoques. Assim, os volumes de reabastecimento não só apóiam na demanda de cliente antecipada, mas também o re-balanceamento dos estoques locais.

As cadeias de suprimento têm ciclos naturais de fluxo de material, mas os parâmetros de estoque são geralmente determinados pela média, com base dos dados para estes ciclos; assim a demanda de cliente na Figura 2 não é incomum. Porém, cada empresa por suas próprias ações, faz seu ressuprimento desencadear um processo de

amplificação de demanda quase impossível de controlar. Todos os parceiros são co-responsáveis pelas decisões de toda a cadeia.

Os pedidos de clientes seguem padrões rotineiros, mas, às vezes, são rompidos por grandes pedidos que a maioria das empresas tenta administrar sem sucesso em detrimento de todos os clientes.

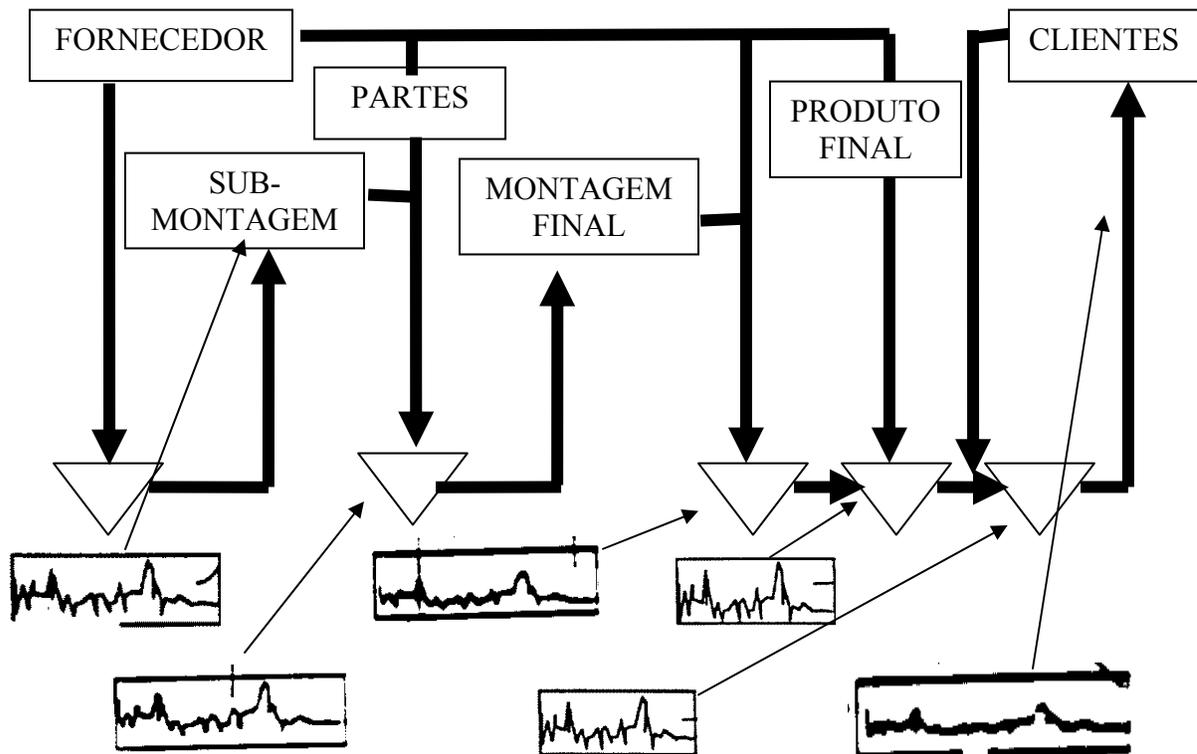


Figura 2 – Cadeia com pedidos amplificados  
Fonte: Adaptado de Rod Inger et al. (1995).

Otimizar a cadeia de suprimento exige que se elimine amplificação de demanda e distorção de tempo. A hipótese é que isto gerará benefícios significativos em forma de capacidade de armazenamento e estoque reduzido, ciclos industriais econômicos mais

estáveis e melhor atendimento ao consumidor, na forma de disponibilidade de produto, maior precisão e lucro, e eventos de manipulação mínimos por cadeia.

Dois tipos de regras de reabastecimento são analisados neste trabalho: políticas de pedidos a montante (OUT) e políticas suavizadoras (políticas que reduzem ou suavizam a variabilidade na demanda). Para a classe de políticas OUT, é mostrado que a informação compartilhada ajuda a reduzir o efeito de chicoteamento (amplificação de variabilidade de quantidades em pedidos numa cadeia de suprimento) significativamente, especialmente nos níveis mais altos na cadeia. Porém, o problema do chicoteamento não é eliminado completamente e ainda aumenta com a forma pela qual os gerentes administram a cadeia. Para as políticas suavizadoras, foi mostrado por (Mason, Jones, 1998), que o compartilhamento de informações é necessário para reduzir variabilidade de pedidos a níveis mais altos da cadeia.

Em cadeias de suprimento, a variabilidade nos padrões de emissão de pedidos pode promover aumentos absurdos a montante na cadeia para a fábrica e os fornecedores. Esta variabilidade ou amplificação de demanda foi observada originalmente e estudada por Forrester (1958). O artigo de Forrester inspirou muitos autores para desenvolver games para demonstrar a amplificação de variabilidade. Um exemplo é o Jogo de Cerveja desenvolvido por Sterman (1989).

## **1.2 Descrição geral do jogo da cerveja (Beer Game).**

Nas versões do jogo aqui apresentadas, seja o primeiro jogo (manual) como a sua implementação em software, as regras básicas são as mesmas, diferindo apenas em algumas opções. O mecanismo básico que serve para todas as versões do jogo da cerveja,

o primeiro jogo realizado (o jogo do tabuleiro), a versão computadorizada desenvolvida por David Simchi Levi e Philip Kaminsky.

O jogo descreve uma cadeia de suprimentos simplificada, composta de quatro posições, estágios, níveis, ou ainda chamados de facilidades: uma fábrica de cerveja, um de seus distribuidores, um atacadista e um varejista. Sendo que a fábrica supre o distribuidor que supre o atacadista, que supre o varejista, e que, finalmente, supre o consumidor. Cada rodada do jogo representa uma semana onde os pedidos de cada setor são feitos, e a unidade do produto é dada em caixas de cervejas. As posições são idênticas quanto à capacidade de armazenamento dos produtos, que é considerada ilimitada ou infinita, e quanto ao o lead time (tempo de ressuprimento) e ao atraso para efetuar o pedido (order delay) que são fixos. Há um total de três semanas de atraso entre o momento em que o setor faz o pedido e o recebe em seu estoque: o atraso (delay) para o processamento dos pedidos é de uma semana (devido à correspondência, burocracia, etc.) e, para o recebimento (devido ao transporte da mercadoria) é de duas semanas. Mesmo assim, não há garantias de que essa quantidade será entregue dentro desse prazo, pois pode haver mais atrasos ao longo da cadeia, gerando pedidos acumulados para vários setores. A exceção para isso é a fábrica, pois se considera que ela possui uma capacidade de produção e fornecimento de matéria-prima infinita, então sempre seus pedidos serão atendidos em duas semanas, seja na quantidade que for. Ao gerente de cada setor cabe decidir a quantidade mínima de estoque de caixas de cervejas (estoque de segurança) e os pedidos para sua reposição, que são feitos ao setor respectivamente acima dele na cadeia de abastecimento. Sua demanda é igual à quantidade de produtos pedida pelo setor logo abaixo dele, para o qual entrega a mercadoria, por exemplo: o distribuidor faz pedidos à

fábrica, recebe pedidos e entrega as caixas de cervejas para o atacadista, o mesmo do atacadista para o varejista, e este para o consumidor final. A figura 3 é uma descrição gráfica do fluxo de materiais e informações no jogo da cerveja.

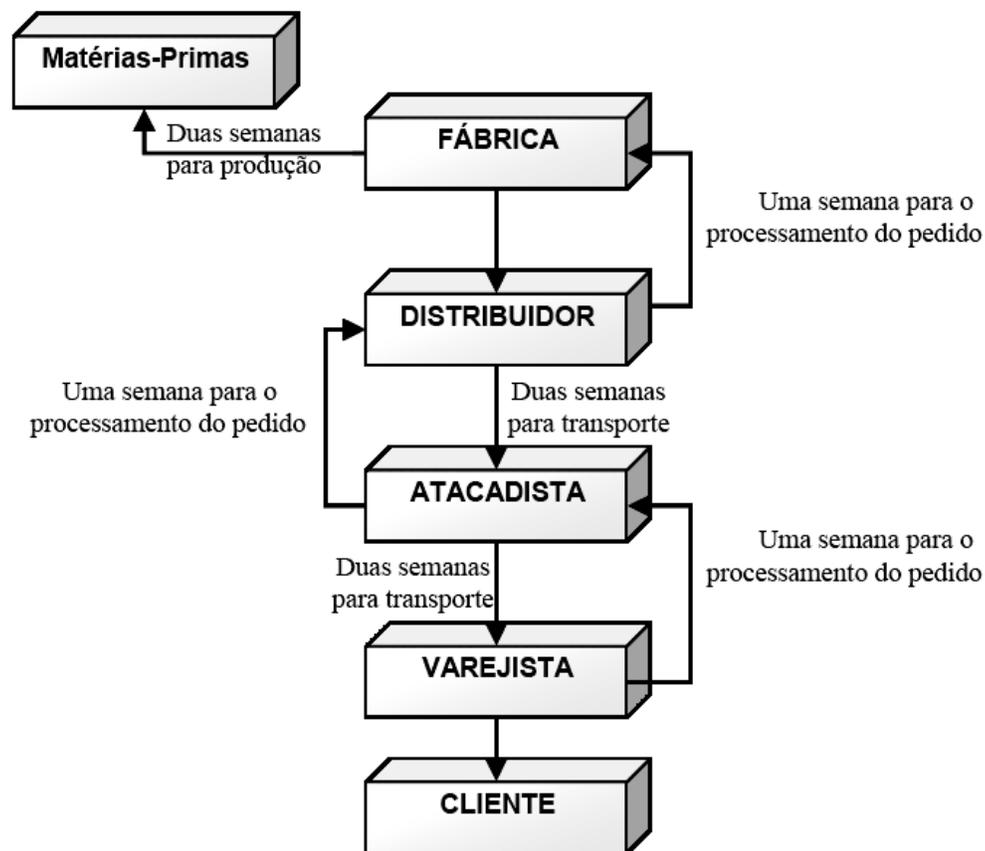
A única comunicação entre os setores é na passagem de pedidos e no recebimento das caixas de cerveja, a razão está no fato de que na vida real, podem existir poucas fábricas de uma mesma atividade, mas existem dúzias de distribuidores, centenas de atacadistas e milhões de varejistas, e cada um não é capaz de descobrir qual a atividade total que cada componente da cadeia exerce.

A demanda do consumidor final só é conhecida pelos varejistas e apenas para a semana na qual devem tomar decisões, não tendo o conhecimento do que acontecerá com a demanda nas próximas semanas, com exceção de algumas versões no qual há a opção para se escolher uma demanda fixa.

Os pedidos em carteira (pedidos não atendidos, backlog ou ainda backorders) representam os pedidos que foram recebidos, mas não foram atendidos devido a uma falta do produto em estoque e que devem ser atendidos os mais rápidos possíveis no futuro, ou seja, os pedidos não atendidos não são perdidos, eles permanecem para serem atendidos com prioridade, assim que houver produtos no estoque juntamente com os pedidos atuais. No caso de ocorrer novamente faltas do produto (backlog), a quantidade não atendida é acrescida no backlog que o setor já possuía, para ser atendida futuramente.

Os produtos que estão em trânsito (aqueles que chegarão dentro de uma e duas semanas) e que serão recebidos por um determinado setor pertencem ao setor acima dele, ou seja, aquele que está enviando o produto. O produto só passa a pertencer ao setor abaixo depois que a mercadoria chega aos seus estoques. Por exemplo: o atacadista é

dono dos produtos em trânsito para o varejista mais os produtos que estão no seu estoque; o distribuidor é proprietário dos produtos que estão nos seus armazéns mais aqueles que estão sendo transportados para o atacadista; e o fabricante é dono dos produtos que estão sendo manufacturados, o que estão em estoque e os que estão sendo transportados para o distribuidor.



**LEGENDA:**

- FLUXO DE PRODUTOS (MATÉRIA)
- - - -> FLUXO DE INFORMAÇÕES

Figura 3 – Cenário do jogo da cerveja  
Fonte: Dornier (2000)

Todo o reabastecimento nesse trabalho é analisado em dois temas. O primeiro caso é a cadeia de suprimento tradicional na qual só o varejista tem acesso à demanda de cliente, da mesma maneira que o Jogo de Cerveja original é jogado. O segundo caso é a cadeia de suprimento com informação compartilhada, Mason-Jones (1998). A diferença entre os dois casos é mostrada claramente na Figura 4.

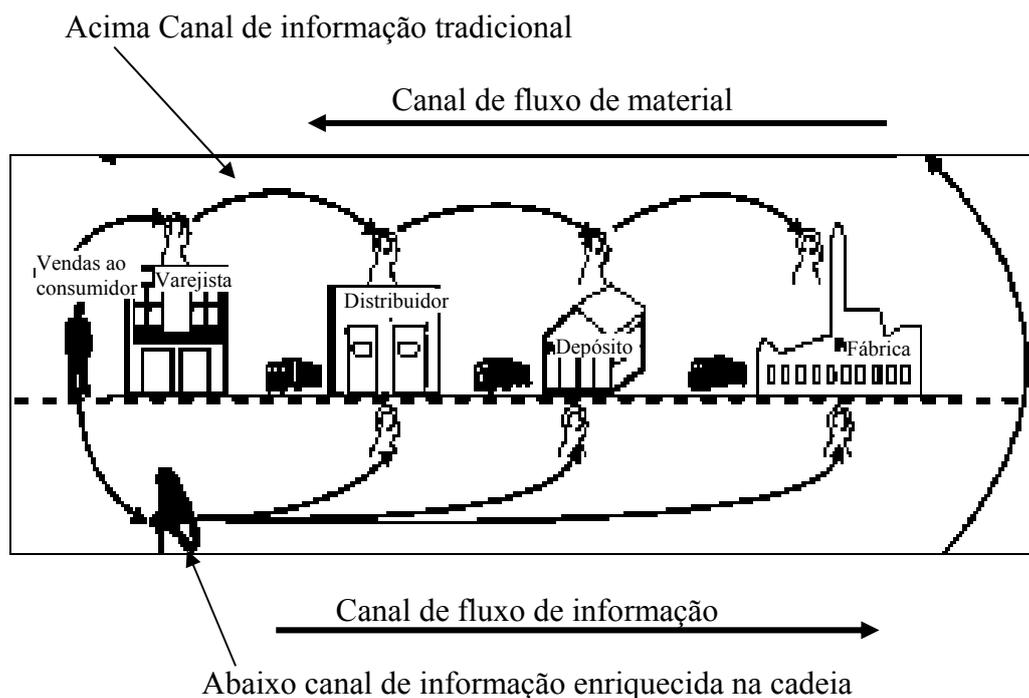


Figura 4 - Fluxo de Informações e materiais  
Adaptado de Dejonckheere et al. (2003).

A única diferença para a cadeia de suprimento tradicional é que todo sócio de cadeia pode fundar suas previsões agora em a demanda de consumidor final (em vez de pedidos entrantes).

Como as cadeias de suprimentos podem ser vistas como um sistema de entradas e saídas discretas, com interações dinâmicas entre partes diferentes da cadeia, pode-se usar a modelagem matemática por função de transferência para representar estas interações. Para toda regra de ressuprimento de estoque, será desenvolvida uma função de transferência que represente a dinâmica de uma regra de reabastecimento particular. Para desenvolver uma FT (função de transferência), deve ser introduzido

no sistema um determinado padrão de demanda e produção, recorrendo-se ao ressuprimento correspondente ou aos pedidos de produção. Nise (1995) fornece uma boa introdução aos princípios de engenharia de controle em que se inclui o conceito de função de transferência. Dejonckheere et al. (2003) mostrou como uma função de transferência pode ser obtida construindo um diagrama de volta causal (diagrama que descreve a dinâmica do elo em tempo real) e um diagrama para a regra de reabastecimento sob certas considerações. Para uma avaliação histórica do uso da Transformada Z em produção e aplicações de controle de estoque, ver Disney (2001).

### **1.3 Escopo**

A principal dificuldade encontrada durante a pesquisa foi a definição da cadeia a ser pesquisada. Inicialmente, pretendia-se selecionar uma cadeia que fosse de grande representatividade para a FMX, baseando-se em dados sobre valores agregados ao produto, porém essa informação não foi disponibilizada nem pela FMX, nem pelos fornecedores da cadeia.

Portanto, o presente estudo tem como ênfase a empresa FMX.

Em um segundo momento, quando já estava definido que a empresa a ser pesquisada seria aquela que se interessou pelo estudo, houve as dificuldades de acesso aos dados dos elos a jusante e a montante da cadeia, localizados fora do condomínio da FMX e isso tornou o processo da pesquisa bastante árduo e lento, até que todos os dados pudessem ser coletados. Da mesma forma, as dificuldades de acesso ao grupo de empresas posicionados no segundo nível de fornecimento também existiram, mas foram superadas e assim foram obtidas as informações necessárias para que se alcançassem os objetivos propostos, que será mencionado no decorrer da dissertação.

A escolha da cadeia produtiva foi feita em função da abertura que a empresa FMX deu para esse tipo de investigação, de características próprias do produto da

cadeia em estudo com relação à transferência de tecnologia e também por questão de proximidade geográfica, indispensável para a realização deste trabalho.

Devido à empresa FMX, veja figura 5, ser um elo fraco da cadeia, estando situada entre dois elos fortes, a mesma tem de ter estratégias eficazes para uma relação enxuta de fluxos de materiais e informações para otimizar seu desempenho, já que a matéria prima necessária classifica-se como commodities.

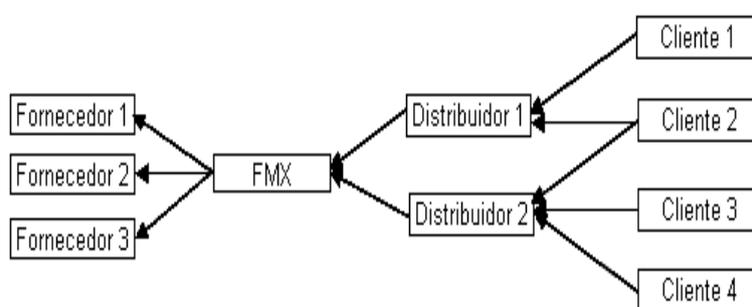


Figura 5 – Esquema da cadeia de suprimentos da FMX

#### 1.4 Objetivos:

Os objetivos desta dissertação estão classificados em objetivos gerais e específicos. Os primeiros descrevem o que será feito ao longo da exposição deste trabalho de pesquisa, enquanto os objetivos específicos tratam das ferramentas necessárias para que os objetivos gerais sejam atingidos.

##### 1.4.1 Gerais

- i. Cálculo do efeito de chicoteamento de um elo da cadeia de suprimentos de produtos farmacêuticos, utilizando os princípios da engenharia de controle.
- ii. Modelagem de uma cadeia de suprimento através de funções de transferência, onde cada elo da cadeia é substituído por um filtro digital.

- iii. Obter um suavizador exponencial, para uma política de suavização da demanda em toda a cadeia, tornando-a competitiva.

#### **1.4.2 Específicos**

- i. Obter um ferramental que permita a todos os elos da cadeia em estudo, trabalhar não com demandas baseadas em pedidos que chegam e sim com a demanda aproximada do consumidor final.
- ii. Simulação da cadeia, através de suas funções de transferência, observando os resultados com e sem suavizador exponencial.
- iii. Sinalização da demanda de modo a manter baixos níveis de estoque ao longo da cadeia de suprimento, com redução acentuada do efeito Forrester.

#### **1.5 Metodologia**

A primeira etapa do estudo de caso foi à realização de uma pesquisa bibliográfica sobre o tema “Administração da Cadeia de Suprimentos”, a fim de permitir condições iniciais para a realização do trabalho.

Em seguida, realizou-se a coleta dos dados históricos e recentes de vendas e pedidos do produto carro-chefe da empresa (acetona), que é a matéria-prima para a fabricação do produto final. Esses dados foram analisados e tratados para serem utilizados no cálculo do efeito do chicoteamento.

A etapa seguinte se constituiu em um estudo estatístico descritivo com o objetivo a de analisar a dispersão e classificação das demandas.

Foi realizada, também, uma análise estatística através do software MINITAB da regressão linear e uma análise dos coeficientes de correlação e análise da variância.

O teste de aderência permitiu verificar a representatividade da média e da variância, dados necessários para a determinação do valor do chicoteamento.

Posteriormente, foram calculados os valores do chicoteamento nos elos da cadeia com e sem o uso de filtros. Foram analisadas as distorções da informação e suas possíveis causas. A simulação dos elos foi feita com o software MATLAB.

Assim, as medidas para minimizar o efeito de chicoteamento poderão ser propostas como objetivo de utilizar a máxima eficiência e eficácia dos recursos disponíveis da empresa.

Foi necessário, portanto, avaliar os resultados obtidos e a validade do resultado. Um resultado será válido se ele for capaz de fornecer uma previsão aceitável do comportamento do sistema e uma resposta que possa contribuir para a qualidade da decisão a ser tomada.

Na última etapa foi feita uma reflexão final sobre todo o trabalho desenvolvido e os resultados obtidos, sugerindo através da metodologia de engenharia de controle uma nova ferramenta para administração em malha fechada.

## CAPÍTULO 2

### 2.1 Revisão de Literatura

Uma cadeia de suprimentos (figura 6) caracteriza-se por uma rede de negócios inter-relacionados que obtém a matéria-prima, converte-a em bens intermediários e de consumo final e por fim entrega os bens produzidos aos clientes (Dornier, 2000; Ballou, 1999).

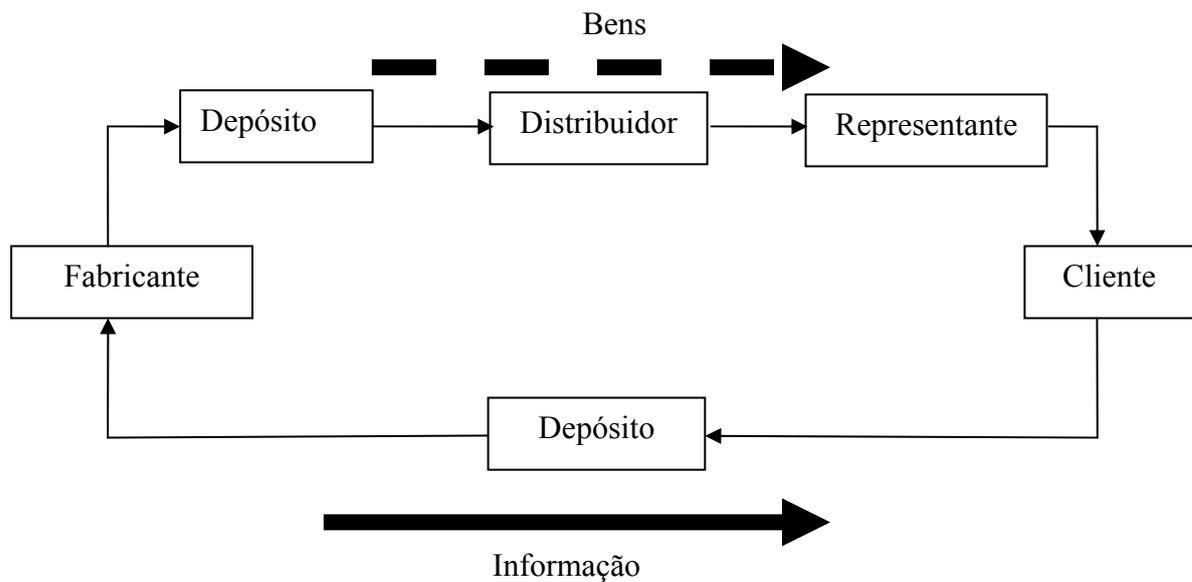


Figura 6– Recorte de uma Cadeia de Suprimento

Vários canais, compreendendo o sistema de produção e de distribuição, são utilizados para a entrega de bens ao consumidor final. Há um fluxo, na cadeia, não somente de produtos, mas também de informações e capital.

Cadeias de suprimento existem em qualquer tipo de indústria, mas estão especialmente presentes nas indústrias de manufatura que possuem um fluxo de bens, a partir dos fornecedores até os consumidores finais. Gerenciar uma cadeia de suprimento não é uma atividade trivial, uma vez que envolve grande quantidade de coordenação e planejamento logístico entre as diversas entidades que estão geograficamente separadas.

O maior desafio é coordenar o estoque e a capacidade de produção das diversas organizações presentes na cadeia de suprimento, dadas as demandas flutuantes no nível dos consumidores finais. No contexto tradicional de manufatura, as técnicas normalmente usadas para mensurar a performance da cadeia de suprimento são: valores do estoque, custos de aquisição, e tempo de cumprimento de ordem de compra.

Por causa da falta de informação em todos os componentes da cadeia de suprimento, no passado, gerentes de compras focavam sua atenção nas operações de otimização apenas dentro do domínio de suas próprias empresas.

## **2.2 Definições**

Uma cadeia de suprimentos pode ser definida como um “sistema constituído de uma ou várias empresas, proprietárias ou não, que nas várias etapas de um processo físico agrega valores e serviços, de forma gradual, adicionando valor aos olhos do cliente final, com objetivo de atendê-lo plenamente (Christhofer 1999)”.

O canal de distribuição é o “Trajeto intermediário do marketing que leva produtos do fabricante ao consumidor final”.

Sua característica central é que o varejista é mais íntimo do consumidor que o fabricante. Assim, ele é freqüentemente melhor informado sobre a demanda que o fabricante (Desiraju, Moorthy, 1997).

O efeito de chicoteamento é um assunto muito discutido na literatura. Porém, a medida desse efeito requer alguns cuidados que não receberam muita atenção e que têm a ver, entre outros, com a agregação de dados, dados incompletos e a análise de dados individuais dos elos sem levar em consideração os dados de toda a cadeia. (Fransoo & Wouters, 2000).

Sendo assim, é importante estudar os aspectos relacionados aos efeitos do chicoteamento e proporcionar às empresas uma visão mais geral da cadeia de suprimentos, diminuindo, conseqüentemente, esses efeitos e aumentando o seu nível de serviço em relação ao planejamento da produção e a satisfação do cliente final. Uma cadeia de suprimentos é formada por fornecedor, produtor, atacadista, varejista e, finalmente o cliente final. O fornecedor é responsável pela entrega de matéria-prima, o atacadista e o varejista são intermediadores entre o produtor e o mercado. As informações da demanda sobre o produto, vindas do cliente final, são responsáveis pelas previsões de produção e de venda. Porém, essas informações sofrem distorções, acarretando erros de previsão, ou seja, os níveis superiores da cadeia passam a ter uma visão errada do mercado, o que gera a produção para uma demanda não realista, conforme figura 7.

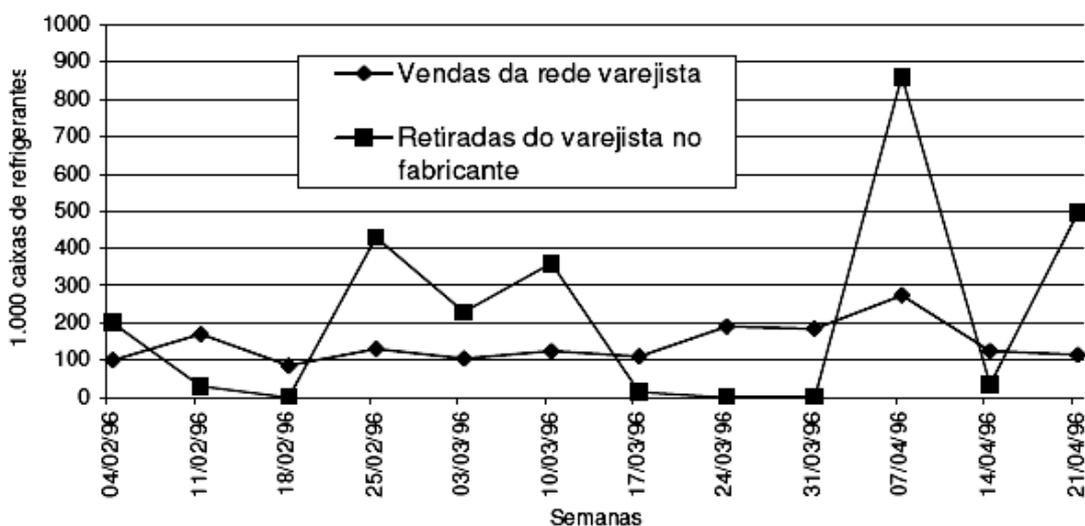


Figura 7– Distorção no padrão de demanda  
Fonte: Wanke (2000)

Diversos trabalhos, como os de Fransoo & Wouters (2000), Lee, Padmanabhan & Whang (1997) e Metters (1997), procuram identificar a magnitude do efeito de

chicoteamento na rentabilidade e na programação da produção, o que afeta de maneira direta o controle do canal de distribuição. Lee et al. (1997) citam quatro causas que levam ao efeito de chicoteamento:

1) Processo de Sinalização da Demanda (*Demand Signal Processing*): Esse efeito surge quando o varejista emite pedidos baseados na sua previsão atualizada da demanda. Como resultado, um fabricante perde a visão da demanda real do mercado. O planejamento da produção baseado na distorção do sinal da demanda torna-se ineficiente. O efeito da distorção é ampliado com o aumento do número de intermediários no canal de distribuição.

2) Jogo de Racionamento (*Rotationing Game*): Esse fenômeno ocorre quando os pedidos do varejista ao fabricante não coincidem com as vendas do varejo, por causa de uma autoproteção equivocada contra a escassez imaginária.

3) Lote de Pedidos (*Order Batching*): Pedidos em lote é uma consequência de dois fatores: o processo da política de estoques de revisão periódica e o processo de custo na transação de compra.

4) Variação de Preço (*Price Variations*): Fabricantes e distribuidores, periodicamente, têm promoções especiais como descontos em preços, descontos em quantidades ou bônus. Todas essas promoções resultam em flutuações de preço, levando os clientes a comprarem quantidades que não refletem suas necessidades imediatas. Eles compram em grandes quantidades, estocando para o futuro. Quando os preços dos produtos voltam ao normal, os clientes param de comprar. Esse tipo de comportamento causa uma distorção na informação real da demanda.

### 2.3 Medição do efeito de chicoteamento

Segundo Fransoo & Wouters (2000), o cálculo do efeito de chicoteamento é obtido dividindo-se a variação da demanda a montante pela variação da demanda a jusante. A variação se refere ao desvio padrão da demanda dividido pela demanda média.

Para o cálculo do efeito, podem ser realizadas diferentes escolhas de análise dos dados: por empresa, por produto ou por elo da cadeia, dependendo do nível de detalhe de dados e informações que a cadeia possui para a realização do cálculo e análise do efeito. A tabela 3 demonstra que, com os mesmos dados de demanda, o efeito de chicoteamento pode ser calculado de diferentes formas, dependendo da maneira como os dados são agregados (Fransoo & Wouters, 2000).

Na tabela 1, o efeito de chicoteamento é calculado por produto e por empresas referente a 5 dias de demanda.  $D_{in}$  representa a demanda do elo a jusante (mais próximo do consumidor final) da empresa,  $D_{out}$  o pedido realizado pela empresa para o elo mais a montante (mais distante do consumidor final),  $\mu$  a média e  $DP$  o desvio padrão da demanda dos 5 dias da semana e, por fim,  $\omega$  que é a divisão de  $D_{out}$  por  $D_{in}$ .

No cálculo realizado por produto, os índices  $\omega$  ( $D_{out}$  dividido por  $D_{in}$ ) encontrados foram de 2,769 para o produto 1 e 4,708 para o produto 2, considerando toda a cadeia (no caso duas empresas: A e B).

<b>Cálculo</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b><math>\mu</math> (Média)</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b><math>\sigma / \mu</math></b>	<b><math>\omega</math></b>
<b>Por produto</b>									
<i>Produto 1</i>									
Din	19	19	20	17	20	19	1,225	0,064	
Dout	14	19	18	21	23	19	3,391	0,178	2,781
<i>Produto 2</i>									
Din	19	22	19	20	20	20	1,225	0,061	
Dout	17	26	13	25	19	19	5,477	0,288	4,721
<b>Por empresa</b>									
<i>Empresa A</i>									
DinA	9	10	11	9	11	10	1,000	0,100	
DoutA	3	15	10	9	13	10	4,583	0,458	4,583
<i>Empresa B</i>									
DinB	29	31	28	28	29	29	1,225	0,042	
DoutB	28	30	21	37	29	29	5,701	0,197	4,690
<b>Da cadeia</b>									
DinA	38	41	39	37	40	39	1,581	0,041	
DoutB	31	45	31	46	42	42	7,450	0,177	4,317

Tabela 1 - Diferentes cálculos para o efeito de chicoteamento

FONTE: Fransoo & Wouters (2000)

No cálculo realizado por produto, os índices  $\omega$  (*Dout* dividido por *Din*) encontrados foram de 2,769 para o produto 1 e 4,708 para o produto 2, considerando toda a cadeia (no caso duas empresas: A e B). No cálculo realizado por empresa, o índice da empresa “A” foi de 4,583 e da “B” foi de 4,655. O índice da cadeia como um todo foi de 4,375. O maior índice encontrado foi o do produto 1 (4,708), que está influenciando diretamente o índice e o aparecimento do efeito de chicoteamento de forma acentuada na cadeia.

Nesse caso, um melhor estudo para a identificação das causas do efeito de chicoteamento e sua solução deveriam ser realizados no produto 1 ao longo da cadeia.

Deve-se ressaltar que apenas o cálculo do efeito de chicoteamento total não informa quais as causas que mais contribuem para o surgimento do efeito e quais soluções são as mais relevantes. Para Fransoo & Wouters (2000), a atribuição do efeito de chicoteamento total a uma de suas causas específicas pode ser problemático por causa da:

- Falta de uma política de colocação de pedido. Isso significa a ausência de uma regra clara para a colocação do pedido, que poderia não tornar possível a análise dos dados para o cálculo do efeito;
- Falta de dados em tempo real. A identificação do efeito da flutuação de preço e do jogo de racionamento e falta requer alguns dados em tempo real para se comparar com as vendas. Entretanto, o dado de demanda real não é, na maioria das vezes, disponível;
- Ausência de dados quando há falta de produtos.

A comparação da demanda real com as vendas poderia ser relevante quando a falta de produtos ocorre e os preços mudam. Esse tipo de informação não é sempre disponível, além de geralmente não ser gravado de forma sistemática pelas empresas.

Algumas medidas são propostas com a finalidade de minimizar esse efeito, tornando-o menos significativo na cadeia de suprimentos (Fransoo & Wouters, 2000):

- Processo de Sinalização da Demanda: Estabelecer metodologias de previsão pode não ser uma solução ideal, pois podem conter flutuações e distorções na demanda. Uma solução clara é conceder acesso do fabricante aos dados de demanda da saída do varejo, o que é conhecido como assimetria na informação.

- Jogo de Racionamento: uma solução eficiente para esse problema vem na forma de um contrato que limita a flexibilidade dos compradores restringindo desde as quantidades de pedidos até as políticas de cancelamento.

- Lotes de Pedidos: a distorção na demanda, devida ao processo de revisão periódica, pode ser reduzida através da permissão ao fabricante de acesso aos dados de venda no nível de varejo. O fabricante pode usar essa informação para planejar a produção que é determinada pelas vendas em oposição aos pedidos. Os sistemas de transmissão de pedidos são uma grande ajuda na redução de custos na emissão destes. Como resultado desse sistema, é mais freqüente o reabastecimento em pequenos lotes, o qual conduz a uma menor distorção na informação da demanda e uma maior eficiência na entrega dos produtos e no planejamento da produção.

- Variação de Preço: uma solução para reduzir esse efeito é estabelecer contratos de compra entre os fabricantes e os compradores. Esse é um modo dos produtores planejarem a produção de maneira eficiente e os compradores praticarem as suas estratégias de compra.

De acordo com Desiraju & Moorthy (1997), as exigências de desempenho podem ser um ponto favorável na administração dos canais de distribuição. Segundo esses autores, o estabelecimento de exigências pelos produtores sobre os preços e serviços dos varejistas ou ambos e os investimentos em sistemas de informações para monitorar acordos entre os membros da cadeia são fatores que beneficiam o desempenho do canal de distribuição.

Porém, qualquer projeto de exigência de desempenho no canal de distribuição será inviável, a menos que as duas partes estejam prontas para cooperar, fazendo

investimentos em longo prazo em sistema de informação que devem ser seguros e confiáveis.

#### **2.4 A busca pela alta performance de uma cadeia de suprimento**

À medida que produtos fabricados ficam mais complexos, a designação das demandas requer cada vez mais recursos que crescentemente estão sendo compartilhados (suprimentos/valores) entre os membros da cadeia. A competição está sendo tipificada menos através de empresa contra empresa e mais por cadeia de suprimento contra cadeia de suprimento. (Bhattacharya & Coleman, 1995). Em um sistema, qualquer movimento em um dos seus componentes tem efeito sobre os demais componentes do mesmo sistema. A tentativa de otimização de cada um dos componentes, isoladamente, nem sempre leva à otimização de todo o sistema, podendo às vezes levar à sub-otimização.

Os montadores finais estão simplificando as suas cadeias de suprimento para reduzir complexidade de logística e prover melhor valor ao cliente final. Para fornecedores, particularmente PEMs (pequenas e médias empresas), isso dá origem a oportunidades, para aumentar 'valor agregado'.

Historicamente, as PMEs têm ficado entre os grandes clientes e fornecedores sofrendo as conseqüências do uso do poder de barganha dos elos fortes. Agora, se as PMEs querem sobreviver e crescer, elas terão que adotar uma posição mais agressiva para se re-posicionarem com respeito às tendências de suprimento da cadeia. Fabricar inevitavelmente está se tornando um negócio globalmente organizado e dominado por grandes companhias internacionais.

A tendência para que as grandes empresas alcancem tais metas são:

1. Os fornecedores teriam menos clientes e relações mais próximas, colaboradores por longo prazo com eles. Esses fornecedores que são

agressivos se posicionam para assegurar que eles não se tornem vítimas do provedor 'processo de racionalização' sendo mais provável permanecer no enxugamento da base de provedor.

2. Sociedades de empresas reduzindo a base de fornecedores tornando difícil a entrada de fornecedores numa outra cadeia de suprimento.
3. Eles teriam que identificar o foco das suas competências que é a força de alavancar para reter e ampliar o seu negócio.
4. Aumento de oportunidades de crescimento tem que ser buscado dentro das cadeias de suprimento seja por aumento do “valor agregado” de produtos existentes, ou reposicionando como fornecedor na cadeia de suprimento para uma oportunidade futura.
5. Melhorias industriais, conhecer JIT e exigências de qualidade.
6. Investimento em EDI ou IT (tecnologia de comunicação) teria que ser feita.

#### **2.4.1 No plano estratégico**

Ao nível estratégico a tendência seria:

1. Racionalização de cadeias de suprimento, com OEMs (original equipment manufactures), usualmente os grandes clientes, participando como simples/duplo fornecedores e reduzindo assim suas base de suprimento.

2. Os OEMs estão buscando o foco de suas competências agregando valor através de um numero crescente de fornecedores externos.

3. Estes fornecedores formam um elo, enquanto sub-montadores, constituindo uma célula única em lugar de células individuais. Isto está conduzindo a estruturação de cadeias de suprimento em fileiras, a primeira fileira agindo como integrador de sistemas que compra de segundos e às vezes de terceiros fornecedores de fileira.

4. A base de seleção de fornecedores está mudando fundada principalmente em preço e na tríade colaborador/tecnologia/competência. Isto pede sociedade em lugar da relação de competidor ocidental tradicional entre o provedor e cliente.

5. Há maior informação compartilhada e planejamento em longo prazo em comum, para prioridades competitivas, volumes, desenvolvimentos / melhorias.

#### **2.4.2 Trabalhando no plano operacional**

Ao nível operacional a tendência é:

1. Entregas Just-in-Time.
2. Qualidade com suprimento zero de defeito na linha.
3. Dados eletrônicos com computadores interligados com informação simétrica.
4. Preço de custo, preço-alvo em livro aberto.
5. Aproximação em comum para responsabilidade de design-design de produto devolvido a fornecedores.
6. Avaliação regular.

A corporação virtual veio para ficar. Bhattacharya & Coleman aconselham os fornecedores, particularmente PMEs, para assumirem uma posição proativa na integração de cadeias de suprimentos. Esta técnica e o vigamento emergiram do trabalho que é levado a cabo em administração de cadeia de suprimento do Grupo Industrial Warwick que tem usado PMEs para planejar as suas estratégias para crescimento. Na maioria dos casos verifica-se que as PMEs reagem a mudanças em cadeia de suprimento e raramente dão passos eficazes em análise que as oportunidades ofereceram por estas tendências. (Bhattacharya & Coleman, 1995).

## **2.5 Configurações de flexibilidade para a administração de cadeia de suprimento**

A instabilidade inerente de cadeias de suprimentos complexas é bem compreendida e documentada: os benefícios potenciais de levar a cada elo da cadeia estoques reduzidos e baixos custos operacionais são claramente significativos. Há uma grande comunidade de gerentes e profissionais que conhecem agora “O QUE” precisa ser feito em princípio. O assunto para tudo é “COMO” fazer. Sobre isto, para os seus negócios em particular o trabalho de Inger, Braithwaite e Christopher (1995) construiu um modelo organizacional no qual a logística modera as demandas contraditórias e a cultura de fabricar por um lado e comercializar no outro. Os autores introduzem três técnicas práticas por afiançar os benefícios de administração de cadeia de suprimentos: simulação baseada em tempo; custo de serviço; mudança de direcionamento. Usadas juntas estas metodologias podem introduzir inovação em efetividade na cadeia de suprimentos.

Seu conhecimento será instável, particularmente se cada estoque é administrado semi-independente dos outros. São demonstrados exemplos desta independência quando cada ação é efetivada com a emissão de pedidos por lógica de quantidade do ponto de pedido que é método usualmente mais comum. Tal comportamento desencadeia o efeito Forrester, identificado pelo mesmo nos anos cinqüenta, que resultou no conceito de Administração de Cadeia de Suprimento que emerge nos recentes 1970s.

A razão, Forrester identificou claramente, é o efeito da reação atrasada às mudanças de demanda e desequilíbrio dos estoques nas ações locais. Assim os volumes de reabastecimento não só apóiam na demanda de cliente antecipada, mas também no re-balanceamento dos estoques locais.

## 2.6 Proposição de cadeia de suprimento

O que os administradores sabem é a necessidade de melhorar o desempenho de toda a cadeia de suprimento, mas realmente a maioria das organizações não sabe os meios para alcançar isto. Isto não é surpreendente, porque a maioria das organizações não sabe o quanto sua cadeia de suprimento é isolada. Um desafio é quanto ao nível de suprimento que uma empresa traz de efeito, sem referência para qualquer parceiro em uma base de tempo. O tempo que um pedido é feito para o elo a montante e até que este elo o transforme em produtos acabados e entregue ao elo a jusante muda toda uma base de tempo da cadeia.

O que todos sabem é que todas as previsões empresariais têm uma coisa em comum: quase sempre são míopes.

Superar as dificuldades anteriores exige que se elimine a amplificação de demanda e distorção de tempo. A hipótese é que isto gerará benefícios significativos em forma de capacidade de armazenamento e estoque reduzido, ciclos industriais econômicos mais estáveis, melhor atendimento ao consumidor, na forma de disponibilidade de produto, maior precisão e lucros, e eventos de manipulação no mínimo dobrado por cadeia.

As prescrições para alcançar a logística enxuta são:

- Planejamento de ciclos curtos.
- Redução de lead times.
- Reposição segura e freqüente de estoque, com reabastecimento freqüente do que foi consumido no período imediatamente anterior.
- Introdução de pontos únicos de interação (Hoekstra, Romme 1992); isso é onde a cadeia de suprimento move de previsão empurrada de material para demanda puxada, baseada em demanda de cliente atual.

- Redução nos tamanhos de lotes de fabricação e distribuição.
- Adiamiento da explosão de produto para ajuste nos vários mercados tendo as maiores ações em produto genérico, ou até melhor em materiais e praças substitutas.

Acredita-se que “O QUE” fazer e “COMO” implementar isso emergiu como os fatores de sucesso críticos para os anos noventa. O método para alcançar isso é reestruturar a cadeia de suprimento, por exemplo, reduzindo o tamanho do lote e o lead-time de fabricação, ou relaxar os objetivos de serviços a clientes, ou possivelmente ambos.

Flexibilidade de operações pode ser considerada uma arma crucial para aumentar competitividade num mercado complexo e turbulento (Upton, 1994). Flexibilidade se torna particularmente pertinente quando a cadeia de suprimento (SC) inteira é considerada, enquanto consistindo em uma rede de suprimento, produção e distribuição (Christopher, 1992). Neste caso, muitas fontes de incertezas têm que ser controladas, como demanda de mercado, lead time de provedor, qualidade de produto e demora da informação (Giannoccaro et al., 2003). Flexibilidade permite trocar produção entre diferente plantas e fornecedores, de forma que a administração possa jogar com variabilidade interna e externa (Chen et al., 1994).

Em um caso global, não só fabricando, mas também a logística pode ser uma fonte importante de vantagem competitiva, desde que fluxos de materiais fortemente afetem o desempenho empresarial. Diferentes logísticas emanam da SC podem ser ativadas dentro do processo para enfrentar emergências como picos de demanda (Garavelli, 2003).

## **2.7- Impacto na seleção de modelo de uma cadeia de suprimento**

A administração de cadeia de suprimento (SCM) atraiu atenção crescente na comunidade acadêmica e em companhias que buscam formas para melhorar a sua posição competitiva dentro do mercado global. SCM relaciona os co-pedidos de produtos e informação que flui entre fornecedores, fabricantes, os distribuidores, varejistas e clientes. Para que elos diferentes em uma cadeia de suprimento nos co-pedidos de suas atividades, eles têm que compartilhar informação. Embora tendo disponíveis ferramentas modernas como IT (Tecnologia da Informação), os custos para montar, operar uma informação compartilhada entre elos de uma cadeia de suprimentos, ainda são significativos. Além disso, muitas companhias são relutantes para compartilhar informação com os seus sócios comerciais, receosas de que as informações serão usadas incorretamente para a sua desvantagem. Para motivar estas companhias para compartilhar informação, elas precisam estar atentas aos benefícios que o sistema de informação compartilhada podem trazer.

Administração é continuamente envolvida em decisão, freqüentemente sem o adequado apoio informativo, causando trocas freqüentes de cargas de trabalho dentro do sistema, atrasando a produção com o aumento do tempo de transporte (Egbelu, 1991). A produção emite tarefas às plantas e o setor de transporte é então fator decisional crítico, fator do qual pode diminuir o desempenho do elo da cadeia (Albino et al., 2002).

Uma estratégia diferente de co-pedidos exige plantas de produção e desafio de vários mercados (Bhatnagar et al., 1993; Kogut e Kulatilaka, 1994). Coordenar a rede de produção exige a análise da flexibilidade dos componentes de seus sistemas e as relações para avaliar o seu impacto no sistema inteiro. A flexibilidade na

administração de SC está entre as preocupações principais de operações do sistema (Duclos et al., 2001).

Muitos fatores influenciam o desempenho de uma cadeia de suprimento. Um fator importante é a precisão das previsões usadas por diferentes elos influenciando nas decisões de seu planejamento. A maioria dos varejistas embora não saiba sua demanda com certeza, tem de tomar as decisões de seus estoques baseados em previsões de demanda.

Com previsões inexatas, a quantidade de materiais pedida não iguala com a demanda. Estes erros nas previsões do varejista são passados ao fornecedor na forma de pedidos distorcidos. Lee et al. (1997) mostraram que a variabilidade da demanda pode ser ampliada a montante da cadeia de suprimento influenciando na forma de como os pedidos passados de varejistas para os distribuidores. Então, a inexatidão de previsões influencia significativamente no desempenho da cadeia de suprimento em termos de aumento de custos de estoques, pedidos em carteira ou perda de vendas, e benevolência de cliente ao longo da cadeia de suprimento. Eles também podem causar baixa utilização de capacidade e outros problemas em produção (Xiande Zhao, Jinxing Xie, Janny Leung, 1999).

Para melhorar o desempenho de uma cadeia de suprimento sob a incerteza de demanda é sugerido que companhias na cadeia de suprimento compartilhem informação e pedidos coordenados (Lee et al. 2000). Zhao et al. (2001), propuseram e avaliaram diferentes métodos de informação compartilhada entre varejistas e fornecedores, onde varejistas usaram média móvel simples para fazerem previsões de demanda. Não está claro se a sua conclusão seria consistente na previsão sob outras suposições. O propósito dos autores foi examinar como a seleção de modelos de previsão influencia no desempenho da cadeia de suprimento e no valor da informação

compartilhada. Este tipo de conhecimento ajudará companhias dentro da cadeia de suprimento a selecionar um modelo apropriado de previsão, sob informação compartilhada, minimizando o impacto negativo de incerteza de demanda no desempenho da cadeia.

O avanço rápido em informática fornece ferramentas que permitem aos parceiros comerciais em cadeias de suprimento compartilhar informações entre si. Ainda, que benefícios possam ser obtidos, por informação compartilhada, uma pergunta que freqüentemente é feita trata de seu impacto em cadeias de suprimento. Vários investigadores examinaram o impacto de informação compartilhada em desempenho empresarial. Strader et al. (1999) descreveram como a aplicação de informática atual, como o EDI e a Internet, ajudaram companhias a compartilhar informação. Examinaram ainda o impacto de informação-compartilhada na cadeia de suprimento e o seu desempenho pedido-cumprimento.

Através de simulação usando computador, examinaram o desempenho de uma cadeia de suprimento sob várias informações e estratégias compartilhadas. Eles acharam que o compartilhamento suprimento-demanda-informação ajudou substancialmente na redução de custos de estoque no ambiente de produção quando se usa política de “unir para pedido”. Compartilhando também informação de suprimentos reduz substancialmente o tempo de ciclo de pedido em um ambiente de “unir para pedido”. Srinivasan et al. (1994) investigaram o impacto de integração de informação vertical EDI usando no desempenho de remessa de fornecedores por a ambiente (JIT) ( Zhao, Xie e Leung, 1999).

Usando um modelo de simulação, Johnson et al. (1999), examinaram o impacto no estoque administrado pelo vendedor (VMI), em alguns ambientes ideais com volatilidade de demanda alta, adoção parcial de VMI, e capacidade industrial

limitada. VMI era modelado como uma redução na frequência dos pedidos, dos varejistas para o fornecedor (de quatro semanas para duas semanas, todas as semanas, ou até mesmo diariamente). Eles acharam que os benefícios operacionais associados com VMI eram muito promissores. Mostraram também que a aproximação de VMI reduziu drasticamente os estoques de todos os participantes na cadeia de suprimento sem chegar a um acordo de serviço. Porém, eles não fizeram medida dos benefícios em condições de custo.

Zhao et al. (2001) avaliaram diferentes métodos de informação compartilhada por simulação. Eles assumiram que os varejistas usaram um modelo de média móvel simples para fazer previsões de demanda. Não foram claras as conclusões sobre outros modelos de previsão, e como a seleção do modelo de previsão pelo varejista influencia o desempenho da cadeia de suprimento e os benefícios e ganhos por informação compartilhada. Enquanto o impacto de seleção do modelo de previsão no desempenho de cadeia de suprimento não foi investigado extensivamente, vários pesquisadores têm investigado o impacto de previsão no desempenho de planejamento de exigência de materiais em sistemas (MRP). Zhao e Lee (1993) estudaram o impacto de modelos de previsão e a seleção de domínio de horário de produção (MPS) e os parâmetros no desempenho de sistemas de MRP.

## **2.8 Impacto do lead time de provedor e previsão da demanda**

As empresas enfrentam constantemente flutuações incertas de pedidos de cliente. Ao lidarem com flutuações de pedidos, as elas precisam manter estoques de segurança e capacidade de produção suficiente e plano de trabalho e transporte e, cuidadosamente, administrar o seu tempo de entrega. Assim, flutuações de pedidos podem aumentar custos e reduzir a eficiência operacional de uma empresa, e é

efetivamente crucial para que a mesma administre flutuações de pedidos para melhorar rentabilidade. Além disso, flutuações de pedido podem adversamente afetar a habilidade de uma empresa para cumprir pedidos de cliente de maneira oportuna que pode resultar em perda de futuro negócio no mercado competitivo de hoje. Assim é importante entender o que causa flutuações de pedidos e o que uma empresa pode fazer para reduzir estas flutuações.

No trabalho de Kut e Zheng (2002) foi estudado como o desempenho de tempo de entrega de uma empresa pode afetar as flutuações de pedidos de seus clientes. É bem conhecido de teoria de estoque que o lead time de entrega de um provedor afeta as decisões de estoque de pedidos de seu cliente. Geralmente, um lead time comum mais alto como também variabilidade de lead time mais alta de um provedor vai causar ao seu cliente trabalhar com um nível de estoque mais alto.

O inter-relacionamento entre o desempenho de lead time de provedor e quantidades de pedidos de cliente são fortes, especialmente quando o provedor opera a plena capacidade e é difícil o provedor ajustar capacidade e manter lead time de entrega constante para seus clientes. Ao enfrentar demandas inesperadas e altas sob uma tal situação, o provedor tem necessidades de aumentar seu lead time de entrega normal para seus clientes que incitariam então seus clientes para ajustar as suas quantidades de pedidos futuras. Então, a pessoa precisa considerar o lead time de entrega do provedor como o impacto dentro da cadeia para seus clientes nas decisões de pedidos estudando esta inter-relação.

## **2.9 Explorando a utilização de um sistema CONWIP**

“*CONWIP* (Constant work in process) é uma técnica “*long-pull*” (puxada longa) da produção, generalizada de um sistema de Kanban no qual focaliza o controle WIP,

controlando pedidos que saem do chão de fábrica (semelhantemente para o controle de produção com contribuição de velhas técnicas).”

*CONWIP* para cadeia de suprimento (*CONWIP SC*), é uma aproximação pela qual tenta-se melhorar o desempenho da cadeia de suprimento (SC), por uma extensão do controle de produção fechado sistema de *CONWIP* (Spearman et al., 1990).

No sistema *CONWIP* cartões são nomeados em toda a linha de produção (Spearman et al., 1990).

*CONWIP SC* está definido aqui como um sistema de produção–distribuição em que a linha de produção de cada empresa tem uma semelhança a um “centro de trabalho” que é uma parte de uma “linha global” de suprimento. O jogo de cartões mencionado na descrição de sistema de *CONWIP* estende agora a um centro virtual de controle que governa a SC e administra as partes que fluem e os estoques ao longo da cadeia. Quando pedidos chegam ao final os elos são liberados, os pedidos de produção e materiais são exigidos ao primeiro elo considerando sua produção e restrição de capacidade. Há um controle sem igual e centralizado dos pedidos em carteira da SC.

Assim, informações centralizadas e controladas por tipos de ferramentas como Internet, é crítico neste contexto. Ovalle e Márquez (2001).

## **2.10 Conceitos fundamentais da engenharia de controle**

Sabe-se que a Teoria de Controle não se aplica somente ao campo das Engenharias. As Ciências Econômicas também se valem destes princípios universais para que os sistemas econômicos sejam analisados e controlados, abrindo assim uma outra perspectiva para a análise de mercado.

Para um perfeito entendimento deste trabalho, faz-se necessário à definição de alguns conceitos básicos.

Quando qualquer sistema quer seja como um todo ou parte constitui-se de blocos com dados de entradas e saídas discretos no tempo, cada bloco pode ser modelado através de um filtro digital (Phillips et al. 1995). Como uma cadeia de suprimentos é constituída por elos com entradas e saídas discretos em termos de emissão de pedidos na saída e vendas na entrada, no sentido cadeia acima, não havendo nem necessidade de normalização já que tanto entrada como saída são expressas em unidades de produto. Assim, temos na figura 7:

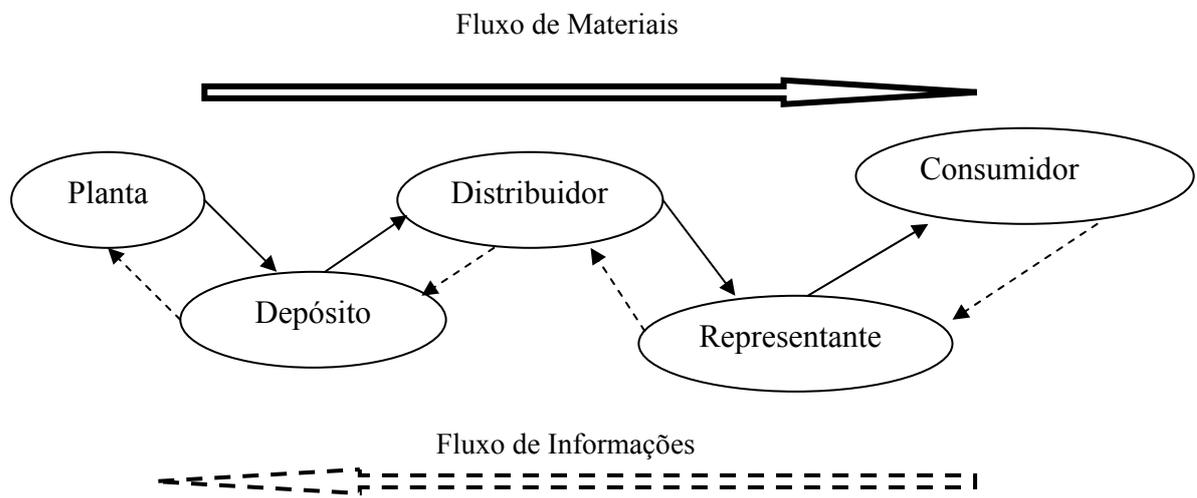


Figura 8- Fluxo de informações e matérias na cadeia de suprimento  
Fonte: adaptado de Pim Ho Lin (2003)

Um filtro digital é um sistema temporal discreto projetado para passar o conteúdo espectral de um sinal de entrada em uma determinada banda de frequências, isto é, a função de transferência do filtro forma uma janela espectral através da qual somente é permitida a passagem da parte desejada do espectro de entrada (Defatta et al. 1988).

### 2.10.1 Tipos de Filtros

Uma ampla classe de filtros digitais é descrita por uma equação de diferenças [HAM 89], com coeficientes constantes conforme descrito na equação 1:

$$\sum_{l=0}^n C_l \cdot x_{n-l} = \sum_{k=1}^n D_k \cdot y_{n-k} \quad (1)$$

Onde  $x$  e  $y$  (equação 1) representam os sinais de saída e entrada, respectivamente. Apesar desta equação ser geral, somente os sistemas causais serão discutidos com  $y_n$  e  $x_n$  iguais a zero para  $n < 0$ .

Um sistema causal refere-se a um sistema que é realizável em tempo real (Oppenheim et al. 1975). Isto é, a um dado tempo  $m$ , a saída é dependente somente das entradas presente e passadas,  $n \leq m$ , e saídas passadas,  $n < m$ .

Reescrevendo a equação (1) para expressar a saída presente em termos das entradas presentes e passadas e saídas passadas, temos:

$$y_n = A_0 x_n + A_1 x_{n-1} + \dots + A_n x_0 - B_1 y_{n-1} - B_2 y_{n-2} - \dots - B_n y_0 \quad \text{ou}$$

$$y_n = \sum_{l=0}^n A_l \cdot x_{n-l} - \sum_{k=1}^n B_k \cdot y_{n-k} \quad (2)$$

Onde  $A_l = C_l / D_0$  e  $B_k = D_k / D_0$  são as entradas e saídas normalizadas,  $n$  é a ordem da equação de diferenças,  $x_{n-1}$  é a entrada anterior e  $y_{n-k}$  é  $k$ -ésima saída anterior.

A equação (2) acima pode ser implementada como um conjunto de multiplicações, somatórios e atrasos, ou seja, equação de diferenças.

### 2.10.3 Filtros de Resposta Infinita ao Impulso (IIR)

A resposta de um filtro de resposta infinita ao impulso é função dos sinais de entrada presentes e passados, e dos sinais de saída passados. A equação de diferenças

(equação 2) representa um filtro IIR porque é uma função dos elementos de entrada e resposta. A dependência das saídas passadas (recursividade) faz com que a duração da resposta seja infinita, mesmo quando cessarem os sinais de entrada [ANG 81].

Devido ao fato de que nestes filtros os sinais de saída já calculados farão parte no cálculo dos sinais de saída ainda por calcular, estes filtros também são chamados de filtros recursivos.

Para a pesquisa em questão, na modelagem dos elos de uma cadeia de suprimento os filtros IIR são os mais importantes devido a sua dependência com os dados de entrada passados e presentes e dados de saída passados, portanto baseando-se em experiências dos elos da cadeia para construção do modelo. Outra vantagem dos filtros IIR é que a amostragem para modelagem deste filtro, não necessita de número elevado de amostras (mínimo de 30).

#### **2.10.4 Projeto de um Filtro IIR**

No caso dos filtros IIR o problema da aproximação para o projeto de filtros digitais não são conceitualmente diferentes ao problema para projeto de filtros analógicos. A abordagem para o projeto de filtros analógicos envolve uma aproximação analítica das especificações do filtro por uma função de transferência, a partir da qual projeta-se uma rede analógica que implemente esta função.

Uma função de transferência realizável é uma das características de uma rede linear estável e causal. Estas características podem ser obtidas fazendo com que a função de transferência seja uma função racional de “ $s$ ” (onde  $s = \sigma + j\omega$ ) com coeficientes reais, que os pólos do filtro analógico estejam na metade esquerda do plano “ $s$ ” e o grau do polinômio do numerador seja igual ou menor que o grau do polinômio do denominador.

O problema do projeto de filtros digitais requer a determinação dos coeficientes da equação diferencial para preencher as características desejadas para o filtro, como resposta em frequência. Como já existem abordagens clássicas para o projeto de filtros analógicos, foram desenvolvidas aproximações que mapeiam os pólos e zeros analógicos do plano  $s$  para o plano  $z$ , de forma a alcançar as características desejadas do filtro digital.

A abordagem tradicional para o projeto de filtros IIR envolve a transformação de um filtro analógico em um filtro digital, com as mesmas especificações. Esta é uma abordagem razoável, porque:

1. A tecnologia de projeto de filtros analógicos está bastante avançada e, desde que resultados úteis possam ser alcançados, é vantajoso utilizar procedimentos já desenvolvidos para filtros analógicos.
2. Muitos métodos de projetos analógicos têm formulas de projeto relativamente simples. Desta maneira, métodos de projetos de filtros digitais baseados nestas fórmulas são também simples de implementar.
3. Em muitas aplicações, é de interesse utilizar filtros digitais para simular o desempenho de um filtro analógico.

A equação 3 abaixo, descreve uma função analógica

$$H_a(s) = \frac{\sum_{k=0}^M d_k s^k}{\sum_{k=0}^N c_k s^k} = \frac{Y_a(s)}{X_a(s)}. \quad (3)$$

Onde  $x_a(t)$  é a entrada e  $y_a(t)$  é a saída e  $X_a(s)$  e  $Y_a(s)$  são suas respectivas transformadas de Laplace. Assume-se que  $H_a(s)$  foi obtido por um método de projeto para filtros analógicos [OPP 89]. A entrada e a saída deste sistema estão relacionadas pela convolução integral,

$$y_a(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x_a(\tau) \cdot h(t - \tau) d\tau. \quad (4)$$

Onde  $h_a(t)$  (equação 4), a resposta impulsiva, é a transformada inversa de Laplace de  $H_a(s)$ .

A função racional correspondente para filtros digitais tem a forma explícita na equação 5:

$$H_a(s) = \frac{\sum_{k=0}^M b_k z^k}{\sum_{k=0}^N a_k z^k} = \frac{Y_a(z)}{X_a(z)} \quad (5)$$

ou, equivalentemente, pela seguinte equação de diferenças:

$$\sum_{k=0}^M a_k \cdot y_{n-k} = \sum_{k=1}^k b_k \cdot x_{n-k} \quad (6)$$

A equação 6 é semelhante a equação (1).

Na transformação de um sistema analógico para um digital, deve-se então obter  $H(z)$  ou  $h(n)$  do projeto do filtro analógico. Nesta transformação, geralmente necessita-se que as propriedades essenciais da resposta analógica em frequência sejam preservadas no filtro digital resultante. Desta maneira, devem-se mapear os eixos imaginários do plano-s no círculo unitário do plano-z. Uma segunda condição é que um filtro analógico estável deva ser transformado em um filtro digital estável, isto é, se o filtro analógico tem pólos somente na metade esquerda do plano-s, então, o filtro digital deve conter pólos apenas dentro do círculo unitário do plano-z [LAM 79].

Os principais métodos para a transformação de filtros analógicos em filtros digitais são:

1. Invariância ao Impulso.
2. Projeto baseado em soluções numéricas da equação diferencial.
3. Transformação Bilinear.

No sistema foi utilizada a técnica de Transformação Bilinear, devido ao fato de que esta técnica é a mais utilizada em aplicações onde se deseja preservar a magnitude da resposta em frequência do filtro analógico, ainda que com a inclusão de distorção de fase.

### 2.10.5 Forma básica do filtro – IIR

Para descrever o comportamento do filtro, uma equação de diferenças é implementada a partir da configuração do filtro. A figura 8 descreve em diagrama de bloco um exemplo de filtro IIR.

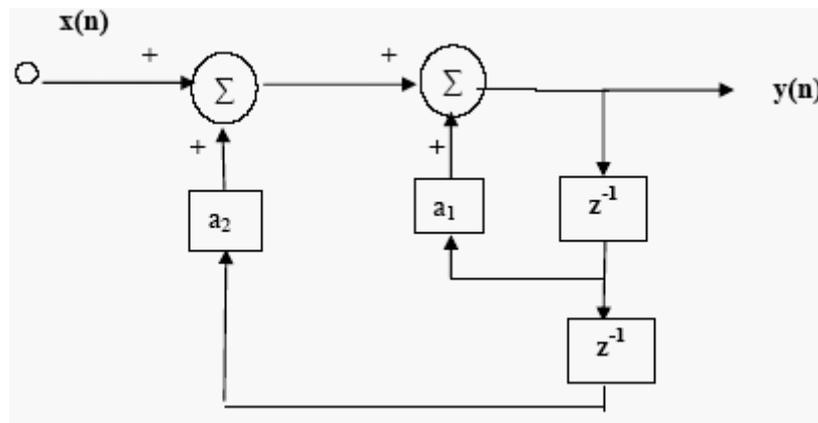


Figura 9 – Forma básica IIR

A equação de diferenças para o diagrama de bloco da figura 9 fica:

$$y(n) = x(n) + a_1y(n-1) + a_2y(n-2) \Rightarrow Y(z) = X(z) + a_1Y(z)z^{-1} + a_2Y(z)z^{-2} \Rightarrow Y(z)(1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2}) = X(z) \Rightarrow H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{1}{1 - a_1z^{-1} - a_2z^{-2}}, \quad (7)$$

onde a variável  $z = e^{j\omega}$ .

Observe que neste exemplo na equação (7) a saída atual depende de valores passados da saída e valor presente da entrada.

Um modelo baseado na teoria de controle discreto para uma regra de reabastecimento foi apresentado por Disney et al. (2001). Deste modelo é derivada uma expressão analítica para chicoteamento que é diretamente equivalente a uma medida estatística

comum usada frequentemente em simulação, estudos estatísticos e empíricos para quantificar o efeito de chicoteamento.

A expressão analítica vai mostrar claramente que o chicoteamento pode ser reduzido levando uma fração menor do erro na posição de estoque e posição no canal, toda vez que uma decisão de pedido é tomada como é comum em muitos sistemas de programação. Além disso, o aumento do tempo médio da previsão reduz o efeito de chicoteamento.

Logo uma expressão analítica para a variabilidade da posição de estoque é obtida e usada junto com a expressão de chicoteamento para determinar pedidos satisfatórios e modelos de sistemas que minimizam o chicoteamento e a variabilidade de estoque para uma gama de medidas entre as duas variabilidades. A relação entre nossa medida de Chicoteamento e a medida em teoria de controle é a largura de faixa de ruído que será justificada em seguida. (S.M. Disney, D.R. Towill 2001).

Essa contribuição é obtida, então, da exploração da expressão analítica para o Integral de erro absoluto de tempo (ITAE), critério usado frequentemente para quantificar o estoque com respeito a uma demanda determinística. A técnica forma um Sistema de Apoio de Decisão que pode ser usado para projetar cadeia de suprimento com decisões de pedidos equilibrados e claramente mostra como o efeito de Chicoteamento pode ser reduzido, às custas de tempos de recuperação de estoque aumentados.

Recentemente, muitos autores têm usado a equação (8) como uma simples medida do Efeito de Chicoteamento, onde  $O_i$  refere-se aos pedidos colocados a um fornecedor e  $V_i$  representam vendas ou consumo. Embora esta seja uma medida útil, comparando a variabilidade de produção de quantidades com a variabilidade de contribuição, porém, ela não descreve a estrutura que causa a variação do aumento.

Na equação (8),  $\sigma^2$  indica variabilidade e  $\mu$  a média. Para um sinal randômico estacionário, em cima de períodos longos de tempo a média ( $\mu$ ) cancela os desvios com  $\mu_{pedidos} = \mu_{vendas}$  se o sistema é linear.

$$Chicoteamento = RV_{pedidos} = \frac{O_i}{V_i} = \frac{\sigma^2_{pedidos} / \mu_{pedidos}}{\sigma^2_{vendas} / \mu_{vendas}} = \sigma^2_{pedidos} / \sigma^2_{vendas}$$

(8)

Obs:  $O_i$  = pedidos colocados;  $V_i$  = Vendas ou consumo;  $I_i$  = posição atual de estoque.

Esta taxa de variabilidade de variabilidade (RV) medida, pode ser aplicada facilmente para quantificar flutuações em estoque atual  $I_i$  como mostrado em equação (9). Note que para medir a amplificação de variabilidade de estoque se está somente preocupado com a relação da variabilidade como a média de níveis de estoque é arbitrária dentro de nossa estrutura.

$$Amplificação da variância de estoque = RV_{est.atual} = \frac{\sigma^2_{est.atual}}{\sigma^2_{vendas}} \quad (10)$$

## 2.11 A relação entre chicoteamento e largura de faixa de ruído

Para mostrar que a largura de faixa é um dos meios de quantificar o efeito de chicoteamento em teoria de controle, Disney et al. (2001) e Dejonckheere et al. (2000) usaram a relação de Lyapunov–Parseval como descrito por Tsypkin, verificando que a largura de faixa de ruído relaciona-se às relações de amplificação de variância. A relação de Lyapunov–Parseval vale para um sistema estável (i.e. um sistema que tem uma abscissa negativa de convergência). Aqui, tem-se uma vantagem que o sistema APIOBPCS (Automatic Pipeline Inventory and Order Based Production Control System) sempre é estável e tem uma estrutura simplificada. Estoque de Cadeia baseado em Sistema Pedido Automático, Sistema de Controle da Produção

(APIOPBCS) criado por John et al. (1994). APIOBPCS pode ser expresso em palavras como “Sistema de controle em que o alvo é que a produção seja igual à soma de todas as formas de demandas previstas, com suavização das unidades excedentes na unidade de tempo  $T_a$ , na fração  $(1/T_w)$  da variância nos níveis de estoques dos bens terminados e de uma fração do erro de produtos em andamento WIP”.

O trabalho de Tsyppkin estava relacionado com a transformada de Laplace discreta. Isto é diretamente equivalente para a transformada  $z$ , com uma mudança simples de variável ( $z = e^{j\omega}$ ).

Porém, Tsyppkin preferiu usar o DLT devido à facilidade de puxar analogias entre equações diferenciais e equações de diferença (ou funções de gelosia em terminologia Tsyppkin), e porque teoremas usam freqüentemente observações mais simples na forma de equações de diferenças.

A solução analítica do problema do chicoteamento pode ser dada por

$$Chi\ cot\ eamento = RV_{est} = \frac{\sigma_{out}^2 / \mu_{out}}{\sigma_{in}^2 / \mu_{in}} = \frac{\frac{1}{N_{\mu_{out}}} \sum_{n=0}^N (f_{out}[n] - \mu_{out})^2}{\frac{1}{N_{\mu_{in}}} \sum_{n=0}^N (f_{in}[n] - \mu_{in})^2} \quad (11)$$

Para um sinal de demanda randômico e estacionário  $\mu_{out} = \mu_{in}$  e a equação (11) se reduz

$$Chi\ cot\ eamento = RV_{est} = \frac{\sum_{n=0}^N (f_{out}[n] - \mu_{out})^2}{\sum_{n=0}^N (f_{in}[n] - \mu_{out})^2} \quad (12)$$

Para regime estacionário pode-se arbitrar  $\mu_{out} = \mu_{in} = 0$ , obtendo-se a equação 13.

$$Chi\ cot\ eamento = RV_{est} = \frac{\sum_{n=0}^N f_{out}^2[n]}{\sum_{n=0}^N f_{in}^2[n]} \quad (13)$$

Reescrevendo em transformada  $z$  tem-se a equação 17.

$$Chi\ cot\ eamento = RV_{est} = \frac{\sum_{n=0}^N Z^{-1} \{F^*(z)I(z)\}^2}{\sum_{n=0}^N Z^{-1} \{I(z)\}^2} \quad (14)$$

Simplificando pela definição da transformada z resulta na equação 15.

$$Chi\ cot\ eamento = RV_{est} = \frac{\sum_{n=0}^N Z^{-1} \{F^*(z)\}^2}{\sum_{n=0}^N \delta^2[n]} \quad (15)$$

Na equação (18)  $\delta$  é a função Delta-Kronecker cuja soma é obviamente 1.

Então,

$$Chi\ cot\ eamento = RV_{est} = \sum_{n=0}^N Z^{-1} \{F^*(z)\}^2 = \sum_{n=0}^N f^2[n] \quad (16)$$

Fazendo N tender para  $\infty$  resulta em:

$$Chi\ cot\ eamento = RV_{est} = \sum_{n=0}^{\infty} f^2[n] \quad (17)$$

Partindo da definição do DLT básico, o DLT direto da equação de diferença,  $f[n]$ , denotada por  $F^*(e^{j\omega})$ . Está definido pela equação (18) onde

$$D\{f[n]\} = F^*(q) = \sum_{n=0}^{\infty} e^{-qn} f[n] \quad (18)$$

é mostrado por Tsytkin que a soma das ordenadas de uma função discreta de gelosia é igual ao valor da função de transferência em  $q = 0$ , i.e.:

$$F^*(0) = \lim_{q \rightarrow 0} F^*(q) = \sum_{n=0}^{\infty} f[n] \quad (19)$$

e que a transformada do produto de duas funções de gelosia pode ser calculado da transformada das duas funções de gelosia da maneira mostrada pela equação (20) se condições de convergência satisfatórias existem:

$$D\{f_1[n]f_2[n]\} = \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\pi}^{c+j\pi} F_1^*(s)F_2^*(q-s)ds \quad (20)$$

assim aplicando as equações (19) e (20), a soma do quadrado das ordenadas de um  $f[n]$  de função de gelosia é determinado através da equação (21)

$$\sum_{n=0}^{\infty} f^2[n] = \int_{c-j\pi}^{c+j\pi} F^*(s)F^*(-s)ds \quad (21)$$

Fazendo  $s = j\omega$  e  $c = 0$  na equação (21) tem-se:

$$\sum_{n=0}^{\infty} f^2[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} F^*(j\bar{\omega})F^*(-j\bar{\omega})d\bar{\omega} \quad (22)$$

Ou, desde que,

$$F^*(j\bar{\omega})F^*(-j\bar{\omega}) = |F^*(j\bar{\omega})|^2, \quad (23)$$

Onde se obtém a equação (24)

$$\sum_{n=0}^{\infty} f^2[n] = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |F^*(j\bar{\omega})|^2 d\bar{\omega} \quad (24)$$

ou, em palavras a soma do quadrado das ordenadas de uma função de gelosia é proporcional à área debaixo de seu espectro quadrado. Este relacionamento é chamado de Igualdade de Lyapunov-Parseval. A equação (24) é interessante; pois o termo posterior é proporcional a que engenheiros de controle chamam de largura de faixa de ruído  $W_N$ , explicito na equação (25).

$$\sum_{n=0}^{\infty} f^2[n] = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |F^*(j\bar{\omega})|^2 d\bar{\omega} = \frac{W_N}{\pi} \quad (25)$$

então, o  $W_N/\pi$  também é igual à medida do chicoteamento. Este resultado foi explorado em literatura prévia como em Disney et al. (1997) e explorado e verificado por simulação através de Dejonckheere et al. (2003). A referência posterior também inclui um envolvimento à prova do uso da Transformada de Fourier. Lembrando-se que o DLT é equivalente para a transformada  $z$  por  $z = e^{j\omega}$ , significando que estes resultados serão verdadeiros para a transformada  $z$  como eles têm a mesma definição, conforme mostrado na equação (26).

$$D\{f[n]\} = F^*(q) = \sum_{n=0}^{\infty} e^{-qn} f[n] = \sum_{n=0}^{\infty} z^{-n} f[n] = F(z) \quad (26)$$

Finalmente, o padrão da demanda para um item pode ser derivado da demanda de algum outro item (Balloou, 1999).

Para o desenvolvimento do estudo de caso faz-se necessário verificar se as amostras são normalmente distribuídas. Isto se deve a fato de que a consistência dos resultados depende de amostras normalmente distribuídas (Chatfield, 1996) e (Towill, 1999).

“Este resultado está intuitivamente claro desde que, num padrão de demanda normalmente distribuída, todas as frequências são igualmente apresentadas, por conseguinte, os pesos são idênticos. Este resultado será bastante familiarizado e controlado pelos engenheiros\* (veja, por exemplo, Chatfield, 1996), WN é uma medida direta da variância à produção do filtro desde que para uma entrada de ruído branco aleatório, (Towill, 1999). Ao invés do termo ‘ruído branco aleatório’, usa-se o termo “i.i.d” “demandas normalmente distribuídas”, mas a mesma conclusão pode ser feita, desde que a largura de faixa de ruído seja uma medida direta para a amplificação de variância induzida pela regra de reabastecimento particular sob consideração.”

Demandas normalmente distribuídas têm “poder de igualar a todas as densidades”, ou em outras palavras as amplitudes ao quadrado  $A^2$  são constantes em cima do espectro de frequência inteiro (Chatfield, 1996).

Uma medida de resposta de estoque alternativa que foi usada em recente literatura (Disney et al. 2003) é o Integral do Tempo pelo Erro Absoluto (ITAE) e é definido como segue, a equação (27);

$$ITAE_{I_t} = \sum_{n=0}^{\infty} n|E| \quad (27)$$

Onde  $n$  é o período de tempo e “E” é o erro no nível de estoque medido como a variância de nível de  $I_i$  e do nível de  $I_T$ . Historicamente, o ITAE foi calculado por simulação. Porém, “Tsyppkin” chega a fornecer uma medida analítica nova. Primeiro nota-se que o  $O_i$  só a resposta no domínio do tempo contém condições exponenciais como se esta assumindo que um atraso de tempo é usado para o atraso de produção e assim deve a resposta de  $I_{atual}$ , conclui-se que a resposta de estoque só pode ser negativa. Partindo do DE-APIOPBCS ( DE de Deiziel e Eilon’s),  $I_{atual}$  e da função de transferência e multiplicando pela função degrau de Heaviside (h), a função de transferência do erro absoluto em níveis de estoque é então determinada pela equação (28) para o caso quando

$$T_p = T_p = 3 .$$

$$\frac{I_{atual}}{V_i} = \frac{3 + T_a + T_i + (2 + T_a + T_i)z + (1 + T_a + T_i)z^2 + (1 + T_a)T_i z^2}{(1 + T_i(-1 + z))z^2(T_a(-1 + z) + z)} \quad (28)$$

levando a transformada  $z$  inversa da equação (28), multiplicando até que índice,  $n$ , e tomada a transformada  $z$  do resultado tem-se a equação (29). Isto representa a transformada  $z$  do erro absoluto multiplicada atraso de tempo.

$$TAE^*(z) = z\{nz^{-1} | I_{atual} / V_i |\} = \frac{(2T_a(-1 + T_i)(3 + T_a + T_i) + 9z - (-2T_a(5 + T_a) + (3 + T_a)(2 + 5T_a)T_i + (3 + 5T_a)T_i^2)z + 2(2 + T_a^2 + T_i(5 + T_i) + T_a(3 + 4T_i))z^2 - (-1 + T_a)^2 - 2(1 + T_a)(3 + T_a)T_i + (-2 + T_a^2)T_i^2)z^3 + (1 + T_a)T_i(1 + T_a + T_i)z^4 + (1 + T_a)^2 T_i^2 z^5}{((1 + T_i(-1 + z) + z)^2)} \quad (29)$$

Explorando a equação (29), substituindo  $z = e^{j\omega}$  nessa equação e achando o limite como  $q$  tendendo a zero obtém-se a Eq. (25). Esta expressão algébrica dá a Integral de Tempo pelo Erro Absoluto analiticamente. Notou-se que se  $T_a$  e  $T_i$  são restritos a valores inteiros, o ITAE também é sempre inteiro. Esse é um cruzamento

útil para precisão no cálculo ITAE por simulação. Uma observação adicional de importância é pertinente aqui. Pode-se também achar o limite de equação (29) com  $z$  tendendo para 1, explorando o trabalho de Grubbström (1967 1991). Outra pesquisa interessante emanou de Linköping relativo ao uso de métodos de transformadas como momento de funções probabilísticas geradoras para estudo estocástico emite em cadeias de suprimento, por exemplo, veja Grubbström(1996) ou Tang (1999).

$$ITAE_{latual} = T_a^2(3 + T_i) + T_a(12 + 7T_i + T_i^2) + 2(7 + 6T_i + 2T_i^2)$$

(30)

Isto pode ser verificado na equação (30), que aquelas respostas de estoque mais rápidas são o resultado de valores menores de  $T_a$  e  $T_i$ . Na figura 10 verifica-se isto.

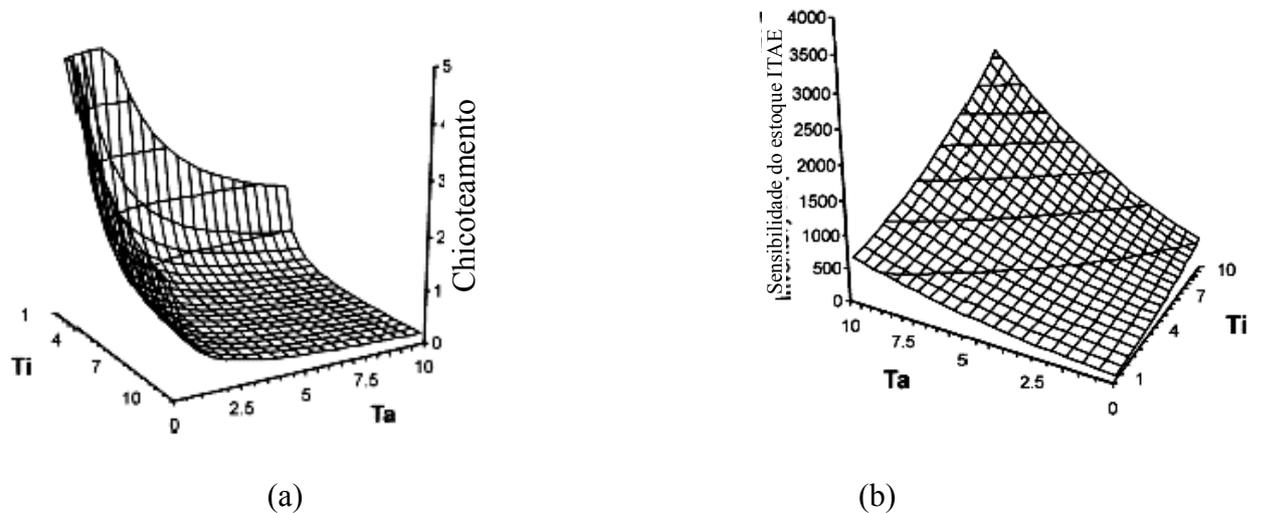


Figura 10 - Chicoteamento e Sensibilidade  
 Fonte: adaptado de Disney& Towill (2001)

Novamente pode ser apreciado que usando equação (30) basta então a simulação para calcular o ITAE que é consideravelmente mais precisa. Porém, para a medida precisa do chicoteamento seria interessante investigar o parâmetro plano  $T_a$  e  $T_i$  voltando na Fig. 10- (a) e (b) e como mostrado na figura 11.

Disney & Towill demonstram inequivocamente o trade-off entre responsabilidade de estoque e chicoteamento. Seria útil manter  $T_p$  não especificado para determinar o ITAE como uma função do lead-time de produção.

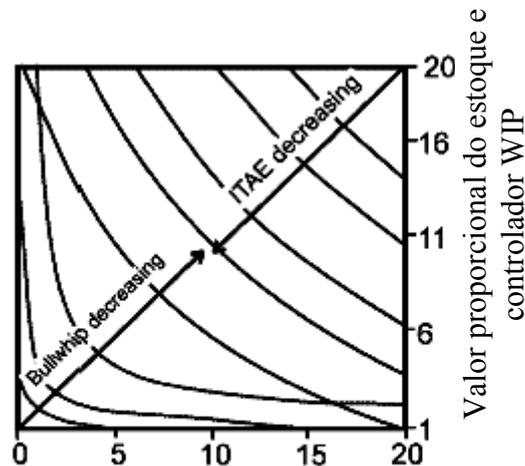


Figura 11- Tempo médio da previsão exponencial  
 — Sensibilidade do estoque — Chicoteamento

Fonte: adaptado de Disney& Towill (2001)

Porém, isto requer a solução de uma equação transcendente que é difícil para se obter. Essencialmente, o problema está devido a ter que aumentar o índice de tempo do erro de tempo absoluto da função de gelosia,  $TAE(n)$  para refletir  $T_p$  antes levando a final transformada  $z$  como o pedido de  $TAE(z)$  é dependente de  $T_p$ .

### 2.12 O impacto de enriquecimento de informação no efeito de Chicoteamento: Uma perspectiva de engenharia de controle

O trabalho de Forrester inspirou muitos autores para desenvolver jogos para demonstrar a amplificação de variabilidade. No Jogo de Cerveja, decisões sobre pedidos têm que ser tomadas em uma cadeia de suprimento que consiste de um varejista, atacadista, distribuidor e uma fábrica. Só interessam os pedidos entrantes. Jogadores do “Jogo de Cerveja” experimentarão que variações muito pequenas em demanda de cliente podem conduzir a um pedido exagerado mais adiante a jusante da cadeia de suprimento.

No processo de sinalização da demanda, entende-se como a prática de ajustar as previsões de demanda e, como resultado desta prática, ajustando os parâmetros do reabastecimento com política de estoques frequentemente. Fazendo isto, talvez diminua também as flutuações reagindo em cima do que induz amplificação da variabilidade. Em outras palavras, a regra de reabastecimento usada pelos elos da cadeia pode ser um fator que irá contribuir para o efeito de chicoteamento. Chen et al. (2000) quantificou o efeito de chicoteamento para políticas de pedidos a montante (OUT) baseadas em previsões suavizadoras exponenciais como também previsões de médias móveis.

Dejonckheere et al. (2003) mostra que para políticas OUT, sempre resulta em amplificação de variabilidade, sem consideração, do método de previsão que é usado e declara isto sem fazer qualquer suposição aproximadamente de padrão de exigência.

O artigo Baga (1995) mostrou que tal amplificação de demanda pode ser restrita pela reengenharia da cadeia de suprimento. Em particular, a importância de projetar a cadeia de acordo com Princípios estabelecidos de Controle de Fluxo Material foi reconhecida (Towill e McCullen, 1999). Para evitar o efeito de chicoteamento, todas as causas deveriam ser eliminadas na fonte. Van Ackere et al. (1993) fornece um embasamento útil para classificar as medidas de contenção para as que podem ser levadas em qualquer cadeia de suprimento e reduza ou evite o efeito de chicoteamento. Eles distinguem três aproximações diferentes:

- (i) Redesenhando o processo físico (como redução de lead time e eliminando um canal na cadeia de suprimento);
- (ii) Redesenhando a informação ao longo do canal (como prover dados de demanda de cliente ao longo da cadeia);

- (iii) Redesenhando o processo de decisão (usando regras de reabastecimento diferente).

Van Ackere, Larsen, e Moorcrofts preocuparam-se com a aproximação à seleção cuidadosa da regra de reabastecimento. Políticas “OUT” são muito populares tanto em pesquisa como em prática desde que elas sejam conhecidas para minimizar estoque de segurança e custos de racionamento, não se preocupando com a variabilidade dos níveis de estoque. A preocupação sempre foi com variabilidade de políticas de pedidos OUT resultando em taxa de amplificação de variabilidade de pedidos.

Quando a produção que tem custos fixos e significantes, ocorrem com trocas freqüentes a montante e a jusante de quantidades de produção, sendo que políticas OUT podem não ser desejável ou até mesmo realizável. Com esta produção (emitindo pedidos) trocando custos podem ser requerido uma grande produção suave ou padrão de pedidos. Este problema é bem conhecido na literatura como problema suavizador da produção e muitas decisões e regras existem e podem evitar chicoteamento, na medida em que reduzem a variabilidade no padrão de demanda. Embora no amaciamento o padrão de demanda possa aumentar os custos de estoque relacionados, a regra de políticas de decisão pode suavizar a performance das políticas OUT em termos de custos totais (estoques de segurança e racionamento mais produção com troca valor de custos). É claro que isto depende da estrutura de custo da cadeia de suprimento levada em consideração.

Disney e Towill (2002) investigaram a ligação entre chicoteamento e variabilidade de estoque em um único escalão de uma cadeia de suprimento.

Todo o reabastecimento foi analisado em dois enfoques. O primeiro enfoque é a cadeia de suprimento tradicional na qual só o varejista tem acesso à demanda de

cliente, da mesma maneira que o Jogo de Cerveja original é jogado. O segundo enfoque é a cadeia de suprimento com informação compartilhada, em que a informação é enriquecida na cadeia de suprimento, depois do trabalho seminal de Mason-Jones (1998).

A diferença entre os dois enfoques é mostrada claramente na Fig.11. A única diferença para a cadeia de suprimento tradicional é que todo sócio de cadeia pode fundar suas previsões agora na demanda de consumidor final (em vez de pedidos que chegam);

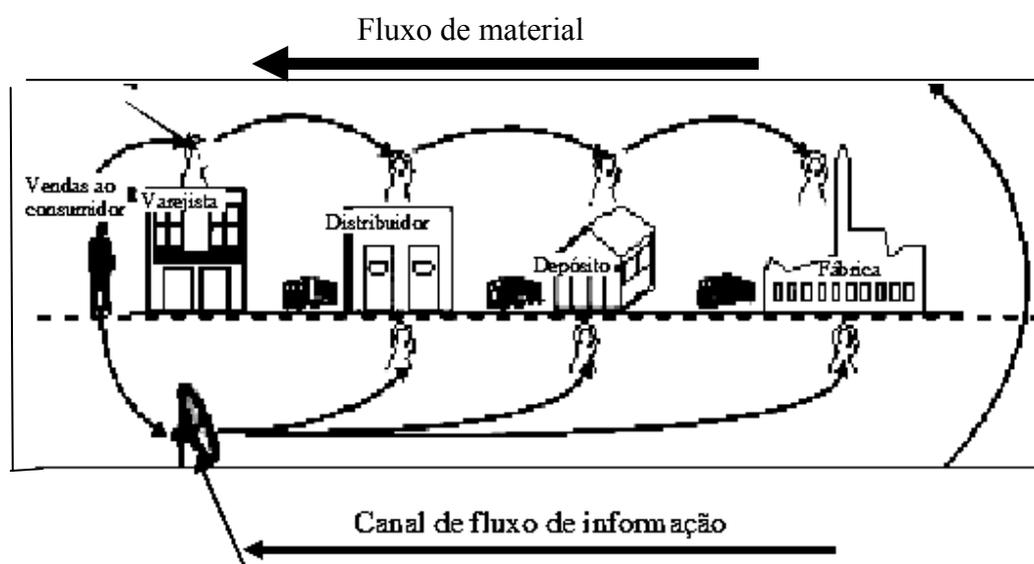


Figura 12 - Cadeia com informação enriquecida  
Adaptado de Dejonckheere et al. (2002)

Nota-se que não se está modelando um Vendedor e Administrador de estoque para uma Cadeia de suprimento, desde então, em nossa informação enriquecida na cadeia de suprimento, toda fase ainda tem que transportar os pedidos emitidos pelo prévio elo da cadeia, i.e. o fornecedor não tem a autoridade (ou a informação de estoque necessária) para entregar bens ao cliente à discrição dele. Para uma análise detalhada de Vendedor e administrador de estoque de cadeia de suprimento, veja

Disney (2001). Para um guia estendido para várias estratégias de enriquecimento de informação, veja Mason-Jones (1998).

Analisou-se para duas classes gerais de regras de reabastecimento: políticas OUT e a regras de decisão suavizadora. Para as duas políticas, foram mostrados os benefícios de informação compartilhada. Quando a política OUT é aplicada dentro uma cadeia de suprimento tradicional multi-nivelada, o efeito de chicoteamento pode ser dramático a níveis mais altos da cadeia.

Três sistemas de previsão são integrados dentro do sistema OUT: suavizador exponencial (Holt, 1957), cálculo da média móvel, e processo de sinalização da demanda vejam (Lee et al., 1997, 2000).

### **2.13 Um método de engenharia de controle com regras para investigar reabastecimento**

A metodologia usada aqui é controle de sistemas criando, complementando com simulação de planilha eletrônica. Foram introduzidos brevemente os conceitos mais importantes e técnicas. (J. Dejonckheere um, S.M. Disney, M.R. Lambrecht, D.R. Towill, 2001).

Desde que cadeias de suprimentos possam ser vistas como um sistema, com interações complexas entre partes diferentes da cadeia, nós podemos usar uma aproximação de função de transferência para modelar estas interações. Para toda regra de reabastecimento, será desenvolvida uma função de transferência que represente completamente a dinâmica de uma regra de reabastecimento particular, introduzindo ao sistema que corresponde ao padrão de demanda e a produção, recorrendo-se a um reabastecimento correspondente ou a pedidos de produção. Para maiores detalhes em engenharia de controle e função de transferência recorre-se à literatura apropriada, Nise (1995) fornece uma boa introdução. Dejonckheere et al. (2003) mostra como a

função de transferência pode ser obtida construindo um diagrama de volta causal e um diagrama para a regra de reabastecimento sob certas considerações. Para uma avaliação histórica de usar a transformada Z em produção e aplicações de controle de estoque recorre-se a Disney (2001).

A utilização de engenharia de controle no planejamento e controle de estoque é fundamentada nos 3 passos abaixo:

Sejam  $W_N$  a largura de faixa de ruído (faixa de frequência em que a variabilidade da demanda é aproximadamente constante ou lóbulo central da função) e RP a resposta em frequência.

- Obter a função de transferência da regra de reabastecimento sob uma dada consideração. Isto é determinado buscando primeiro no diagrama de bloco da regra de reabastecimento.

- Obter o gráfico de Resposta em frequência (RP). O gráfico de RP dá uma valiosa contribuição no conhecimento dinâmico do reabastecimento sob certas regras de consideração (chicoteamento ou amaciamento) sem fazer qualquer suposição no padrão de demanda.

- Cálculo de  $W_N / \pi$ . Esta medida quantifica a magnitude da relação de variabilidade (variância de saída/variância de entrada) quando a regra de reabastecimento é aplicada a padrões de demanda normalmente distribuída do consumidor final. Se  $(W_N / \pi) > 1$ , a regra de reabastecimento induz chicoteamento, se  $(W_N / \pi) < 1$ , a regra de reabastecimento suavizam a variabilidade de pedidos.

- Enriquecimento de informação em pedidos para políticas OUT (out-up-to) ou pedidos cadeia acima considera uma cadeia de suprimento simples que consiste em um varejista, distribuidor, uma fabrica e um fornecedor (J. Dejonckheere et al).

Obs: ( $W_N$  é a largura de faixa de ruído que em logística é um parâmetro importante na medida do chicoteamento).

$$W_N = \int_0^\pi |F(j\omega)|^2 d\omega \quad (31)$$

onde  $F(j\omega)$  é a resposta de estado-estável e  $\omega$  é a frequência de excitação ou frequência em que as demandas entram no sistema (equação 31). Para valores razoáveis de função de transferência  $W_N$  pode ser calculado diretamente de formula e baseado no Teorema de Parseval.

A idéia de que todo sistema (inclusive todo sistema de pedidos) pode ser tratado como “filtro”, não é nova. Porém, o conceito só foi aplicado dentro o contexto de cadeia de suprimento em recentes anos. Assim, algumas conclusões surpreendentemente simples podem ser tiradas, inclusive a predição de sistema de chicoteamento induzido que emana de descoberta de tendência com suavizadores exponenciais como no caso de passar pedidos à montante (J. Dejonckheere, S.M. Disney, M.R. Lambrecht, D.R. Towill, 2000).

A aproximação de função de transferência é poderosa por muitas razões. Estas incluem a habilidade para predizer comportamento de sistema no domínio do tempo e da frequência, e a pronta classificação de sistemas da vida real em vários modelos padrões. O método de classificação nos permite transferir boa prática entre muitos tipos de aplicações de sistemas como controles de poder hidráulico; perseguidores de radar; sistemas de pouso de aeronaves; filtros de “ruídos”; sistemas de controle de ferramenta elétrica; e sistemas de estoque. Conseqüentemente um bom modelo de avaliação de um sistema é dado no formato da Equação (32).

$$F(s) = k \left( \frac{1 + b_1s + b_2s^2 + \dots + b_qs^q}{1 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_ps^p} \right). \quad (32)$$

onde os coeficientes “a” e “b” são constantes que podem ser obtidas pela característica de cada sistema analisado e k depende do tipo de demanda na entrada. A equação (32) ser explorada em um bom padrão garantido de modelo de sistema robusto. Também é incorporado prontamente em pacotes de CAD pertinente para uma gama extensiva de aplicações industriais que constroem assim sobre melhor prática conhecida. Doravante, para Modelo constante pode-se ler “Tipo I” (equação 33); para Modelo Linear lê-se “Tipo II” (equação 34); e para o Modelo Quadrático ler “Tipo III” (equação 35).

$$F_I(s) = \left( \frac{1}{1 + \tau s} \right) \quad (33)$$

$$F_{II} = \left( \frac{1 + 2\tau s}{1 + 2\tau s + \tau^2 s^2} \right) \quad (34)$$

$$F_{III} = \left( \frac{1 + 3\tau s + 3\tau^2 s^2}{1 + 3\tau s + 3\tau^2 s^2 + \tau^3 s^3} \right) \quad (35)$$

Obter o equivalente suavizador exponencial para  $F(s)_I$ ;  $F(s)_{II}$ ; e  $F(s)_{III}$ , basta fazer réplica do diagrama de blocos, esquematização e manipulações e substituir  $F(s)$  pelo algoritmo suavizador exponencial básico  $ES(\alpha)$  como mostrado na equação 36. Aqui o suavizador exponencial é expresso em termos do operador de atraso  $z^{-1}$  na equação (36):

$$ES(\alpha) = \left( \frac{\widehat{Y}}{Y_{obs}} \right) = \left( \frac{\alpha}{1 - (1 - \alpha)z^{-1}} \right) \quad (36)$$

onde o fator de conversão entre  $\alpha$  e  $\tau$  é determinado antes pela equação (37)

$$\alpha = \left( \frac{1}{1 + (\tau / \Delta t)} \right) \quad (37)$$

## 2.14 Enriquecimento de informação em pedido para políticas OUT

No caso tradicional, assume-se em pedidos as seguintes etapas: em cada período  $t$ , o varejista recebe produtos primeiro, então a demanda de cliente  $D_t$  é observada e é satisfeita; logo, o varejista observa o novo nível de estoque e emite um pedido  $O_t^{dist}$  para o distribuidor. O distribuidor recebe o pedido imediatamente no período  $t$ ; mas diferente do Jogo de Cerveja, não há nenhuma demora de emissão de pedido. O distribuidor também recebe produtos, cumpre o pedido do varejista, e emite um pedido  $O_t^{dist}$  para o atacadista.

O atacadista recebe o pedido imediatamente e o processo continua até que o atacadista faz seus pedidos à fábrica. Qualquer demanda não atendida é acumulada no modelo. Há um lead time fixo entre o tempo em que um pedido é feito em uma fase  $i$  e quando é recebido naquela fase, tal que um pedido colocado ao término de período  $t$  é recebida ao começo do período  $t + L$  onde  $L = T_p + 1$  onde  $T_p$  é o tempo de processamento físico. No caso da informação-enriquecida, permanece tudo o mesmo, exclui o fato que toda fase na cadeia em qualquer período não só recebe um pedido do elo a jusante da cadeia, mas também eles recebem a demanda de consumidor final para o período atual. Esta demanda de consumidor final pode ser usada para previsão. Claro que, os bens ainda pedidos pelo elo à jusante têm que ser transportados à jusante. Aqui serão integrados três sistemas prevendo internamente diferentes políticas OUT: média móvel, suavizador exponencial e processo de sinalização da demanda.

## 2.15 Usando amaciamento exponencial na previsão dentro de políticas OUT

Em qualquer política OUT, decisões de pedidos são como segue na equação(38):

$$O_t = S_t - \text{posição do estoque} \quad (38)$$

onde  $O_t$  é a decisão de pedido feita ao término de período  $t$ ,  $S_t$  é o nível OUT usado no período  $t$  e a posição do estoque iguala vantagem de ação líquida em pedido (ou WIP), e ação líquida iguala estoque disponível menos reserva. O nível OUT de todo o período é atualizado de acordo com a equação (39)

$$S_t = \hat{D}_t^L + k\hat{\sigma}_t^L \quad (39)$$

onde  $S_t$  é uma estimativa de demanda média em cima de períodos de  $L$  ( $\hat{D}_t^L = L\hat{D}_t^L$ ),  $\hat{\sigma}_t^L$  é uma estimativa do desvio padrão da demanda no período  $L$  ( $\hat{\sigma}_t^L = L\hat{\sigma}_t^L$ ), e  $\hat{\sigma}_t^L$  é uma constante escolhida para conhecer um nível de serviço desejado. Para simplificar a análise, se fixa  $k$  igual a zero e aumenta-se o lead time anterior de um. Políticas desta forma são freqüentemente usadas na prática: o valor de  $L$  é aumentado e o estoque extra, representa a ação de segurança. Adicionalmente,  $L$  é aumentado de um para assegurar o pedido correto. Por exemplo, o estoque é recebido e a demanda é satisfeita ao longo do período de planejamento e ao término do período de planejamento observa-se o estoque e fazemos um pedido. Assim, até mesmo se o lead time de produção/distribuição for zero, não se aparece na decisão de pedido até o fim do próximo período de planejamento. Conseqüentemente,  $L$  inclui um pedido nominal de demora de atendimento. Em outras palavras  $L$  não só representa o lead time físico, mas também um lead time de segurança e uma demora de atendimento de pedidos. Assim nós temos  $L = T_p + 2$ , onde  $T_p$  é o lead time da produção física/distribuição. Aqui, foi usado amaciamento exponencial simples para prever demanda. A fórmula para amaciador exponencial simples é explicitada pela equação (40):

$$\hat{D}_t = \hat{D}_{t-1} + \alpha(D_t - \hat{D}_{t-1}) \text{ ou } \hat{D}_t = \alpha D_t + (1 - \alpha)\hat{D}_{t-1} \quad (40)$$

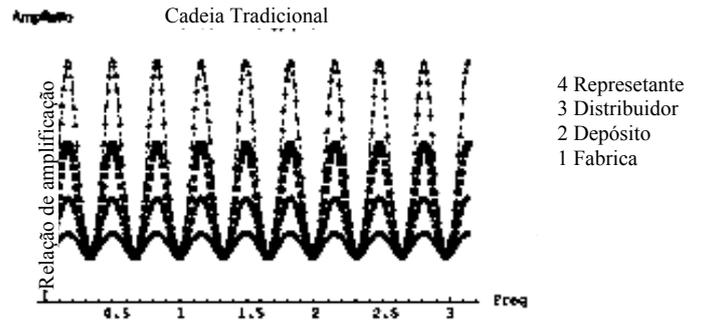
## 2.16 Usando média móvel para previsão dentro para políticas OUT

Foi usada política OUT descrita anteriormente, mas agora com uma média móvel que prevê procedimento OUT com atualização de níveis St. A previsão de demanda no período t,  $\hat{D}_t$ , como está definido na equação (41);

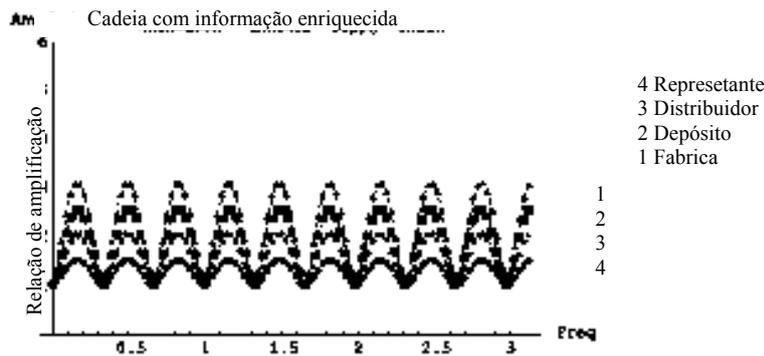
$$\hat{D}_t = \frac{\sum_{m=0}^{T_m-1} D_{t-m}}{T_m} \quad (41)$$

Esta política em uma única cadeia de suprimento nivelada é analisada em Dejonckheere et al. (2003). A análise foi estendida agora para cadeias de suprimentos de multi-nível. Teve-se que repetir o procedimento de três passos então, análogo ao anterior, em pedido para análise dos benefícios de informação compartilhada no efeito de chicoteamento. Para as funções de transferência (passo 1 do procedimento), recorre-se ao Anexo 1. O diagrama de bloco que permite derivar as funções de transferência de multi-nível é determinado no Anexo 2. As funções de transferência são bastante simples e elegantes, até mesmo para níveis mais altos na cadeia de suprimento. Pode-se agora plotar imediatamente o gráfico da FRs para ambos os casos e para um caso ilustrativo todos os quatro elos têm  $L = T_p + 1 = 4$  e  $T_m = 19$  (passo 2), e também as previsões de relação de variabilidade para ambos os casos em nossa cadeia de suprimento de 4 níveis (passo 3).

As conclusões são completamente semelhantes para as Políticas OUT baseadas em suavizador exponencial de previsão analisado anteriormente. Ainda tem-se o chicoteamento a todos os níveis da cadeia de suprimento e o aumento de relação de variabilidade com o nível na cadeia. Porém, pode ser visto nas figuras (13-a e 13-b) e tabela 4 que a informação compartilhada pode reduzir significativamente o aumento em amplificação de variabilidade a níveis mais altos da cadeia.



(a)



(b)

Figura 13 - Redução da distorção  
Fonte: adaptado Dejonckheere et al. (2003)

## 2.17 Usando “sinalização da demanda” para previsão dentro de Políticas OUT

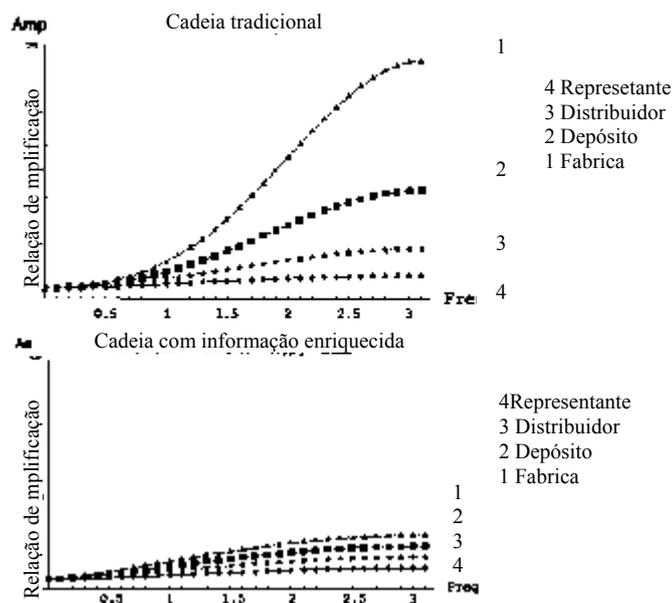
Consideram a política de estoque seguinte:

$$S_t = S_{t-1} + \gamma(D_t - D_{t-1}), \text{ e } O_t = S_t - \text{posição do estoque} \quad (42)$$

onde  $O_t$  é a decisão de pedidos feita ao término de período  $t$ ,  $S_t$  ( $S_{t-1}$ ) é o nível ao término de período  $t$  ( $t-1$ ),  $D_t$  ( $D_{t-1}$ ), é a demanda observada durante período  $t$  ( $t-1$ ) e  $\gamma$  é o fator de sinalização que é uma constante entre zero e um (equação 42). Ainda tem-se uma Política OUT, mas o nível OUT de toda tabela é atualizado a cada período usando a informação de demanda mais recentemente observada. São chamados estes tipos de políticas de processo de sinalização da demanda por Lee et al. (1997). Para  $\gamma = 1$ , é uma política real intuitiva, freqüentemente usada por jogadores do Jogo de

Cerveja. Se o varejista experimentar uma onda de demanda em um período, será interpretado como um sinal de demanda de futuro alto e um pedido maior será colocado. O comportamento desta política em uma cadeia de suprimento nivelada foi examinado em Dejonckheere et al. (2003). A política se mostrou capaz de gerar chicoteamento de grande amplitude. Nós repetiremos o procedimento de três passos novamente para a política de sinalização de demanda em uma cadeia de suprimento de multi-nível. O diagrama de bloco encontra-se no Anexo 2. Do diagrama de bloco, as funções de transferência de multi-nível (passo 1) foram derivadas. Elas são apresentadas no Anexo 1 e 3. Com as funções de transferência, a RF pode ser facilmente plotada (passo 2) e as larguras de faixa do ruído podem ser calculadas (passo 3) para nossa cadeia de suprimento de multi-nível em ambos os casos tradicional e o informação-enriquecida. Isto é mostrado nas figura 14 sinalizando para um fator sinal ilustrativo  $\gamma = 0,6$ .

Como pode ser visto na figura (14), esta política gera alto chicoteamento para todos os níveis e em ambos os casos.



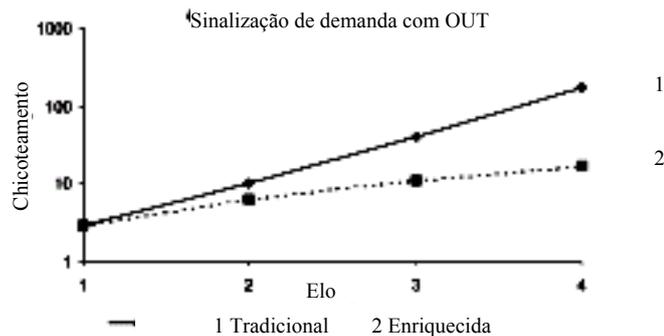


Figura 14 – Sinalização e Amplificação da demanda  
 Fonte: adaptado de Dejonckheere et al. (2003)

Em todos os casos, há um excesso para todas as frequências diferentes e o excesso aumenta proporcionalmente com frequência. Isto está intuitivamente claro desde que se use as duas mais recentes observações de demanda sem que esta curta incursão implique em flutuações correspondentes a sinais de altas frequências (figura 14).

Informação compartilhada reduz significativamente o aumento no chicoteamento. Na cadeia tradicional, a relação de variabilidade está do nível quatro até 172; com informação compartilhada, isto é reduzido a 17, assim abaixou dez vezes.

Note que se tem uma escala log no eixo de Y da Fig.14. Com a escala normal, teria-se novamente um aumento geométrico contra um aumento aproximadamente linear no chicoteamento para os dois casos diferentes. As previsões são novamente muito perto dos resultados simulados como pode ser visto na tabela 2.

Verificação por engenharia de controle com previsão baseada por processo de sinalização para política OUT com simulação

Elo	Cadeia tradicional				Cadeia com informação enriquecida			
	1	2	3	4	1	2	3	4
a) teoria de controle	2.92	10.37	41.044	172.09	2.92	6.28	11.08	17.32
b) simulação	2.939	10.498	41.729	175.5	2.939	6.346	11.257	17.748
% GAP a-b	0.66	1.24	1.67	1.98	0.66	1.06	1.6	2.47
Média GAP a-b			1.39%				1.45%	

Tabela 2 – Previsões para políticas OUT  
 Fonte: adaptado de Dejonckheere et al. (2003).

## 2.18 Conclusões para políticas OUT

Foram analisados os três tipos de políticas: Políticas OUT com previsões suavizadoras exponenciais, Políticas OUT com previsões de médias móveis, e sinalização da demanda em Políticas OUT. Para as três políticas, foram aplicadas as aproximações em três passos explicadas anteriormente. Primeiro, para todas as políticas, pode-se derivar as funções de transferência de multi-nível para a cadeia de suprimento tradicional e as informações enriquecidas na cadeia de suprimento. As funções de transferência são muito simples, até mesmo para escalões mais altos na cadeia de suprimento. Segundo, foram construídos os gráficos das FRs e terceiro, foram computadas previsões de relação de variabilidade ( $WN/\pi$ ) sob as três políticas para ambos os casos. À luz da engenharia de controle foram verificadas previsões por simulação e se mostraram serem muito precisas.

Para a política de previsão de média móvel, as previsões eram idênticas com saltos estatísticos encontrados na literatura. Para as três políticas, poderiam ser feitas as mesmas conclusões. Em um caso tradicional, chicoteamento aumenta geometricamente com o nível na cadeia e se põe grande e inquietantemente a escalões mais altos na cadeia de suprimento. Informação compartilhada é reduzir o aumento significativamente em chicoteamento; o aumento em agora linear como os pedidos procedem a montante da cadeia. Porém, chicoteamento não é eliminado com informação compartilhada. Ainda há chicoteamento a todos os níveis na cadeia, e a relação de variabilidade ainda aumenta com o nível na cadeia.

Nota que foram confirmados alguns resultados encontrados na literatura (Chen et al., 2000) e estendem a outros. Uma primeira extensão é o fato que nesta aproximação, são permitidos para os diferentes elos na cadeia usar parâmetros

diferentes de previsão. Secundariamente, pode-se fazer conclusões interessantes baseada na RF (passo 2) sem ter que fazer qualquer suposição no padrão de demanda.

## **2.19 Informações compartilhadas com uma regra de reabastecimento suavizadora**

Políticas OUT parecem que inevitavelmente resultam em um efeito de chicoteamento quando a demanda tiver que ser prevista. Até mesmo com informação compartilhada, chicoteamento ainda aumenta com o nível na cadeia. Nesta seção foi analisada uma regra de decisão geral que não tem esta desvantagem. Foi explicados a regra de decisão suavizadora primeiro analiticamente na análise da regra em uma cadeia de suprimento de multi-nível para ambos os casos com o procedimento de três-passos, explicado anteriormente. Esta regra de decisão é uma extensão natural dos estoques e pedidos, fundamentada no controle de produção de um modelo de sistema introduzido por Towill, (1982) em Oleoduto Automático, estoque e a criação do Sistema de Controle de Produção (APIOBPCS) devido a John et al. (1994). Disney et al. (1997), Disney e Towill (2001).

## **2.20 A regra de decisão**

A quantidade de pedidos no período t,  $O_t$ , é determinada pela equação (43).

$$O_t = \hat{D}_t^{T_a} + \frac{1}{T_a}(TNS_t - NS_t) + \frac{1}{T_w}(DWIP_t - WIP_t), \quad (43)$$

onde  $\hat{D}_t^{T_a}$  é a previsão de demanda que usa amaciador exponencial simples com parâmetro  $T_a$ ,  $TNS_t$  um nível de estoque líquido designado,  $NS_t$  é a ação líquida atual em período t,  $DWIP_t$  é o WIP nível desejado, e  $WIP_t$  é finalmente em curso o trabalho atual (ou em pedido) posição no período t.  $TNS_t$  é o nível de estoque líquido designado, semelhante à ação de segurança em Políticas OUT. É atualizado todo período de acordo com a previsão de demanda nova e iguala  $\hat{D}_t^{T_a}$ .  $DWIP_t$  é atualizado

todo período como bem,  $DWIP_t = (L - 1) \hat{D}_t^{T_a}$ . Nota que se tem  $(L - 1)$  pedido em  
WIP quando o lead time é  $L$  devido a emissão de nosso pedido: a decisão de emitirem  
pedidos é tomada ao término do período e antes do tempo que um pedido já atendido  
ao término do WIP.  $T_a$ ,  $T_n$  e  $T_w$  são os parâmetros fundamentais ou controladores  
que regem a decisão. A política pode ser descrita em palavras como quantidade  
pedida é fixa e igual para a soma de demandas previstas, uma fração  $(1/T_n)$  da  
variabilidade de bens acabados no caso em ação e uma fração  $(1=Tw)$  de nossa  
variabilidade de posição de em pedido.

## 2.21 Relação com Políticas OUT

Antes de se obter a função de transferência, é importante ver a diferença entre  
política acima e uma Política OUT. Define-se a Política OUT como segue na equação  
(44):

$$O_t = \hat{D}_t^{T_a} + k\hat{\sigma}_t^L - \text{posição do estoque} \quad (44)$$

Para simplicidade, na equação (43) se fixa  $k = 0$  e aumenta-se o lead time  $L$   
através de um período. Posição de estoque iguala  $(NS) +$  produtos líquidos em  $(WIP)$   
de pedido. Nós então sucessivamente obtemos na equação (45):

$$\begin{aligned} O_t &= (L + 1)\hat{D}_t^{T_a} - NS_t - WIP_t, \\ O_t &= \hat{D}_t^{T_a} + (\hat{D}_t^{T_a} - NS_t) + ((L - 1)\hat{D}_t^{T_a} - WIP_t), \\ O_t &= \hat{D}_t^{T_a} + (TNS_t - NS_t) + (DWIP_t - WIP_t) \end{aligned} \quad (45)$$

Assim pode ser completamente análogo à regra suavizadora apresentada com  
parâmetros  $T_n = T_w = 1$ . Em uma política OUT, a quantidade de pedidos é uma  
adição da previsão de demanda, uma variabilidade de ação líquida (ou erro) e um  
termo de variabilidade WIP, mas a ação líquida e erros de WIP são completamente  
levados em conta. Esta é a diferença fundamental com regra de decisão usada na qual

os erros são incluídos só fracionalmente. Estes ajustes fracionários serão exatamente a razão por que a regra de decisão poderá gerar padrões de pedidos suaves. Outra diferença é isso na regra de decisão suavizadora, tem-se duas avaliações separadas que fecha o cerco (um para a ação líquida e um para o WIP), considerando que em uma Política OUT, há só uma volta de avaliação em comum para a posição do estoque.

No início, estas são diferenças pequenas, mas o impacto é dramático. Notar que a regra de decisão apresentada acima é uma regra muito geral. Para este trabalho, é usado o suavizador exponencial para prever demanda, mas é óbvio que outros métodos de previsão podem ser usados dentro da regra. Um leitor astuto observará isso facilmente que Políticas OUT é de fato um caso especial de nossa regra geral, isto é o caso  $T_n = T_w = 1$ .

## 2.22 O comportamento suavizador da regra para um único nível cadeia de suprimento

Dejonckheere et al. (2003) mostrou que para um único nível da cadeia de suprimento (só um elo de cadeia (por exemplo, o varejista) tem que tomar decisões de pedido) a função de transferência é dada pela equação (46):

$$F(z) = \frac{O}{D} = \frac{z^{1+T_p}(-(1+T_a)T_w + T_n(T_p + T_w)(-1+z) + (2+T_a)T_w z)}{(T_a(-1+z) + z)(T_w + T_n(-1 + (1+T_w(-1+z))z^{T_p}))} \quad (46)$$

Dejonckheere et al. (2003) mostrou que esta regra de decisão é capaz de gerar padrões de pedidos suaves. Para um parâmetro ilustrativo que fixa  $T_a = 8$ ,  $T_n = 4$ ,  $T_w = 4$ , (posteriormente denotou o parâmetro que fixa (8/4/4)), quando aplicado para demandas normalmente distribuídas a regra de decisão reduzirá a variabilidade de demanda até aproximadamente um terço. Embora ainda haja alguns excedentes

moderados a algumas baixas frequências, isto é compensado filtrando fora da gama mais alta do espectro de frequência. A meta desta seção é estender a análise a cadeias de suprimento de multi-elos para ambos os modelos de cadeia de suprimento, tradicional e o com informação enriquecida. Na análise foi seguido o procedimento proposto de três passos.

Passo 1. Obter a função de transferência. Para o caso de cadeia de suprimento tradicional, é então a função de transferência geral para n níveis como segue na equação (47):

$$TF_n = \frac{O_n}{D} = \prod_{j=1}^n \frac{z^{1+T_{p_j}}((-1 - T_{a_j})T_{w_j} + z(2 + T_{a_j})T_{w_j} + (-1 + z)T_{i_j}(T_{p_j} + T_{w_j}))}{(z + (-1 + z)T_{a_j})(T_{w_j} + T_{i_j}(-1 + z^{T_{p_j}}(1 + (-1 + z)T_{w_j})))} \quad (47)$$

Quando todos os elos de cadeia de suprimento usam o mesmo parâmetro para avaliar e o lead times é o mesmo, então as funções de transferência podem ser simplificadas na equação (48):

$$TF_n = \frac{O_n}{D} = \left( \frac{z^{1+T_p}((-1 - T_a)T_w + T_i(T_p + T_w)(-1 + z) + (2 + T_a)T_w z)}{(T_a(-1 + z) + z)(T_w + T_i(-1 + (1 + T_w(-1 + z))z^{T_p}))} \right)^n \quad (48)$$

Em seguida, para o caso de informação-enriquecida, a função de transferência geral (veja anexo 2 para o diagrama de bloco) para n níveis pode ser expressa por:

$$TF_n = \frac{O_n}{D} = \frac{z^{1+T_{p_n}}((-1 + z)T_{a_n}(T_{p_n} + T_{w_n}) + (T_{w_n}(-1 + z + (z + (-1 + z)T_{a_n})X_n))}{(z + (-1 + z)T_{a_n})(T_{w_n} + T_{i_n}(-1 + z^{T_{p_n}}(-1 + z^{T_{p_n}}(1 + (-1 + z)T_{w_n})))} \quad (49)$$

Onde  $n = 1 : X_1 = 1, \forall n = 2, \dots, \infty X_n = TF_{n-1}$ . Finalmente, para o caso informação-enriquecida, e com todo o elo de cadeia de suprimento usando os mesmos parâmetros e tendo o mesmo lead time, tem-se a equação (50):

$$TF_n = \frac{O_n}{D} = \frac{z^{1+T_p}((-1 + z)T_n(T_p + T_w) + (T_w(-1 + z + (z + (-1 + z)T_a)X_n))}{(z + (-1 + z)T_a)(T_w + T_n(-1 + z^{T_p}(-1 + z^{T_p}(1 + (-1 + z)T_w)))} \quad (50)$$

Onde  $n = 1 : X_1 = 1, \forall n = 2 \dots, \alpha X_n = TF_{n-1}$ , variáveis pertinentes à equação (50).

Passo 2. Construir o gráfico da FR. Usando as funções de transferência, constrói-se o gráfico da FR para um caso ilustrativo onde todos os lead time são iguais a 3 o tempo em toda a cadeia de suprimento e os elos usam o parâmetros fixos (8/4/4) veja figura. (15).

Na figura 15, vê-se a dinâmica da regra de amaciamento usada na cadeia de suprimento tradicional. O excedente às baixas frequências aumenta muito para níveis mais altos na cadeia de suprimento. Isto significa que não se pode assegurar se a decisão reduzirá ou não a variabilidade de pedidos a esses níveis. No gráfico da figura 15 são mostrados os benefícios de informação compartilhada; a FR permanece mais idêntica a níveis mais altos na cadeia. Este é um resultado muito desejável, porque significa que se pode manter a variabilidade de pedido aceitavelmente baixo ao longo da cadeia.

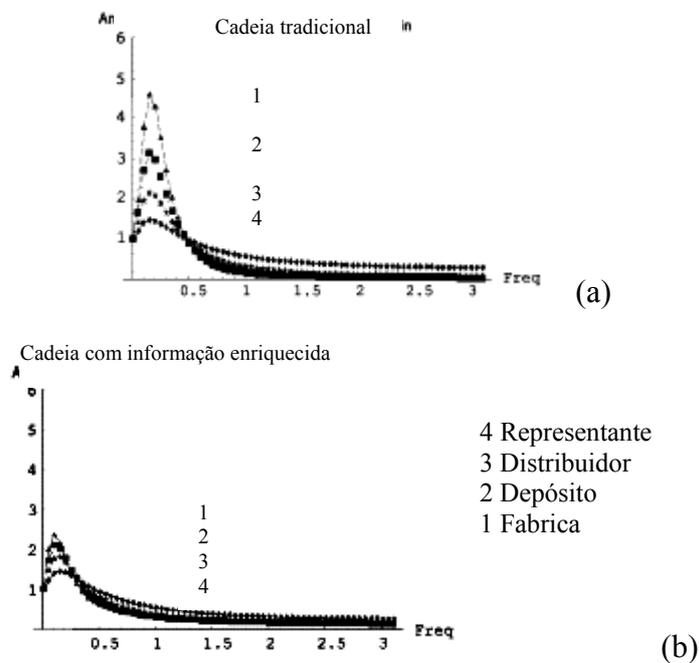


Figura 15 - Relações de Amplificação  
 Fonte: adaptado de Dejonckheere et al. (2003)

Passo 3. A largura de faixa do ruído.

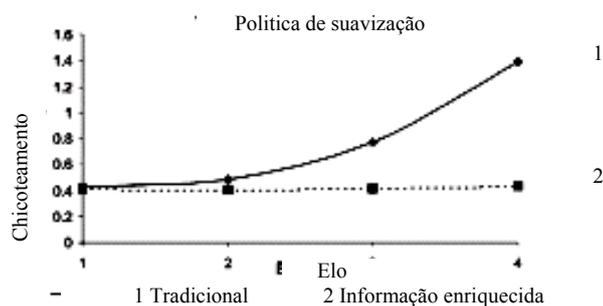


Figura 16 - Suavizador Exponencial  
Fonte: adaptado de Dejonckheere et al. (2003)

Finalmente, computando  $WN/\pi$  para uma cadeia de suprimento de quatro níveis em ambos casos. Os resultados são determinados na figura (16).

A figura (16) mostra as relações de variabilidade para parâmetros fixos (8/4/4) a todos os níveis na cadeia. Pode-se ver que aquela informação compartilhada claramente é essencial para assegurar demanda suavizada, sinalizada ao longo da cadeia de suprimento tradicional, de quatro níveis progressivos, a regra de decisão não reduziria variabilidade mais e na verdade criará chicoteamento. Nota que a seleção dos parâmetros não é o objetivo deste trabalho, para isto ver Disney et al. (1997) e Disney e Towill (2001b). Claro que, uma maior ou menor redução de variabilidade poderia ser obtida selecionando outros parâmetros. Neste trabalho, deseja-se enfatizar a dinâmica da regra de decisão em cadeias de suprimento de multi-nível: informação compartilhada ajuda evitar amplificação de variabilidade a níveis mais altos na cadeia. Finalmente, também para esta regra de decisão, cruza-se as relações das variabilidades da engenharia de controle e previsões com simulação de planilha eletrônica. Os resultados são resumidos nas tabela 3.

Elo	Cadeia tradicional				Cadeia de suprimento com informação enriquecida			
	1	2	3	4	1	2	3	4
a) Teoria de Controle	0.423	0.4828	0.773	1.376	0.423	0.407	0.42	0.434
b) Resultado de simulação	0.432	0.493	0.787	1.398	0.432	0.417	0.433	0.45
% GAP a-b	2.07	2.15	1.84	1.68	2.07	2.48	2.99	3.72
Média GAP a-b	1.94%				2.82%			

Tabela 3 - Resultados  
Fonte: adaptado de Dejonckheere et al. (2003).

Confirma-se novamente que o  $WN/\pi$  é uma ferramenta muito precisa para predizer relações de variabilidade para demandas normalmente distribuídas.

Notar que expressões de forma completamente gerais têm que ser ainda determinadas em alguns casos, mas as informações enriqueceram a cadeia de suprimento e são normalmente tratáveis, sendo que a cadeia de suprimento tradicional fechou formas envolvendo equações transcendentais tendo ainda que achar soluções genéricas. Em tais casos foram produzidos os gráficos e resultados apresentados neste trabalho pela equação (31). (Ver anexo 1)

Aqui foram mostrados os benefícios de compartilhar informações da demanda do cliente final ao longo de uma cadeia de suprimento de multi-nível. Comparou-se uma tradicional (descentralizada) com a cadeia de suprimento com informação enriquecida (centralizada) para duas classes de regras de reabastecimento: Políticas OUT e políticas suavizadoras. A metodologia baseou-se em sistemas de engenharia de controle. Usou-se um procedimento de três passos com análise de todas as regras de reabastecimento que são tratadas no trabalho: primeiro, a função de transferência é derivada, segundo, a FR é plotada, e finalmente, a largura de faixa do ruído é calculada. Baseado no na  $W_N$ , pode-se predizer a magnitude de aumento de variabilidade (ou diminuição) para demandas normalmente distribuídas.

As predições foram verificadas por simulação, e comparou com resultados de análise estatística, disponíveis na literatura, e elas têm provado ser muito precisas.

Políticas OUT são freqüentemente usadas ambas em prática e em pesquisa porque elas são conhecidas para minimizar o estoque e custos de escassez. Porém, como mostrado, elas têm algumas desvantagens sérias. Integram-se três tipos de previsão dentro do sistema OUT (média móvel, suavizador exponencial, e processo de sinalização da demanda) e todos eles criaram amplificação de variabilidade ou chicoteamento. Na cadeia de suprimento tradicional, todo método de previsão que era usado, a magnitude dos aumentos é geométrica no chicoteamento a montante na cadeia de suprimento. Informação compartilhada é muito benéfica, se não indispensável, desde então para Políticas OUT, pode ser reduzida a magnitude de chicoteamento significativamente por níveis mais altos na cadeia. Mais especificamente, o aumento de chicoteamento geralmente será de uma natureza linear com o nível na cadeia em vez de para as cadeias de suprimento com enriquecimento de informação, geométrico.

Porém, o chicoteamento não pode ser completamente eliminado por informação compartilhada: ainda há amplificação de variabilidade a todos os níveis, e a magnitude de amplificação ainda aumenta cadeia acima. Conseqüentemente se a produção é tal que os custos inflexíveis e significantes são envolvidos flutuando seguindo taxas de pedidos, políticas OUT podem não ser uma boa solução (Ver anexos 2 e 3).

## CAPÍTULO 3

### 3.1 Modelagem de uma cadeia de suprimento

Seja o diagrama:

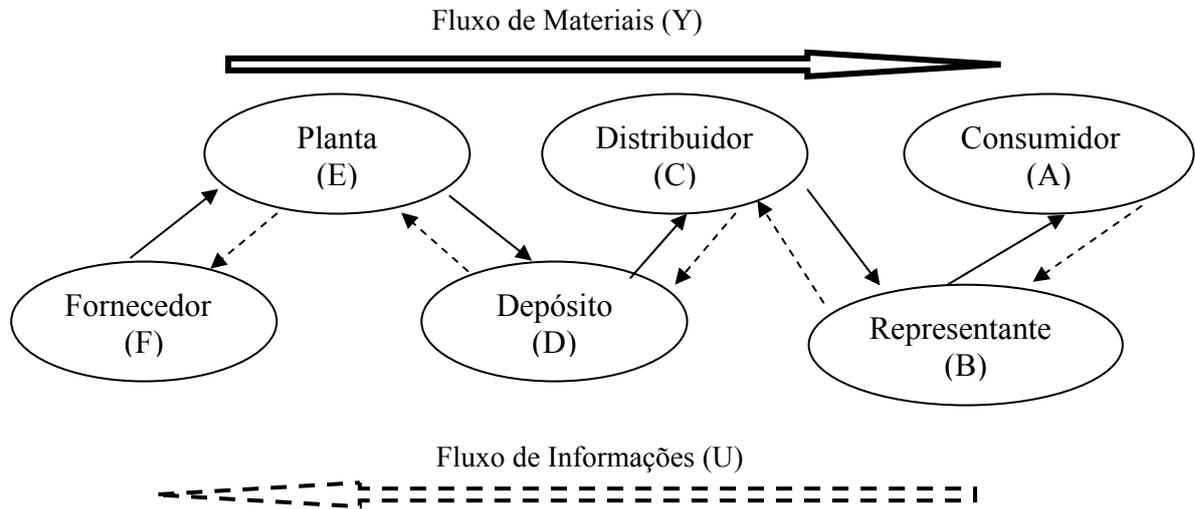


Figura 17 – Cadeia de Suprimento  
Fonte: Pim Ho Lin (2003)

Sejam:

- $ij \in \{ED, DC, CB, BA\}$ ;
- $ji \in \{DE, CD, BC, AB\}$ ;
- $j \in \{B, C, D\}$ ;
- $jk \in \{DC, CB, BA\}$ ;
- $Y_{ij}$ , quantidades de bens entregues ao nó  $j$  pelo elo à montante;
- $O_j$ , quantidade de pedidos em aberto pelo nó  $j$ ;
- $IP_j$ , posição do estoque do nó  $j$ ;
- $I_j$ , balanço do estoque do nó  $j$ ;
- $U_{ji}$ , pedidos realizados pelo nó  $j$  para o elo a montante;
- $BO_j$ , quantidade de bens realmente entregues;

- k)  $Y_{jk}$ , pedidos entregues ao nó à jusante;
- l)  $SP_j$ , set-point é a referência ou posição do estoque.

### 3.2 As equações de controle de estoque

Balanço de estoque:

$$I_j(t) = I_j(t-1) + Y_{ij}(t-L) - Y_{jk}(t), \quad (51)$$

onde  $L$  é o lead time de entrega.

A posição do estoque será:

$$IP_j(t) = IP_j(t-1) + Y_{ij}(t) - Y_{jk}(t) \quad (52)$$

A quantidade de pedidos feitos pelo nó  $j$  é:

$$U_{ji}(t) = K_j \times (SP_j(t) - IP_j(t)) \quad (53)$$

onde  $K_j$  deve ser menor que 2.

Pedidos em aberto para cada nó  $j$ :

$$O_j(t) = U_{kj}(t) + O_j(t-1) - Y_{jk}(t) \quad (54)$$

Controle de entrega ou não de pedidos a jusante:

$$Y_{jk}(t) = \begin{cases} 0 & O_j(t-1) \leq 0 \\ O_j(t-1) & 0 \leq O_j(t-1) \leq I_j(t-1) \\ I_j(t-1) & 0 \leq I_j(t-1) \leq O_j(t-1) \end{cases} \quad (55)$$

Quantidade de bens realmente entregue:

$$BO_j(t) = O_j(t-1) - Y_{jk}(t) \quad (56)$$

Usando a transformação simples do plano  $s$  para o plano  $z$  temos:

$$I_j(t) = I_j(t-1) + Y_{ij}(t-L) - Y_{jk}(t), \quad \Rightarrow$$

$$I_j(z) = I_j(z)z^{-1} + Y_{ij}(z)z^{-L} - Y_{jk}(z) \Rightarrow I_j(z)(1 - z^{-1}) = Y_{ij}z^{-L} - Y_{jk}(z) \Rightarrow$$

$$I_j(z) = \frac{z}{z-1}(Y_{ij}(z)z^{-L} - Y_{jk}(z))$$

e assim sucessivamente,

$$IP_j(z) = \frac{z}{z-1}(Y_{ij}(z) - Y_{jk}(z))$$

$$O_j(z) = \frac{z}{z-1}(U_{kj}(z) - Y_{jk}(z))$$

$$U_{\bar{j}}(z) = K_j(SP_j(z) - IP_j(z))$$

$$Y_{jk}(z) = \begin{cases} 0 & z^{-1}O_j(z) \leq 0 \\ z^{-1}O_j(z) & 0 \leq z^{-1}O_j(z) \leq z^{-1}I_j(z) \\ z^{-1}I_j(z) & 0 \leq z^{-1}I_j(z) \leq z^{-1}O_j(z) \end{cases} \quad (57)$$

Com o grupo de equações (57) e com a função de transferência Temo um elo completo com previsão de demanda com baixo efeito de chicoteamento.

O diagrama de blocos correspondente a estas equações segue abaixo:

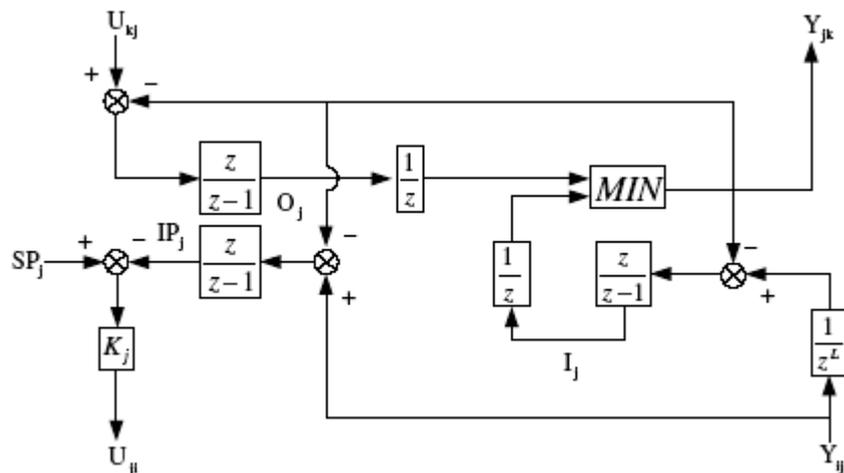


Figura 18 - Diagrama de blocos de um nó j de uma cadeia de suprimentos  
Fonte: Adaptado de Lin et al. (2003)

### 3.3 Considerações sobre Estabilidade

Esta seção analisa casos centrados nas operações em cadeia de suprimentos, com um controlador proporcional de níveis de estoque. O comportamento dinâmico

pode ou não envolver transição de um regime assintótico para outro dependendo de quão grande ou abrupta seja a mudança na demanda do consumidor. Contudo, esta análise assintótica fornece entendimento útil do sistema.

### 3.3.1 Estoque Elevado e Fornecimento Infinito

Neste caso, um fornecedor à montante tem estoque suficiente para que a demanda do nodo  $j$  seja satisfeita, isto é,  $Y_{ij}(z) = z^{-1}U_{ji}(z)$ . Além disso, assume-se que o *set-point* do nodo  $j$  é suficientemente grande para que sempre haja estoque suficiente para satisfazer todas as demandas do consumidor, isto é,  $Y_{zk}(z) = z^{-1}O_j(z) = z^{-1}U_{kj}(z)$ . A função de transferência de malha fechada pode ser derivada da equação (58) seguinte:

$$IP_j(z) = \frac{K_j \times SP_j(z) - U_{kj}(z)}{z - 1 + K_j} \quad (58)$$

com equação (59) característica:

$$H_j(z) = z + K_j - 1 = 0 \quad (59)$$

Um sistema de dados amostrados é estável se todos os pólos da equação característica (59) estão dentro da circunferência de raio unitário conforme a equação (60):

$$\begin{aligned} H_j(z^*) = z^* + K_j - 1 = 0 &\Rightarrow |z^*| = |K_j - 1| \leq 1 \\ &\Rightarrow 0 \leq K_j \leq 2 \Rightarrow K_{j,U} = 2 \end{aligned} \quad (60)$$

Portanto, se a capacidade de fornecimento à montante for infinita e o *set-point* da posição de estoque é suficientemente grande para que uma situação crítica nunca

chegue a menos que o sistema se torne instável, então o maior ganho de malha fechada  $K_{j,U}$  é igual a 2. É interessante notar que uma configuração intuitiva para o ganho seria configurá-lo em 1, que corresponde exatamente ao decaimento de  $\frac{1}{4}$  da sintonia de Ziegler-Nichols para um controlador proporcional (Lin et al. 2003).

### 3.3.2 Fornecimento Infinito e Estoque pequeno

Se um fornecedor à montante tem estoque suficiente para que a demanda do nodo  $j$  seja sempre satisfeita, isto é,  $Y_{ij}(z) = z^{-1}U_{ji}(z)$ , mas o *set-point* do nodo  $j$  é menor de modo que sempre haja estoque insuficiente para satisfazer as demandas de todos os consumidores,  $Y_{jk}(z) = z^{-1}I_j(z)$ , então, a função de transferência de malha fechada e respectiva equação (61) característica podem ser obtidas:

$$\begin{aligned} IP_j(z) &= \frac{\frac{K_j(z^{L+1}-1)}{z-1}}{z^{L+1} + \frac{K_j(z^{L+1}-1)}{z-1}} SP_j(z) \\ H_j(z) &= z^{L+1} + \frac{K_j(z^{L+1}-1)}{z-1} = 0 \end{aligned} \quad (61)$$

Pode ser demonstrado que sempre que  $K_j \geq 1$ , então existe pelo menos um pólo com  $|z^*| \geq 1$ . Portanto se o fornecimento à montante é infinito e a posição de estoque é pequena de forma que se tenha menos estoque que os pedidos em aberto, a condição suficiente para instabilidade é  $K_j > 1$ . Além disso, a função de transferência, malha fechada, é independente de  $U_{kj}$ . Daí, quando há fornecimento infinito e estoque pequeno, a posição de estoque torna-se independente de flutuações de demandas à jusante (em direção ao cliente).

### 3.3.3 Fornecimento Limitado

Assume-se aqui que o fornecedor à montante  $i$  não tem estoque suficiente para que o fornecimento ao nodo  $j$  não seja dependente da demanda do nodo  $j$  mas limitado

pela disponibilidade do estoque:  $Y_{ij}(z) = z^{-1}I_i(z)$ . Neste caso, acha-se a seguinte função de transferência (equação 62):

$$IP_j(z) = \begin{cases} \frac{1}{z-1}(I_i(z) - U_{jk}(z)) & I_j(z) \geq z^{-1}U_{kj}(z) \\ \frac{z^{L+1}-1}{(z-1)z^{L+1}}I_i(z) & \text{Caso contrário} \end{cases} \quad (62)$$

Na equação (62), a posição de estoque do nodo j não depende nem do set-point nem do ganho do controlador da política de pedidos do nodo j. Este resultado é intuitivo. Se o fornecedor tem um estoque pequeno, não importará quanto o nodo j emita pedidos, sua posição de estoque é determinada pelo estoque disponível no fornecedor.

### 3.3.4 Efeito de Chicoteamento

O efeito de chicoteamento pode ser representado como uma amplificação das flutuações de demanda na direção jusante para a montante (fornecedor). Na seção anterior, foi visto que o acoplamento entre dois nodos através de uma política de pedidos é eliminado quando há estoque insuficiente em qualquer outro nodo ao longo da cadeia. Portanto, propagação de flutuações de demanda só é possível quando cada nodo tem estoque suficiente. Quando há fornecimento suficiente e estoques grandes, substitui-se a equação do controlador proporcional na equação (63):

$$IP_j(z) = \frac{K_j \times SP_j(z) - U_{kj}(z)}{z - 1 + K_j} \quad (63)$$

e chega-se a equação(64):

$$U_{ji}(z) = \frac{K_j \times (z - 1)}{z - 1 + K_j} SP_j(z) + \frac{K_j}{z - 1 + K_j} U_{kj}(z) \quad (64)$$

### 3.3.5 Pedidos Agressivos

Pedidos agressivos são pedidos emitidos em quantidade acima da demanda. Um dos fatores que gera o chicoteamento é usualmente atribuído os pedidos agressivos. É possível demonstrar que o sistema tornar-se-ia instável quando  $K_j$  é maior que 2, o ganho máximo. Portanto, quando não há mudança no set-point da posição do estoque, o efeito de chicoteamento é evidenciado apenas quando o ganho do controlador é maior que 1. Considerando que não há mudança no set-point, a razão entre pedidos de nodos sucessivo pode ser expressa como:

$$\frac{|U_{\bar{u}}(z)|}{|U_{k_j}(z)|} = \frac{K_j}{|z - 1 + K_j|} \quad (65)$$

A amplitude nas flutuações de demanda será amplificada segundo a equação (66):

$$\frac{|U_{\bar{u}}(z)|}{|U_{k_j}(z)|} = \frac{K_j}{|e^{i\omega} - 1 + K_j|} > 1 \quad \forall \omega \quad (66)$$

A figura 19 mostra a magnitude das razões de pedidos de nós sucessivos para vários ganhos do controlador ( $K_j = 0,9; 1,0; 1,1$ ). Mostra também que o chicoteamento é causado, principalmente, por flutuações de alta frequência na demanda do consumidor quando  $K_j > 1$ , isto é, o gerente do nodo distribuidor responde muito agressivamente a flutuações de curto-prazo.

Se  $K_j < 1$ , a magnitude pode realmente ser reduzida ao longo da cadeia. Mas qual seria o incentivo para que gerentes emitissem menos pedidos do que o necessário para alcançar a meta do estoque? Se esta meta é grande o suficiente para que a segurança do estoque seja capaz de cobrir todas as flutuações de demanda a curto-prazo.

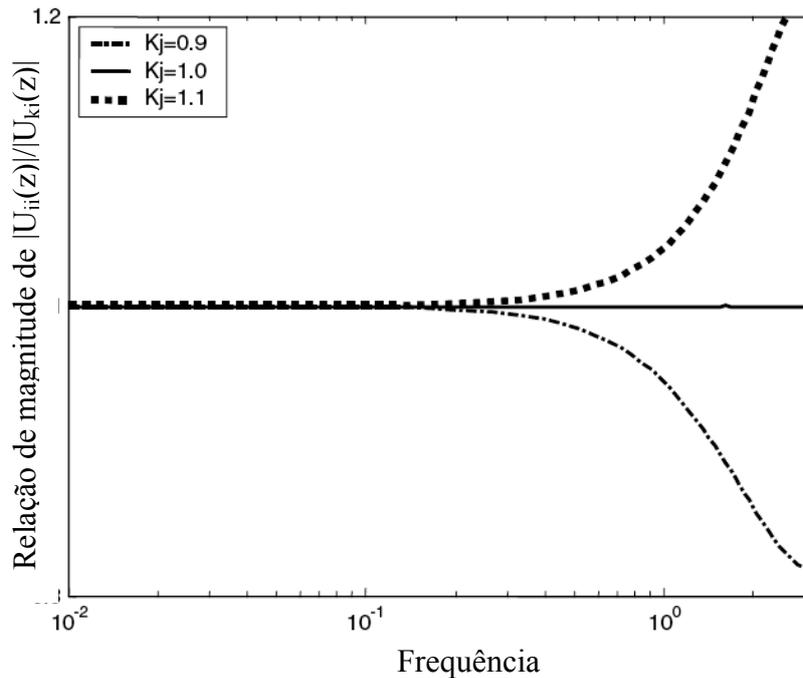


Figura 19 - Razão de Magnitudes de Pedidos vs frequência para vários valores de ganho do controlador.

Fonte: adaptado de Lin et al. (2003).

Emitir ordens de compra um pouco menores do que aquilo que é necessário, pode reduzir o estoque sem sacrificar a satisfação do consumidor. Portanto, os administradores do elo de distribuição implementarão ordens de compra menos agressivas se eles estiverem confiantes de que a meta para a posição de estoque é boa o suficiente para satisfazer as tendências de demanda a longo-prazo.

### 3.3.6 Previsão de Demanda

Se o administrador lança mão da previsão de demanda do consumidor para definir a posição de estoque apropriadamente, como evidencia a figura abaixo no ramo que passa por  $F(z)$ , conforme a figura (20):

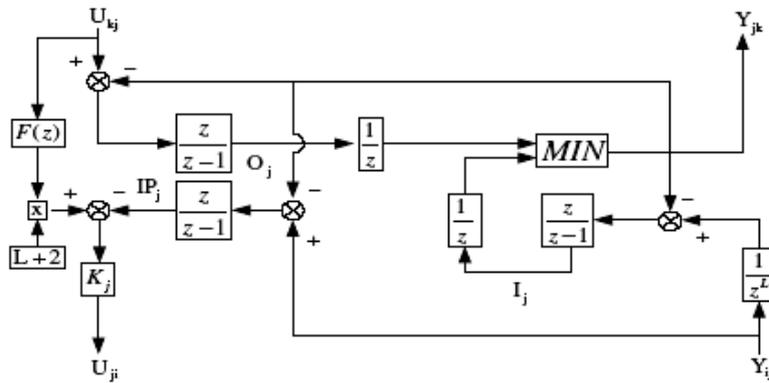


Figura 20 - Diagrama de blocos da cadeia de suprimentos com previsão de demanda  
 Fonte: adaptado Lin et al. (2003).

Na figura 20 o valor do lead time L deve ser introduzido, assim como  $K_j$ .

Então as funções de transferência de malha fechada tornam-se, conforme a equação (67):

$$\begin{aligned}
 IP_j(z) &= -\frac{1 - K_j \times F(z) \times (L + 2)}{z - 1 + K_j} U_{kj}(z) \\
 U_{ji}(z) &= \frac{K_j \times ((L + 2) \times F(z) \times (z - 1) + 1)}{z - 1 + K_j} U_{kj}(z)
 \end{aligned} \quad (67)$$

Na equação (68),  $F(z)$  é um preditor utilizado para prognosticar a demanda atual. Towill et al. (1982) demonstram que qualquer preditor levará o sistema inevitavelmente ao chicoteamento. Por exemplo, estocagem é uma política simples que compartilha a demanda do último consumidor com a próxima meta de estoque:

$$F(z) = \frac{1}{z}, \quad U_{ji}(z) = \frac{K_j}{z - 1 + K_j} \left( 1 + (L + 2) \times \frac{z - 1}{z} \right) U_{kj}(z) \quad (68)$$

Na figura (21), um diagrama de Bode com a magnitude da razão entre pedidos com  $K_j = 0.7$ . Pode ser visto que o chicoteamento ocorre em todas as frequências, contudo, em menor magnitude do que quando se utiliza a política de Pedidos Agressivos.

Se for utilizado um filtro exponencial na previsão sugerido por Towill (1997):

$$F(z) = \frac{\alpha}{z + \alpha - 1} \quad (69)$$

O efeito de chicoteamento é drasticamente reduzido, como também mostra a figura (21):

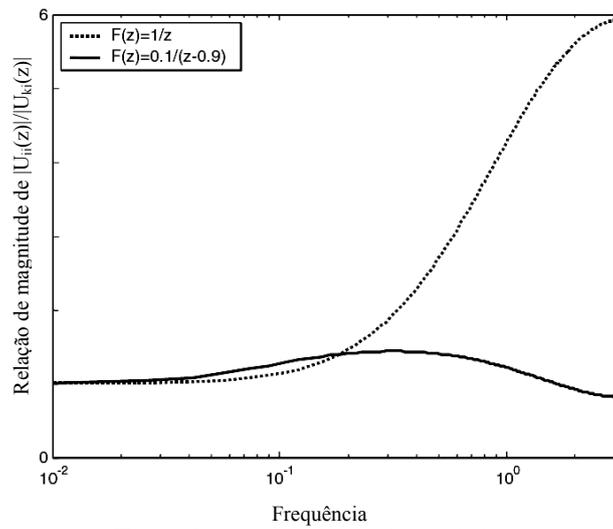


Figura 21 – Resposta em Frequência da razão de pedidos no caso com previsão de demanda

Fonte: adaptado Lin et al. (2003).

### 3.3.7 Efeito do *Lead Time*

A figura (22) mostra quanto maior o *lead time*, maior será o efeito de chicoteamento se for implementado um controlador P com *feedforward* com filtro exponencial. Contudo, sem previsão de demanda, não há chicoteamento.

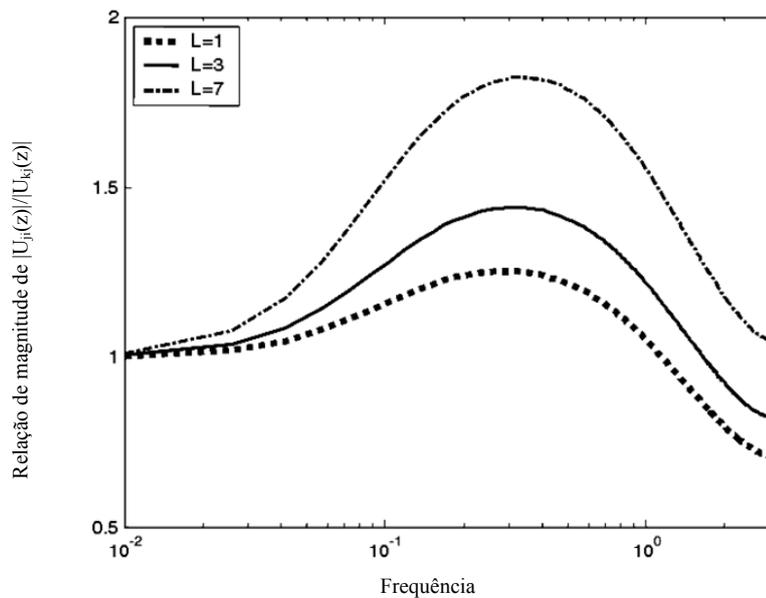


Figura 22 – Respostas frequenciais para vários valores do Lead Time (L)

Fonte: adaptado de Lin et al. (2003).

### 3.4 Implementação do Controle

#### 3.4.1 Critério para Sintonia do Controlador

Embora a demanda do consumidor seja estocástica, a média desta demanda pode ser sujeitada a perturbações de baixa frequência tais como um degrau ou mudanças sazonais nas vendas. O objetivo de um controlador de nível de estoque (quantidade em estoque) é manter a referida posição de estoque (quantidade em estoque) na presença de perturbações de baixa frequência. Contudo, além de ter que atingir a meta da posição de estoque, os objetivos de um administrador de cadeia de suprimentos também incluem definir uma meta de posição de estoque que não seja muito alta (resultando em custos de estoque elevados) ou muito baixos (resultando em insatisfação do cliente devido a pedidos de demanda não atendidos).

Portanto, um administrador deve almejar uma resposta rápida de pedidos para demandas de frequências baixas de modo que o nível de estoque possa ser mantido, mas limite a razão entre pedidos e demandas para magnitudes menores que 1 em altas frequências. A resposta em frequência de  $|U_{ji}(z)|/|U_{kj}(z)|$  em um nodo em malha fechada de uma cadeia pode ser utilizada para o projeto do controlador. Há, porém, dois fatos a serem considerados:

- *Largura de Faixa*: a frequência na qual a razão de magnitude é inferior a 0.7. Uma banda larga indica resposta mais rápida, contudo, com rejeição a ruído mais fraca.

- *Pico de Ressonância (RP)*: o maior valor de amplitude. Um pico de ressonância mais alto indica uma resposta mais rápida, entretanto, mais oscilatória. Picos adequados vão de 1.5 a 2.0.

Como o sistema é discreto, a maior frequência em  $z$  será  $\omega = \pi$ . Portanto, pode-se definir um termo  $MR_\pi$  como a magnitude de  $|U_{ji}(z)|/|U_{kj}(z)|$  na frequência  $\omega = \pi$  na equação (70):

$$MR_\pi = \left| \frac{U_{ji}(\omega)}{U_{kj}(\omega)} \right|_{\omega=\pi} \quad (70)$$

Uma vez que MRs maiores indicam uma banda mais larga e resposta mais rápida, mas resultando num chicoteamento mais severo. Portanto, o critério aproximado de sintonia abaixo pode ser usado:

“Escolher uma configuração para o controlador com  $MR_\pi$  na faixa de 0.8 a 1 e RP na faixa de 1.5 a 2”.

### 3.4.2 Retroalimentação com previsão de demandas

A Figura (23) dá a resposta em frequência de uma unidade com controlador proporcional para a posição de estoque e um filtro exponencial com vários ganhos do controlador. Como visto um ganho menor que 1 reduz o efeito de chicoteamento e um ganho de 0.7 se torna apropriado de acordo com a regra da seção anterior.

A figura (24) mostra que para um ganho  $K_j = 0.7$ , o efeito de chicoteamento pode ser atenuado, enquanto que para  $K_j = 1.0$  haverá um chicoteamento substancial.

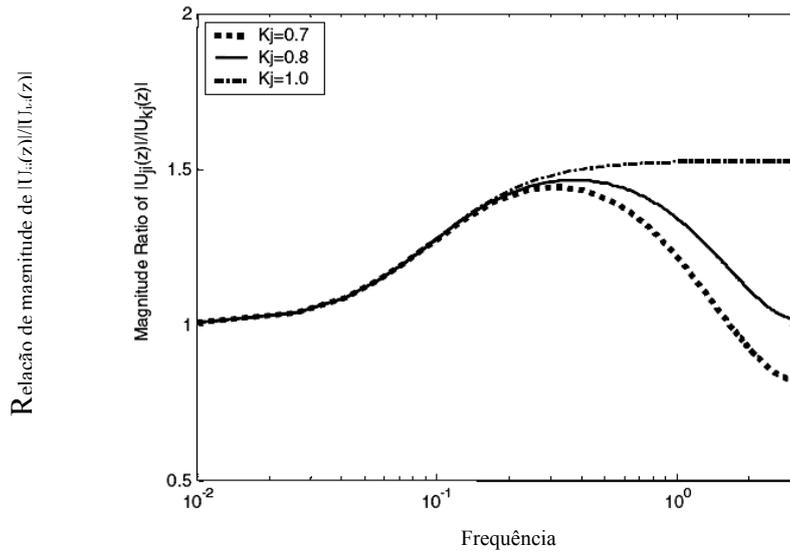


Figura 23 – Respostas em Freqüência para diferentes ganhos do controlador-P  
 Fonte: adaptado de Lin et al. (2003).

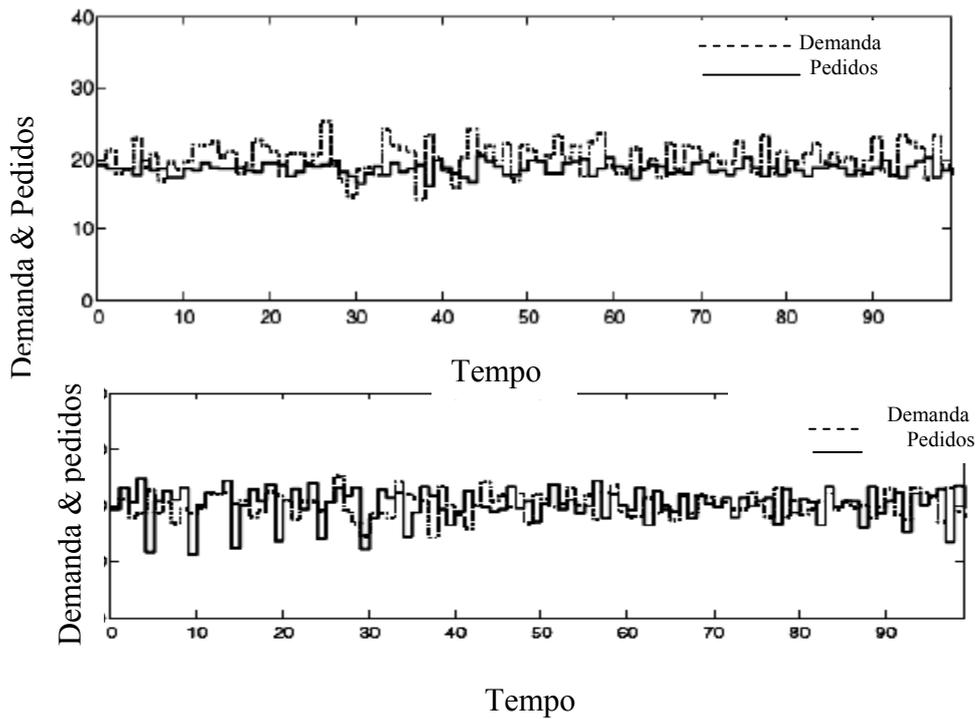


Figura 24 - Comparação entre demanda e pedidos de um elo de cadeia de suprimento com controlador-P  
 Adaptado de Lin et al. (2003)

As respostas da posição de estoque  $IP_j$  e ordens de compra  $U_{kj}$  com um ganho de 0.7 como mostrado na figura 25:

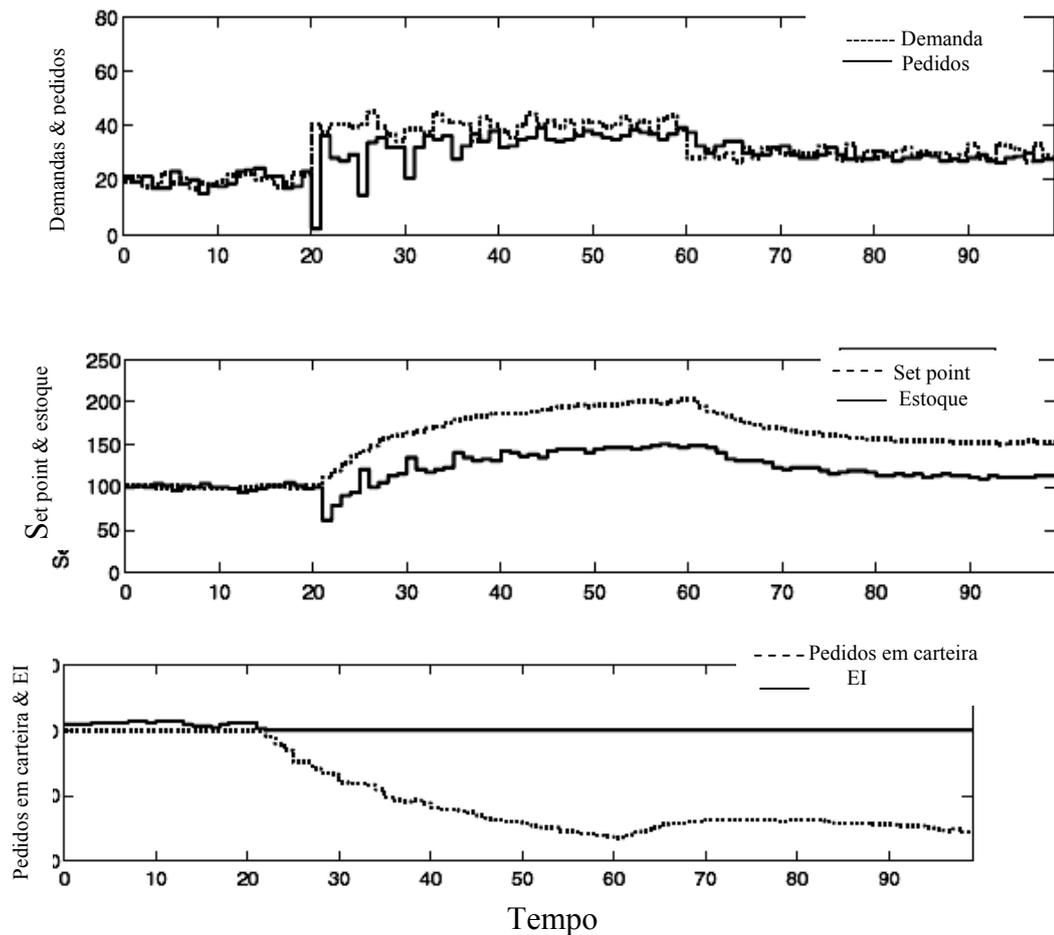


Figura 25 – Resultados da simulação de uma cadeia de suprimentos utilizando um controlador P com ganho  $K_j=0.7$   
 Fonte: adaptado de Lin et al. (2003).

Percebe-se no gráfico do estoque, um grande *offset* entre o *setpoint* e a posição de estoque, o que pode ser eliminado ao se utilizar um controlador PI, proposto na equação (71)

$$C_j(z) = K_j \times \left( 1 + \frac{1}{\tau_{I,j}} \frac{z}{z-1} \right) \quad (71)$$

O diagrama de Bode para malha fechada de um elo na cadeia de suprimento com um controlador PI é exibido na figura 26. Percebe-se que o controlador não conseguiu atenuar muito o efeito de chicoteamento.

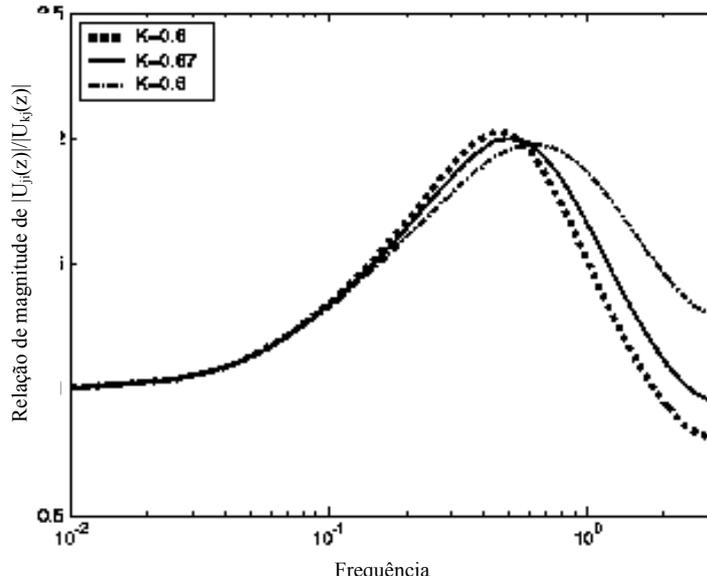


Figura 26 – Resposta em frequência de para diferentes ganhos.  
 Fonte: adaptado de Lin et al. (2003).

A figura (27) mostra que para uma constante de tempo  $\tau_{I,j} = 3.3$ , o efeito de chicoteamento ainda parece mesmo com ganhos menores que 1.

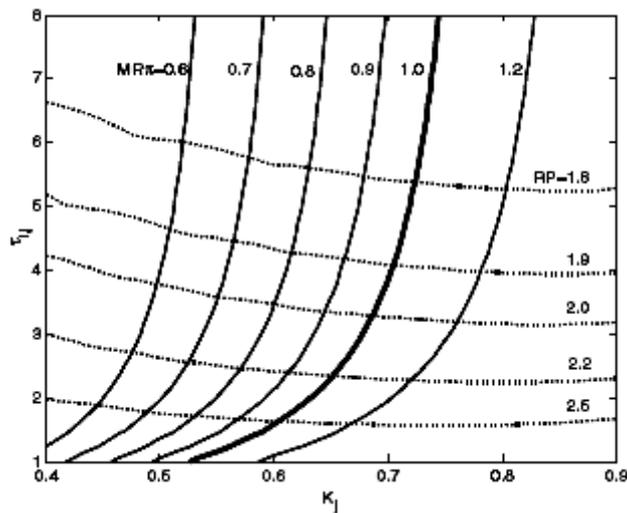


Figura 27 – Diagrama de contorno de  $MR\pi$  e picos de ressonâncias (RP) em função do ganho  $K_j$  e constante de tempo para um controlador PI.  
 Fonte: adaptado de Lin et al. (2003).

### 3.4.3 Controle em Cascata

Visto que o controlador PI não satisfaz aos requisitos de controle, uma alternativa óbvia, seria o uso de controle em cascata como mostra a figura (28).

No controle em cascata, o set-point da posição de estoque é amplificado ou atenuado se a tendência a longo-prazo, filtrada, da diferença entre a posição de estoque atual e a demanda é menor que (ou maior que) zero.

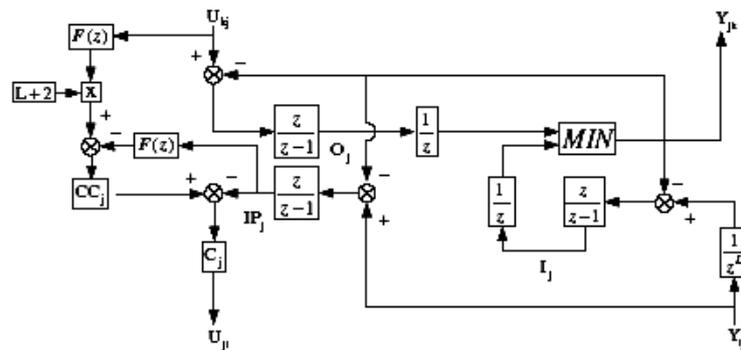


Figura 28 – Diagrama de Blocos com controladores em cascata em um elo de cadeia de suprimento.  
Fonte: adaptado de Lin et al. (2003).

Contudo, este alvo é buscado em vão pela malha mais interior. As funções de transferência em malha fechada são dadas pelas equações (72) e (73):

$$IP_j(z) = \frac{C_j(z) \times CC_j(z) \times F(z) \times (L + 2) - 1}{z - 1 + C_j(z) \times (1 + CC_j(z) \times F(z))} U_{kj}(z) \quad (72)$$

$$U_{ji}(z) = \frac{C_j(z) \times ((L + 2) \times CC_j(z) \times F(z) \times (z - 1) + CC_j(z) \times F(z) + 1) \times U_{kj}(z)}{z - 1 + C_j(z) \times (1 + CC_j(z) \times F(z))} \quad (73)$$

Se um filtro exponencial com  $\alpha = 0.1$  é utilizado para previsão  $F(z)$ , um ganho médio de  $K_j = 0.8$  é utilizado na malha mais interna e o controlador PI em cascata utilizado é:

$$CC_j(z) = K_{cj} \times \left(1 + \frac{1}{\alpha c_j} \frac{z}{z - 1}\right) \quad (74)$$

Com  $\tau_{IC,j} = 5.5$ , o diagrama de Bode de malha fechada na figura (29), mostra o efeito de chicoteamento eliminado para altas frequências com o ganho da malha mais exterior próximo a 1 e o da malha interior um pouco menor que 1. ( $K_j=0.8$ ). O pico de ressonância e a banda de passagem deste caso são muito maiores que no caso do PI puro.

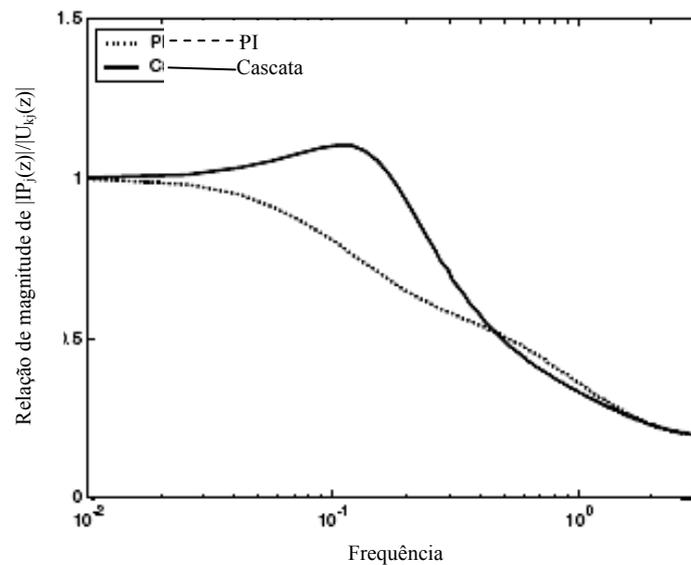


Figura 29 – Diagrama de Bode para PI e controle em cascata  
 Fonte: adaptado de Lin et al. (2003).

A figura (30) mostra o diagrama de contorno de RP e MR com relação a  $K_{c,j}$  e  $\tau_{IC,j}$ . O espaço de seleção da malha mais externa é muito maior daquela para o controlador puro como descritos 13.

A figura (31) mostra que se selecionando  $K_{c,j} = 1.05$  e  $\tau_{IC,j} = 5.5$  para a malha mais interior, e  $K_{c,j} = 0.8$  para a mais interior, elimina-se o efeito de chicoteamento muito bem. A demanda e os pedidos andam mais juntos agora.

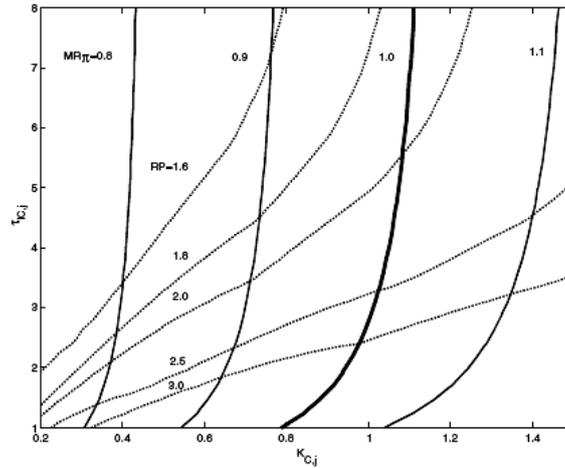


Figura 30 – Diagrama de contorno para  $MR\pi$  e pico de ressonância  $RP$   
 Fonte - adaptado de Lin et al. (2003).

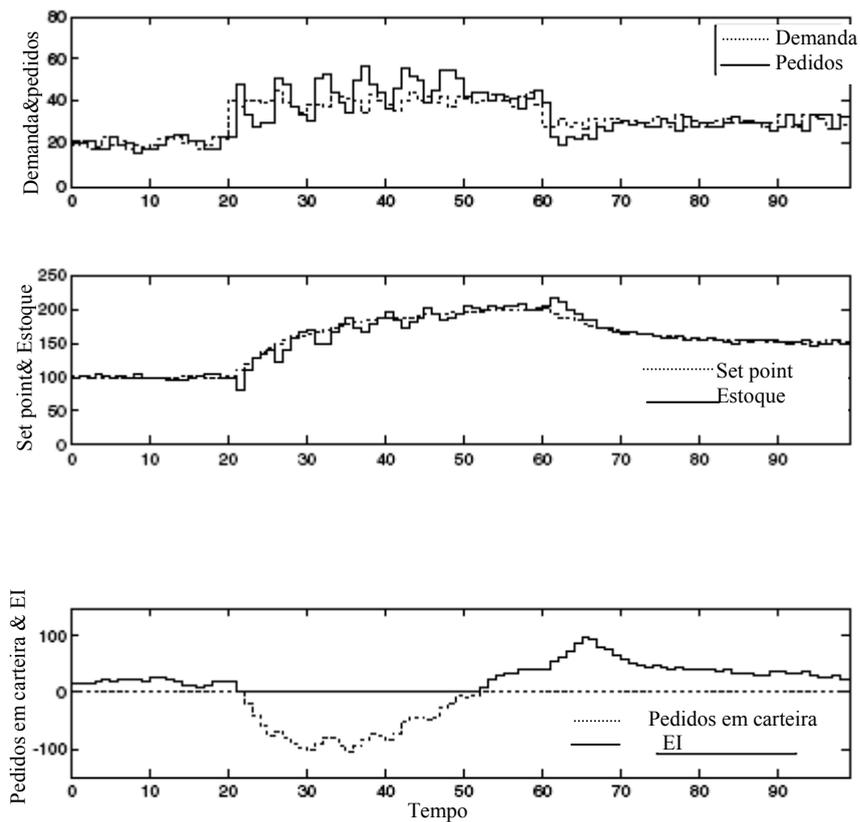


Figura 31 – Resultados da simulação da dinâmica de um elo de cadeia de suprimentos com previsão de demanda utilizando um controlador PI em cascata.  
 Fonte: adaptado de Lin et al. (2003).

Portanto, um controle em cascata resulta num melhor acompanhamento da saída com o *set-point* durante o período transitório. O período com pedidos devolvidos e sua magnitude são menores, o que indica maior satisfação do que cliente quando comparado com o PI.

#### 3.4.4 Avaliação do Controlador

Num sistema real, uma medida diferente de custo pode ser imposta ao se assumir que o custo total é composto do custo real do estoque, custo de transporte, custo de processamento de pedidos, etc. Entretanto, estudos utilizando tais medidas de custo dependerão invariavelmente do valor de custo assumido. Tais valores variam caso a caso. Então, escolhem-se índices mais básicos para avaliar o controlador:

1. *Integral Absolute Error (IAE)*: diferença cumulativa entre a variável controlada, posição de estoque e o valor do *set-point* para avaliar a performance do controlador.
2. *Bullwhip (BW)*: diferença cumulativa de  $|U_{ji}/U_{kj} - 1|$  para indicar o efeito de chicoteamento.
3. *Back-order (BO)*: diferença cumulativa entre o estoque e a demanda do consumidor quando não há estoque suficiente para indicar a satisfação do cliente.
4. *Excess Inventory (EI)*: diferença cumulativa entre o estoque e a demanda do consumidor quando há mais estoque que consumidores para indicar custo de estoque.

A tabela (4) lista os quatro índices obtidos utilizando controlador proporcional, PI e cascata. Enquanto o efeito de chicoteamento pode ser reduzido diminuindo-se o ganho do controlador P, os índices IAE e BO pioram significativamente por o

controlador P falha em levar ao sistema ao alvo adequado. O controlador PI é capaz de reduzir o chicoteamento sem sacrificar a performance do controlador. A satisfação do cliente é melhorada e um estoque excessivo é também reduzido. Se o controle em cascata é utilizado, BW e BO podem ser reduzidos, mas IAE e ET tornam-se levemente inferiores que os do controle PI puro.

Tabela 4 - Índices de performance de diferentes estratégias de controle  
 Fonte: adaptado de Lin et al. (2003).

Modelo de controle	Controle P		Controle PI	Controle cascata
Parâmetros	$K_j = 0.7$	$K_j = 1.0$	$K_j = 0.67, \tau_{I,j} = 3.3$	$K_j = 0.8, K_{C,j} = 1.05, \tau_{I,C,j} = 5.5$
IAE <sup>a</sup>	3574	2728	454	819
BW <sup>b</sup>	9.68	28.7	9.03	7.91
BO <sup>c</sup>	19,958	11,748	1879	1195
EI <sup>d</sup>	20	20	2138	2379

$$^a \text{IAE} = \int_0^{\infty} |\text{SP}_j(t) - \text{IP}_j(t)| dt.$$

$$^b \text{BW} = \int_0^{\infty} |U_{\mu}(t)/U_{\mu j}(t) - 1| dt.$$

$$^c \text{BO} = \int_0^{\infty} (Y_{\mu}(t) - O_j(t)) dt.$$

$$^d \text{EI} = \int_0^{\infty} (I_j(t) - Y_{\mu}(t)) dt.$$

### 3.5 Função de Transferência de um Elo de Cadeia de suprimento

Para obter a função de transferência do elo de uma cadeia de suprimento, serão revistas algumas ferramentas e conceitos importantes.

Os dados de entrada e saída tanto de materiais como informações nos elos são discretos não sendo necessária à operação mostrada na figura (32-a e 32-b).

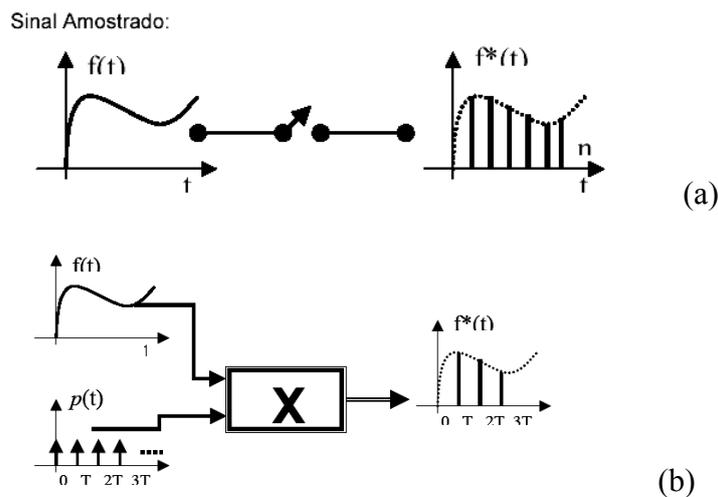


Figura 32 - Processo de discretização dos dados

$$f^*(t) = f(t) \cdot p(t) = f(t) \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(nT) \cdot \delta(t - nT) \quad (75)$$

A amplitude de p é unitária.

### 3.5.1 Transformada Z

- Sua aplicação a sinais e sistemas discretos é simples;
- Domínio dos números complexos;
- Sinais e funções convergentes;
- Implementação digital de sistemas discretos

#### 3.5.1.1 Definição da Transformada Z

- Sua aplicação a sinais e sistemas discretos é simples;
- Domínio dos números complexos;
- Sinais e funções convergentes;
- Implementação digital de sistemas discretos

Definição (figura 33):

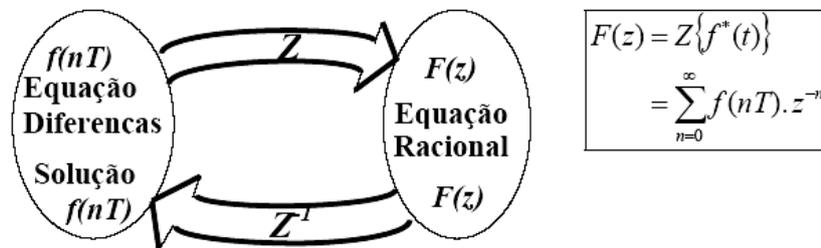


Figura 33 - Relação entre Transformada de Laplace Discreta Transformada Z  
 $Z \equiv e^{sT}$  : Mudança de Variáveis. (76)

#### 3.5.1.2 Propriedades da Transformada Z

- Superposição:

$$Z \{ a f^*(t) + g^*(t) \} = a F(z) + G(z) \quad (77)$$

- Diferenciação Complexa:

$$Z\{nf(n)\} = -z \left[ \frac{d}{dz} F(z) \right] \quad (78)$$

- Generalizando, propõe a equação (79):

$$Z\{n^r \cdot f(n)\} = (-1)^r \cdot z \left[ \frac{d}{dz} F(z) \right]; \quad r=1,2,3,\dots \quad (79)$$

- Translação Real em Retardo:

$$Z\{f(nT-kT)\} = z^{-k} \cdot F(z); \quad n \geq 0 \quad (80)$$

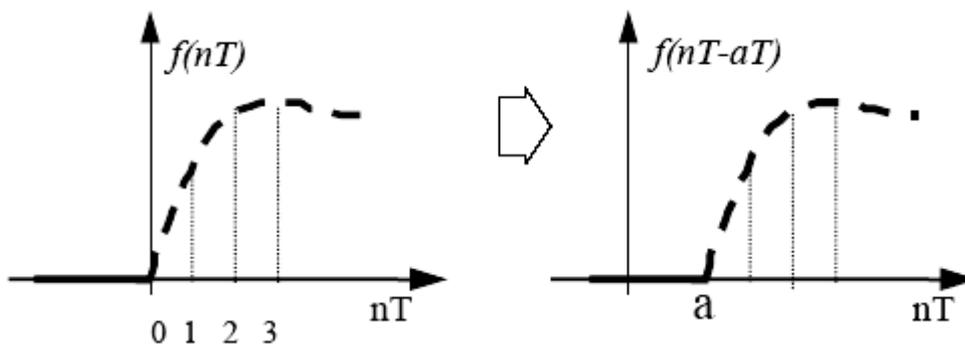


Figura 34 - Translação real em Retardo

- Translação Real em Avanço:

$$Z\{f(nT+kT)\} = z^k \left[ F(z) - \sum_{n=0}^{k-1} z^{-n} f(nT) \right] \quad (81)$$

$$Z\{e^{-a \cdot nT} \cdot f(nT)\} = F(e^{aT} z) \quad (82)$$

- Teorema do Valor Final (equação 84):

$$f(\infty) = \lim_{n \rightarrow \infty} f(nT) = \lim_{z \rightarrow 1} (z-1) \cdot F(z) \quad (83)$$

- Teorema do Valor Inicial (equação 84):

$$f(0) = \lim_{n \rightarrow 0} f(nT) = \lim_{z \rightarrow \infty} F(z) \quad (84)$$

- Convolução Real (equação 85) :

$$\begin{aligned}
G(z) \bullet F(z) &= Z\{g(nT) \star f(nT)\} = Z\left\{\sum_{n=0}^k g(nT) \cdot f(kT - nT)\right\} \\
&= Z\left\{\sum_{n=0}^k f(nT) \cdot g(kT - nT)\right\} = F(z) \bullet G(z)
\end{aligned} \tag{85}$$

Transformada Z de uma Seqüência Causal

Seqüência Causal (equação 86):

$$f(n) = a^n; \quad n \geq 0 \quad e \quad a : \text{valor constante} \tag{86}$$

Então, procedendo a análise (equação 87)

$$F(z) \sum_{n=0}^{\infty} a^n z^{-n} = \frac{a}{z - b} = \frac{az^{-1}}{1 - bz^{-1}} \tag{87}$$

- Transformada Z de uma F(s):

Direta (equação 88):

$$\begin{aligned}
F(z) &= Z\{F(s)\} \\
&= \sum \text{Re síduos de} \left[ \frac{F(s)}{(1 - z^{-1} e^{sT})} \right] \tag{88} \\
&= \sum_{j=1}^n (s + s_j) \left[ \frac{F(s)}{(1 - z^{-1} e^{sT})} \right]_{s=-s_j}
\end{aligned}$$

onde  $s_i$  são as raízes do denominador de F(s)

Caso  $s_i$  seja uma raiz  $s_m$  de multiplicidade  $m > 1$  seus resíduos serão calculados da seguinte forma (equação 89):

$$\text{Re síduo} = \left[ \frac{1}{(n-1)!} \right] \frac{\partial^{m-1}}{\partial s^{m-1}} \left\{ (s + s_m)^m \left[ \frac{F(s)}{(1 - z^{-1} e^{sT})} \right] \right\}_{s=s_m} \tag{89}$$

Indireta (equação 90):

$$\begin{aligned}
F(z) &= Z\{F(s)\} = Z\{F_1(s) + F_2(s) + F_3(s) + \dots + F_n(s)\} = \\
&F_1(z) + F_2(z) + F_3(z) + \dots + F_n(z)
\end{aligned} \tag{90}$$

### 3.5.1.3 Transformada Z Inversa

Definição: Integral de contorno de um círculo de raio (equação 91)

$$|z| = e^{cT} \quad f(nT) = \frac{1}{2\pi j} \oint_{\Gamma} F(z) z^{n-1} dz \quad (91)$$

### 3.5.2 Como obter a Função de Transferência

Considerando uma função analógica da equação (92):

$$H_a(s) = \frac{\sum_{k=0}^M d_k s^k}{\sum_{k=0}^N c_k s^k} = \frac{Y_a(s)}{U_a(s)} \quad (92)$$

A função racional correspondente para filtros digitais tem a forma (equação 93):

$$F(z) = \frac{\sum_{k=0}^M b_k z^k}{\sum_{k=0}^N a_k z^k} = \frac{Y_a(z)}{U_a(z)} \quad (93)$$

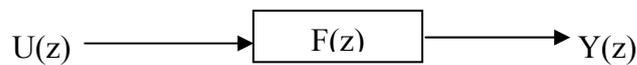


Figura 35 – Função de Transferência

No caso do elo de uma cadeia de suprimento (Chen, 2000), sugere que  $F(z)$  pode ser um suavizador exponencial da forma (equação 94):

$$F(z) = \frac{a}{z-b} = \frac{az^{-1}}{1-bz^{-1}} \quad (94),$$

em que  $z = e^{sT}$ .

Esta equação é obtida a partir da fórmula básica da média com suavização exponencial usando pelos gerentes de previsão de demanda que é:

*Nova Previsão* =  $\alpha \cdot (\text{demanda real}) + (1 - \alpha) \cdot (\text{previsão anterior})$ , em que  $\alpha$ , na prática, assume valores entre 0 e 1 conforme Ballou (1987).

Considerando que “y” seja a previsão e “u” a demanda, tem-se:

$$y_{t+1} = \alpha u_t + (1 - \alpha) \cdot y_t \quad (95)$$

que é uma equação de diferenças.

Expressando em função da variável z fica:

$$\begin{aligned} z.Y(z) &= \alpha.U(z) + (1 - \alpha).Y(z) \Rightarrow [z - (1 - \alpha)].Y(z) = \alpha.U(z) \Rightarrow \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{\alpha}{z - (1 - \alpha)} \\ \Rightarrow F(z) &= \frac{\alpha z^{-1}}{[z - (1 - \alpha)].z^{-1}} \Rightarrow F(z) = \frac{\alpha.z^{-1}}{1 - (1 - \alpha).z^{-1}} \quad (96) \end{aligned}$$

Escrevendo a função de transferência, na forma vetorial e a partir dos valores de entrada e saída de cada elo podem-se determinar os coeficientes “a” e “b”.

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{\alpha z^{-1}}{1 - b z^{-1}} \Rightarrow \vec{Y}(z) - b z^{-1} \vec{Y}(z) = \alpha z^{-1} \vec{U}(z) \Rightarrow \vec{Y}_k = a \vec{U}_{k-1} + b \vec{Y}_{k-1} \quad (97)$$

$$\vec{Y}_k = a \vec{U}_{k-1} + b \vec{Y}_{k-1} \quad (98)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \vec{Y}_k \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} U_{k-1} & Y_{k-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \Rightarrow \\ \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} &= \text{pinv} \left( \begin{bmatrix} U_{k-1} & Y_{k-1} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \vec{Y}_k \end{bmatrix} \quad (99) \end{aligned}$$

A matriz dos regressores de  $36 \times 2$   $\begin{bmatrix} U_{k-1} & Y_{k-1} \end{bmatrix}$  será manipulada para se determinar a sua pseudo-inversa.

O algoritmo para a determinação da matriz pseudo-inversa dos regressores é mostrado no apêndice 1.

## **CAPÍTULO 4**

### **4. Estudo de Caso**

#### **4.1 Introdução**

A FMX é uma empresa nacional fundada em 1980 que há mais de vinte anos trabalha com produtos farmacêuticos e recentemente criou a divisão de cosméticos. O mix de produtos tem aumentado muito nos últimos anos, obrigando a mesma a realizar uma análise mais refinada do gerenciamento da sua cadeia. O departamento de logística foi criado há três anos, o que nos permitiu um acompanhamento desde o início, com maior aprendizado.

Os fornecedores de matérias-primas desta fábrica são grandes empresas do setor petroquímico.

O distribuidor de maior representatividade é ARMS.

Na cadeia produtiva onde está inserida esta empresa, ela representa o elo fraco, pois possui pouco poder de negociação frente a seus fornecedores e clientes. O seu processo produtivo se interpõe entre as grandes empresas petroquímicas, fornecedoras de matérias-primas e clientes encabeçados por grandes distribuidores de todo o país. Esta situação tem profundos impactos no planejamento da produção desta empresa. Este impacto se deve à prioridade de atendimento dos grandes distribuidores, alterando a ordem de chegada dos pedidos em detrimento do atendimento dos restantes.

A atividade da empresa é dividida em 90% com envasamento e os outros 10% em manipulação e produção de suas próprias embalagens.

#### **4.2 Escopo do projeto/delimitação da pesquisa**

Essa pesquisa apresentou o seguinte escopo:

Iniciamos nosso trabalho com o levantamento de dados históricos e recentes do volume de pedidos e vendas da acetona, mês a mês, assim como os pedidos e vendas de matéria-prima para fabricação deste produto que é o “carro chefe” da empresa.

Esses dados foram analisados estatisticamente e posteriormente, medido o efeito de chicoteamento nos dois elos da cadeia, sendo eles:

- Nível 1: Distribuidor( ARMS) / FMX(Fábrica);
- Nível 2: FMX(Fábrica) / Fornecedor.



Figura 36 - Elos da cadeia

Não foram considerados os demais elos e os demais produtos fabricados pela empresa FMX, pois os dados aos quais se teve acesso não incluem o restante da cadeia e outros produtos.

#### **4.3 Análise dos Dados.**

No histórico do produto apresentado pelos responsáveis das logísticas das empresas constam das demandas e das vendas para os dois níveis da cadeia. O resultado será tanto mais preciso quanto maior for a confiabilidade dos dados apresentados.

O histórico do produto em análise, conforme tabela 8, refere-se à acetona em unidades de frascos de 100ml e ao período de tempo que vai de Janeiro de 2001 até Dezembro do ano de 2003. Na tabela 8 Din1 e Din2 são as demandas de entrada no elo em forma

de pedidos dos clientes a jusante e Dout1 e Dout2 são as demandas de saída em forma de pedidos a montante

Meses	ARMS		FMX	
	Din1	Dout1	Din2	Dout2
1	537645	815448	815448	317240
2	724386	873084	873084	298670
3	664358	467204	467204	236456
4	519620	409903	409903	288415
5	164163	631844	631844	484373
6	351786	609797	609797	286663
7	295703	499872	499872	297671
8	452490	605415	605415	383221
9	479120	438230	438230	317729
10	665800	695022	695022	427703
11	434178	503428	503428	546767
12	731636	223476	223476	417539
13	595049	331631	331631	453754
14	347576	533512	533512	307465
15	284608	152773	152773	497335
16	447844	598194	598194	510905
17	402424	466578	466578	395602
18	659000	544005	544005	497158
19	514702	765449	765449	515671
20	367264	701765	701765	451811
21	325637	661886	661886	608429
22	550881	661051	661051	742106
23	377716	439763	439763	623965
24	491023	515300	515300	715504

25	712920	233567	233567	878658
26	367437	575854	575854	678623
27	390173	652702	652702	631474
28	592261	322871	322871	791772
29	571302	320994	320994	740203
30	546765	449842	449842	657342
31	772357	748304	748304	866263
32	500951	616873	616873	809326
33	225789	107734	107734	838505
34	519143	445305	445305	949471
35	438580	579247	579247	560723
36	478366	459962	459962	467983

Tabela 5 – Demandas dos elos FMX e ARMS

#### 4.4 Análises das Demandas

A natureza da demanda ao longo do tempo exerce um papel significativo na cadeia de suprimentos. Talvez a característica mais comum da demanda seja aquela que se mantém num mesmo padrão por longo período. O padrão de demanda é chamado de Estacionário. Embora a demanda para a maioria dos produtos aumente e diminua através de seus ciclos de vida, muitos produtos têm uma vida de vendas suficientemente longa para ser considerada constante para fins de planejamento.

A análise não depende de quantos consumidores o nó possua, uma vez que as demandas de todos os consumidores podem ser agrupadas em uma única demanda.

Por outro lado, alguns produtos são altamente sazonais ou têm padrões de demanda ou um período de pico. A demanda também pode indicar um padrão irregular ou errático. A demanda pode ser estacionária, mas há períodos de pouca ou nenhuma demanda seguida por períodos de alta demanda. O sincronismo da demanda

não é tão previsível quanto para a demanda sazonal, que ocorre geralmente nos mesmos períodos todos os anos. Há produtos cuja demanda termina em algum tempo previsível no futuro, que é geralmente mais longo que um ano. O planejamento do estoque aqui envolve manter estoques para satisfazer apenas as necessidades da demanda, mas algum repedido dentro do horizonte limitado de tempo é permitido.

Vamos agora verificar se as amostras dos dados satisfazem as exigências do nosso problema. Para isto vamos fazer o teste de aderência das amostras, para uma distribuição normal.

#### 4.5 Gráficos das demandas

##### 4.5.1 Compras ARMS

Os gráficos das figuras 37 e 38 apresentam o comportamento das compras de 2001 – 2003, com comportamento de períodos de pico com tendências perpétuas, constituídas de picos de consumo sazonais. No gráfico da figura 38 temos o comportamento das compras realizadas por ARMS

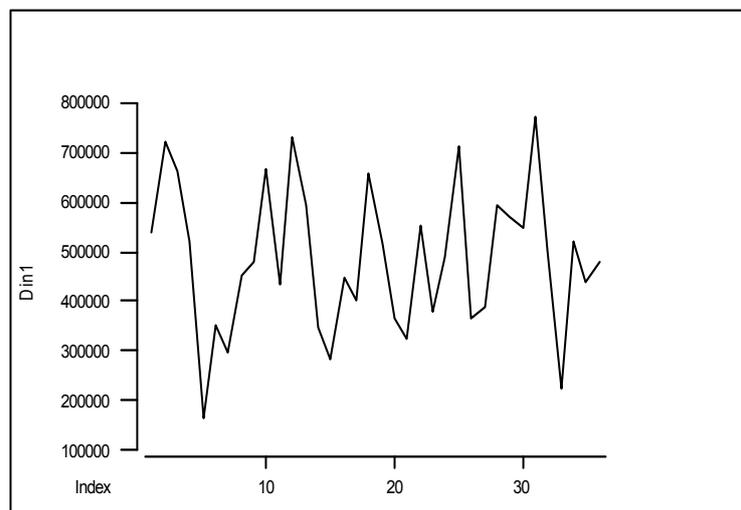


Figura 37 - Demanda Din vs tempo de ARMS

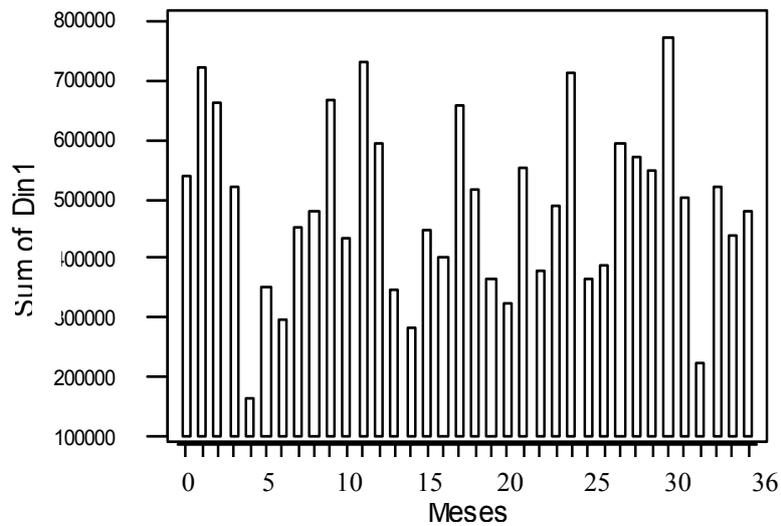


Figura 38 - Diagrama de barras Din

Histograma de  $D_{in}$  com Curva Normal

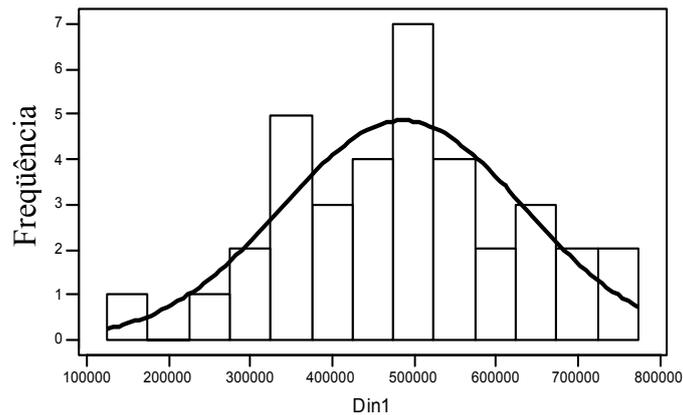


Figura 39 - Histograma com curva normal

Na figura 39 pode-se notar visualmente pelo histograma que os dados podem ser aproximados a uma distribuição normal e a curva normal tem uma simetria razoável com as barras do histograma para supor que a amostra segue uma distribuição normal.

Porém esta observação importante não é efusiva o suficiente para afirmar que a amostra é iid.

Pode-se usar o histograma dos dados revestido com uma curva normal para avaliar a normalidade de seus dados. Uma distribuição normal é simétrica e “sino-

amoldado”, como indicado pela curva. (Nota-se que a curva é truncada nas bordas do gráfico). É muito difícil de avaliar a normalidade com amostras pequenas. Usualmente uma amostra deve conter no mínimo 30 dados.

Se os dados forem perfeitamente normais, então a mesma aponta no caso de probabilidade formação de uma linha direta figura (40). A linha de mínimos-quadrados é exibida como uma referência.

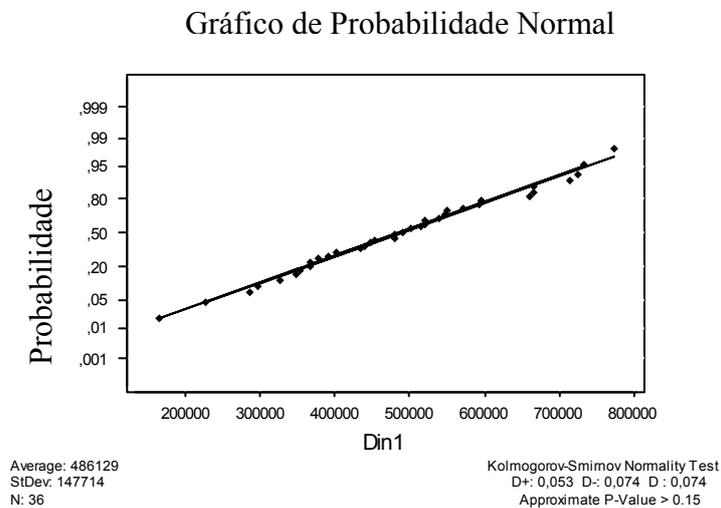


Figura 40 - Gráfico de Probabilidade Normal

O gráfico foi gerado com um teste de normalidade de Anderson - Darling, porém, o mesmo gráfico é gerado embora para qualquer teste que se opte. No caso, o gráfico mostra que os pontos caem razoavelmente perto da linha de referência, enquanto indicando que os dados são bastante normais.

Os testes de normalidade avaliam a hipótese nula ( $H_0$ ) que os dados normalmente são distribuídos. Se o valor de “p” para o teste for menor que seu nível “ $\alpha$ ” escolhido, então, tem que ser rejeitada “ $H_0$ ” e concluir que seus dados não são normalmente distribuídos.

Na figura 41 o valor de “p” para o teste de normalidade de Anderson - Darling (coluna direita da figura 41) dos dados é 0.947. Este valor é maior que o nível “ $\alpha$ ” escolhido de 0.10, assim não será rejeitada “ $H_0$ ”. Conclui-se que há bastante evidência para sugerir que os dados são normalmente distribuídos.

Os testes Ryan-Joiner e Kolmogorov-Smirnov produzem resultados semelhantes. O teste de Ryan-Joiner produz um valor de p aproximado  $> 0.10$ , e o teste de Kolmogorov-Smirnov produz um valor de p aproximado  $> 0.15$ .

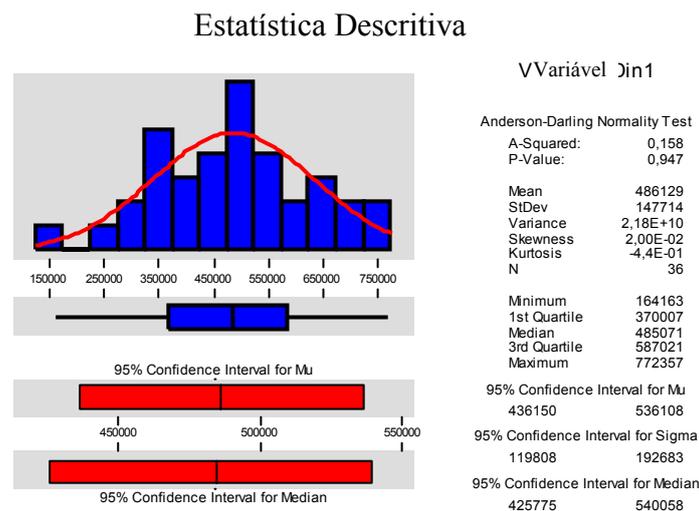


Figura 41 - Gráfico sumário

Para os dados das demandas Din2, Dout1 e Dout2 as mesmas análises foram feitas baseadas nos gráficos das figuras que se encontram no Anexo 4.

#### 4.6 Cálculo convencional do chicoteamento

O cálculo do chicoteamento para dois elos pode ser realizado convencionalmente conforme (Fransoo & Wouters, 2000):

$A = \frac{C_{out}}{C_{in}}$  (100), onde A é o fator de amplificação em cada elo e  $C_{out}$  e  $C_{in}$  são os

coeficientes de variação das demandas na entrada e na saída de cada elo.

Onde:

$$C_{out} = \frac{\sigma(D_{out}(t, t+T))}{\mu(D_{out}(t, t+T))} \quad (101) \quad \text{e} \quad C_{in} = \frac{\sigma(D_{in}(t, t+T))}{\mu(D_{in}(t, t+T))} \quad (102)$$

$D_{out}(t, t+T)$  e  $D_{in}(t, t+T)$  são os valores das demandas e das vendas, respectivamente, durante o intervalo de tempo  $(t, t+T)$ . Os valores de  $C_{in}$  e  $C_{out}$  representam o nível de dispersão por unidade da média em cada elo.

Assim, os cálculos são:

#### **Elo ARMS:**

$$C_{in} = \sigma/\mu = 147714/486129 = 0.30386$$

$$C_{out} = \sigma/\mu = 179739/518275 = 0.34680$$

$$A_1 = C_{in}/C_{out} = 1.1413$$

#### **Elo FMX:**

$$C_{in} = \sigma/\mu = 179739/518275 = 0.34680$$

$$C_{out} = \sigma/\mu = 197871/541458 = 0.36544$$

$$A_2 = C_{in}/C_{out} = 1.0537.$$

O efeito de chicoteamento total para os dois elos é:

$$A_{total} = A_1 \cdot A_2 \quad \Rightarrow \quad A_{total} = 1,1413 \times 1,0537 = 1,2026.$$

A limitação desse método é que diferenças consideráveis na medida do efeito do chicoteamento podem ocorrer se uma sucessão diferente de dados agregados for aplicada. A seqüência de dados agregados precisa ser baseada no problema específico de investigação (Fransoo, Wouters, 2000) e (Metters, 1997).

A medida precisa ser determinada separadamente para cada nível. Além disso, a medida precisa ser filtrada, considerando quais meios deveriam ser analisados e quais partes do efeito global são os resultados de diferentes causas.

Dados da demanda que podem estar incompletos e dados isolados da demanda podem ser intratáveis, desde que empresas normalmente tenham fornecedores e clientes fora de uma cadeia definida de investigação.

No estudo realizado, constatou-se que o efeito de chicoteamento se deve, principalmente, ao processo de sinalização da demanda, porém, outras três causas tais como, jogo de racionamento, lote de pedidos e variação de preço, também são responsáveis pela distorção da informação e variabilidade da demanda. Sendo assim, algumas medidas são propostas com a finalidade de minimizar esse efeito, tornando-o menos significativo na cadeia de suprimentos.

Pelos testes de normalidade e sendo as amostras se aproximam de uma distribuição normal, vamos partir agora para a modelagem dos elos conhecidos.

## **4.7 Modelagem e Cálculo do Chicoteamento por Engenharia de Controle**

### **4.7.1 Função de Transferência**

Os dados de entrada e saída de nossas plantas são discretos não sendo necessária a operação de discretização.

No caso do elo de uma cadeia de suprimento (Chen, 2000), sugere que  $F(z)$  pode ser um suavizador exponencial da forma:

$$F(z) = \frac{a}{z - b} = \frac{az^{-1}}{z^{-1}(z - b)} \Rightarrow F(z) = \frac{az^{-1}}{1 - bz^{-1}}, \text{ que é a equação (99).}$$

Usando a equação 99 e a tabela das demandas, podem ser calculados os coeficientes “a” e “b” das funções de transferência dos elos ARMS e FMX.

Usando o método dos mínimos quadrados no MATLAB, achamos a e b que são os coeficientes do nosso filtro.

Assim temos: **(Ver apêndice 2)**

**Estágio ARMS:**

**Parâmetros 1 :**

$$a_1 = 0.4691; \quad b_1 = 0.4970$$

**parâmetros 2 :**

$$a_2 = 0.1024; \quad b_2 = 0.8949$$

As Funções de Transferência dos dois elos agora podem ser escritas conforme:

**Elo ARMS**

$$F_1(z) = \frac{a_1 z^{-1}}{1 - b_1 z^{-1}} \quad \Rightarrow \quad F_1(z) = \frac{0,4691z^{-1}}{1 - 0,44970z^{-1}}$$

**Elo FMX**

$$F_2(z) = \frac{a_2 z^{-1}}{1 - b_2 z^{-1}} \quad \Rightarrow \quad F_2(z) = \frac{0,1024z^{-1}}{1 - 0,8949z^{-1}}$$

**4.8 Simulação modelo do estágio ARMS**

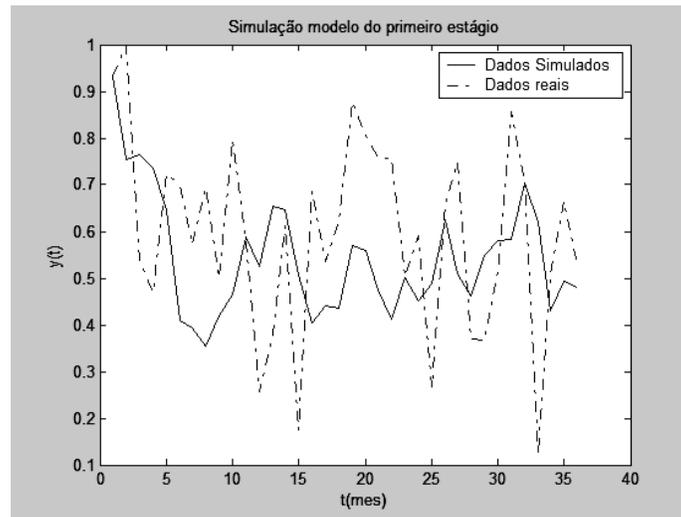


Figura 42 – Simulação 1º Estágio

Observa-se pelo gráfico (Figura 42) uma suavização na demanda, cadeia acima.

## 4.9 Simulação modelo do estágio FMX

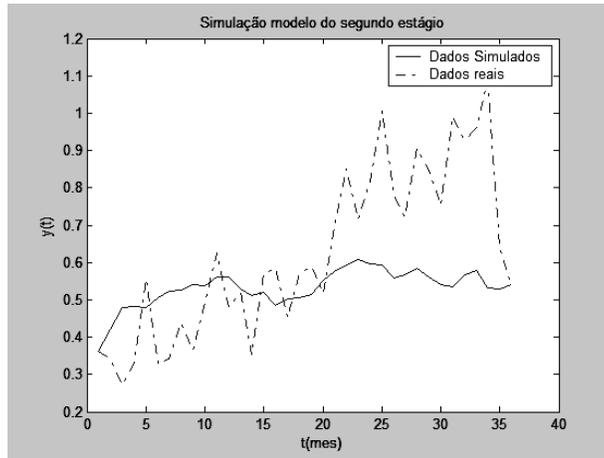
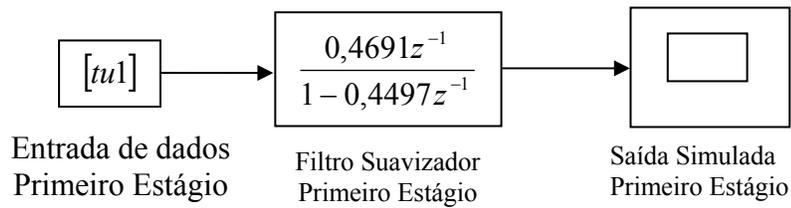


Figura 43 - Simulação 2º Estágio

Os estágios 1 e 2 referem-se aos elos cadeia acima sendo ARMS e FMX respectivamente.

A Figura 43 mostra uma suavização da demanda no 2º estágio.

### Elo 1:



Saída estágio ARMS simulada

Figura 44 - Bloco 1º Estágio

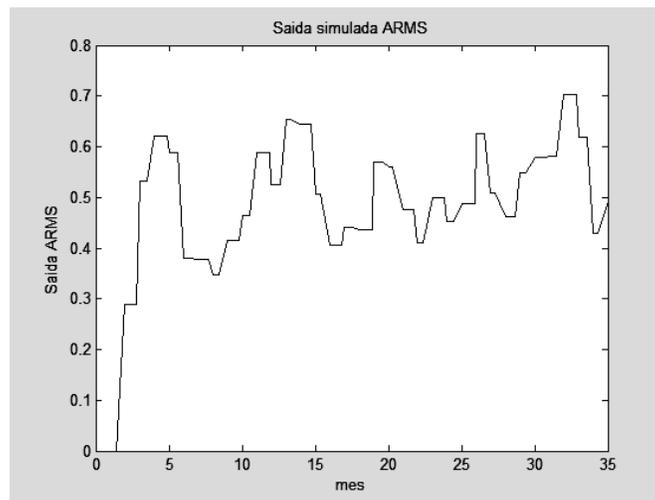


Figura 45 - Simulação saída 2 Estágio

A função de transferência  $F_1(z) = \frac{0,4691z^{-1}}{1 - 0,4970z^{-1}}$  possui um pólo e um zero em  $z = 0$  e em  $z = 0,4970$  respectivamente.

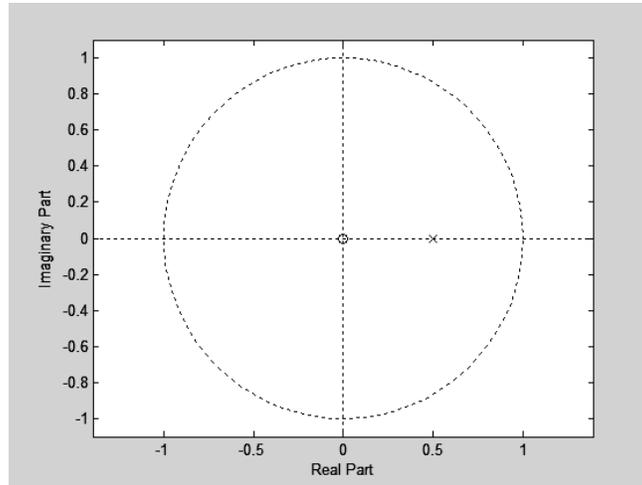


Figura 45 - Zeros e polos da  $F_1(z)$

O sistema é estável, pois o pólo se encontra dentro da região do círculo.

O gráfico da  $|F_1(z)|$  em função da frequência é:

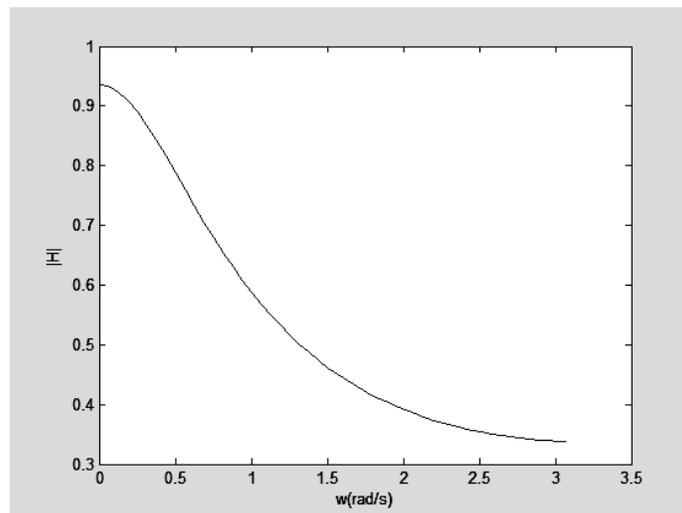


Figura 46 - Função de Transferência vs Frequência

Comparando o gráfico do Elo1 e o suavizador proposto por Chen temos:

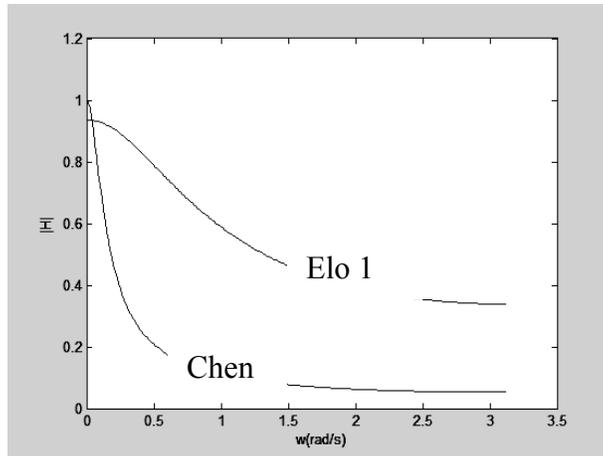


Figura 47 - Suavizador proposto por Chen (2000)

Pelo gráfico da figura 48 verifica-se uma atenuação para altas frequências, ou seja, para amplitudes maiores.

**Elo 2:**

Simulando o elo FMX temos o diagrama de bloco e o gráfico:



Figura 48 - Diagrama de bloco do 2 Estágio

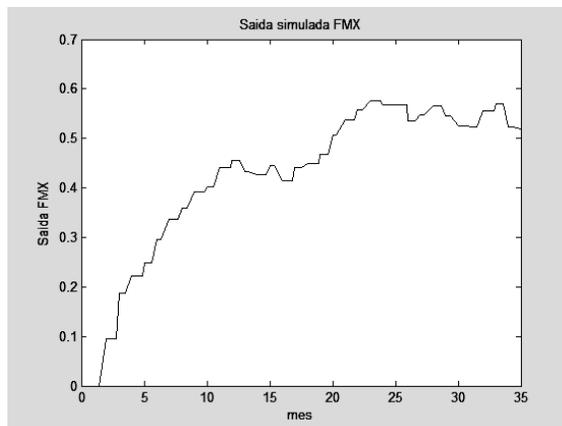


Figura 50 - Saída simulada do 2 Estágio

Analisando a função de transferência  $F_2(z) = \frac{0,1024 z^{-1}}{1 - 0,8949 z^{-1}}$ , tem-se o gráfico:

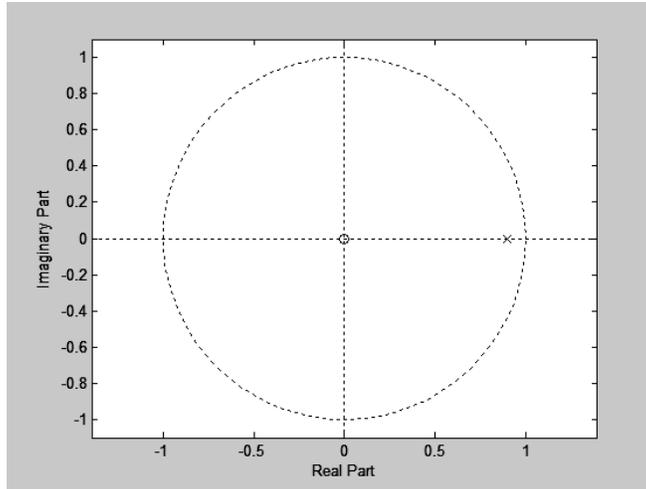


Figura 49 - Zeros e pólos de  $F_2(z)$

No gráfico temos um “zero” e um “pólo” em  $z = 0$  e em  $z = 0,8949$  respectivamente. O sistema é estável pois  $|FT_2| < 1$ , ou seja, o pólo é interno ao círculo unitário.

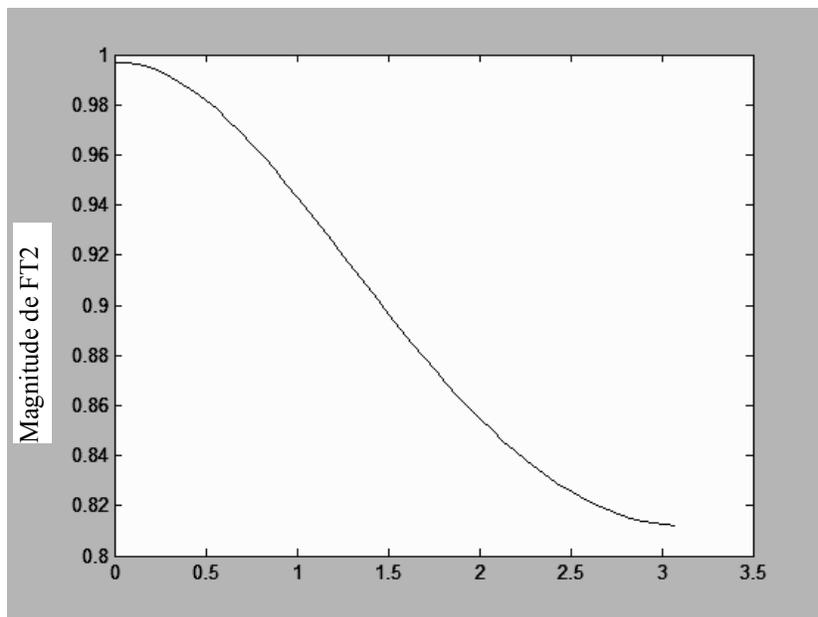


Figura 50 –  $FT_2$  vs frequência

Este gráfico informa a magnitude da função de transferência em função da frequência. O estágio 2 é mais atenuante que o estágio 1.

#### 4.10 Simulação dos 2 elos em cascata

Parte da nossa cadeia acima com os dois elos agora é:

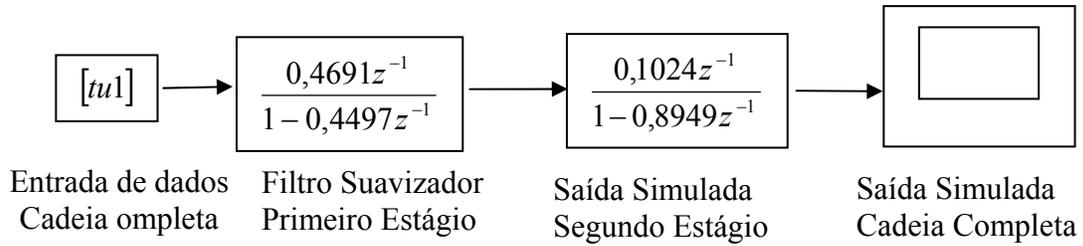


Figura 51 - Diagrama de blocos da cadeia parcial

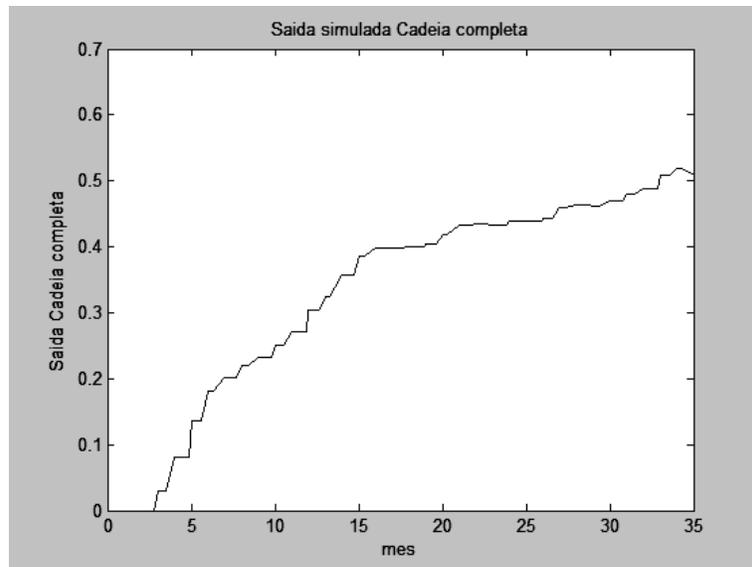


Figura 52 - Simulação saída da cadeia parcial

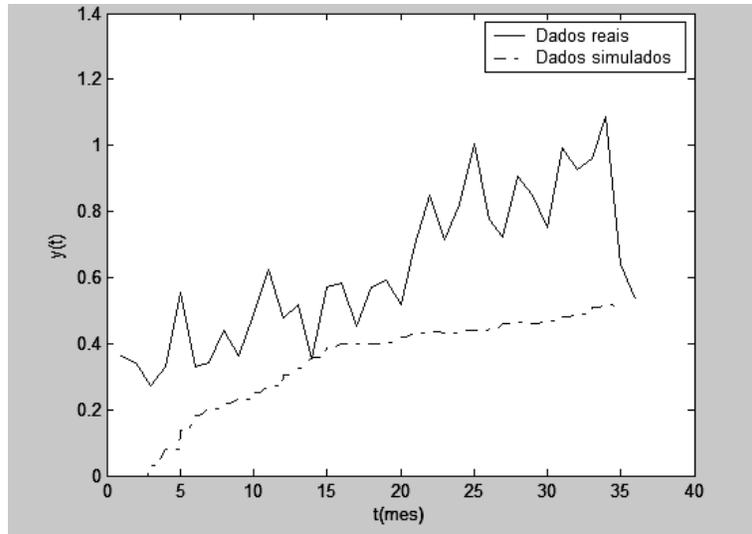


Figura 53 - Simulação cadeia parcial

Além dos estágios individuais, é também simulada a cadeia de suprimento completa, onde pode ser visto que o ganho entre o primeiro pedido e a saída, basicamente é constante, o que caracteriza uma suavização do pedido e uma tendência a ganho unitário.

Em nosso modelo ainda não foi colocada nenhuma malha de controle levando em conta o lead-time de pedidos e de produção, além de considerações sobre controle de estoque.

O ganho de cada suavizador é  $A = \frac{a}{1-b}$ , e portanto em cascata o ganho ou amplificação é de aproximadamente 1.

$$A_T = A_1 \times A_2 = \frac{0.4691}{1 - .4970} \times \frac{0.1024}{1 - 0.8949} = 0.9326 \times 0.9743 = 0.9086$$

Vamos agora desenvolver uma malha de controle que envolva o controle de estoque conforme política de pedidos OUT.

#### 4.11 Malha de Controle de Estoque

Seja o diagrama:

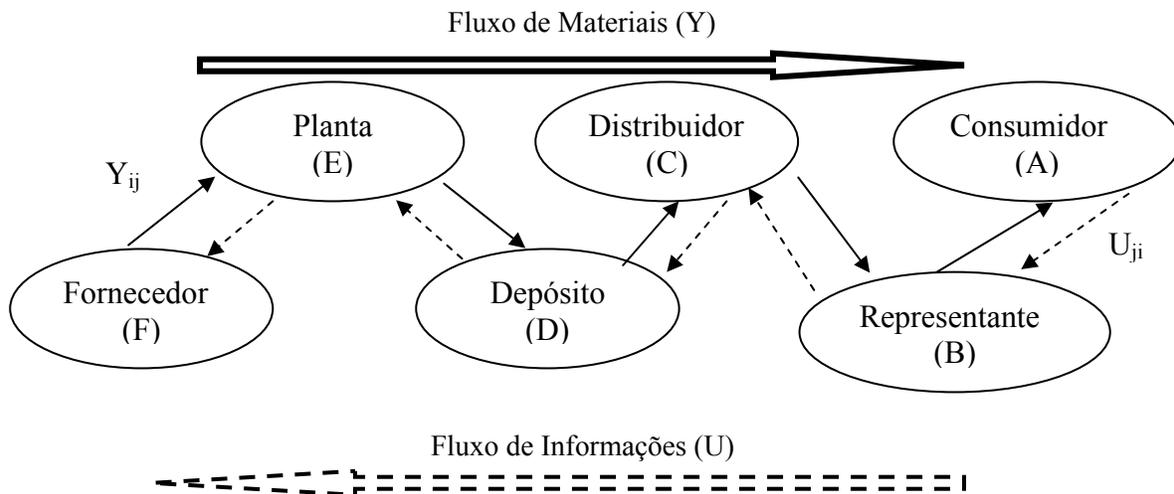


Figura 54 - Modelo de cadeia para malha de controle de estoque

Sejam:

- m)  $ij \in \{ED, DC, CB, BA\}$ ;
- n)  $ji \in \{DE, CD, BC, AB\}$ ;
- o)  $j \in \{B, C, D\}$ ;
- p)  $jk \in \{DC, CB, BA\}$ ;
- q)  $Y_{ij}$ , quantidades de bens entregues ao nó  $j$  pelo elo à montante;
- r)  $O_j$ , quantidade de pedidos em aberto pelo nó  $j$ ;
- s)  $IP_j$ , posição do estoque do nó  $j$ ;
- t)  $I_j$ , balanço do estoque do nó  $j$ ;
- u)  $U_{ji}$ , pedidos realizados pelo nó  $j$  para o elo a montante;
- v)  $BO_j$ , quantidade de bens realmente entregues;
- w)  $Y_{jk}$ , pedidos entregues ao nó à jusante;
- x)  $SP_j$ , set point é a referência ou posição do estoque.

#### 4.11.1 As equações de controle de estoque

Balanço de estoque:

$$I_j(t) = I_j(t-1) + Y_{ij}(t-L) - Y_{jk}(t)$$

onde L é o lead time de entrega.

A posição do estoque será:

$$IP_j = IP_j(t-1) + Y_{ij}(t) - Y_{jk}(t)$$

A quantidade de pedidos feitos pelo nó j é:

$$U_{ji}(t) = K_j \times (SP_j(t) - IP_j(t))$$

onde  $K_j$  deve ser menor que 2.

Pedidos em aberto para cada nó j:

$$O_j = U_{kj}(t) + O_j(t-1) - Y_{jk}(t)$$

Controle de entrega ou não de pedidos a jusante:

$$Y_{jk} = \begin{cases} 0 & O_j(t-1) \leq 0 \\ O_j(t-1) & 0 \leq O_j(t-1) \leq I_j(t-1) \\ I_j(t-1) & 0 \leq I_j(t-1) \leq O_j(t-1) \end{cases} .$$

Quantidade de bens realmente entregue:

$$BO_j(t) = O_j(t-1) - Y_{jk}(t)$$

Usando a transformação simples do plano s para o plano z temos:

$$I_j(t) = I_j(t-1) + Y_{ij}(t-L) - Y_{jk}(t) \Rightarrow$$

$$I_j(z) = I_j(z)z^{-1} + Y_{ij}(z)z^{-L} - Y_{jk}(z) \Rightarrow I_j(z)(1 - z^{-1}) = Y_{ij}z^{-L} - Y_{jk}(z) \Rightarrow$$

$$I_j(z) = \frac{z}{z-1} (Y_{ij}(z)z^{-L} - Y_{jk}(z))$$

e assim sucessivamente,

$$IP_j(z) = \frac{z}{z-1}(Y_{ij}(z) - Y_{jk}(z))$$

$$O_j(z) = \frac{z}{z-1}(U_{kj}(z) - Y_{jk}(z))$$

$$U_{ji}(z) = K_j \times (SP_j(z) - IP_j(z))$$

$$Y_{jk}(z) = \begin{cases} 0 & z^{-1}O_j(z) \leq 0 \\ z^{-1}O_j(z) & 0 \leq z^{-1}O_j(z) \leq z^{-1}I_j(z) \\ z^{-1}I_j(z) & 0 \leq z^{-1}I_j(z) \leq z^{-1}O_j(z) \end{cases}$$

Com estas equações e com a função de transferência Temo um elo completo com previsão de demanda com baixo efeito de chicoteamento ilustrado na Figura 61.

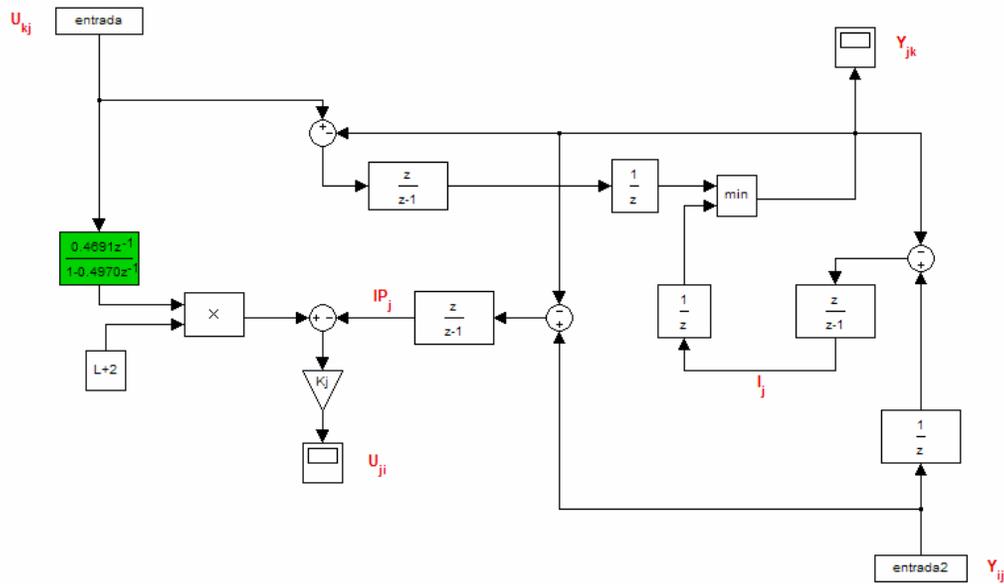


Figura 55 - Elo ARMS com malha de controle de estoque

Onde  $F(z)$  é a expressão do suavizador exponencial obtida através dos regressores, que são as entradas e saídas de cada elo.

#### 4.11.2 Simulação de um elo com malha de controle de estoque

As figuras (58) e (59) mostram a simulação do elo ARMS com malha de controle de estoque para  $L = 1$  e  $K = 0.9$ .

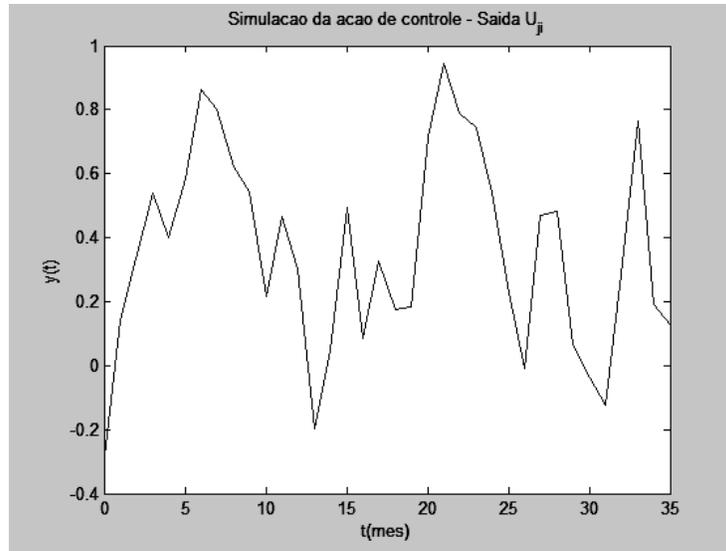


Figura 56 - simulação da ação de controle  $U_{ji}$

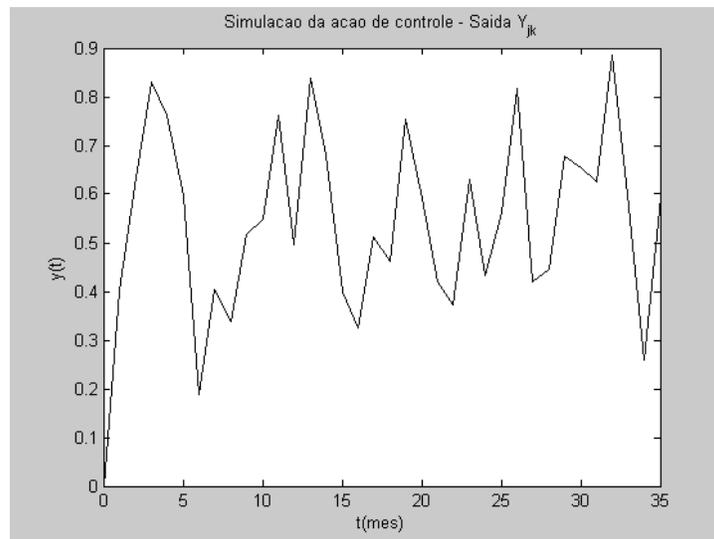


Figura 57 - simulação da ação de controle  $Y_{jk}$

Para  $L = 5$  e  $K = 4$  a simulação é mostrada nos gráficos (60) e (61).

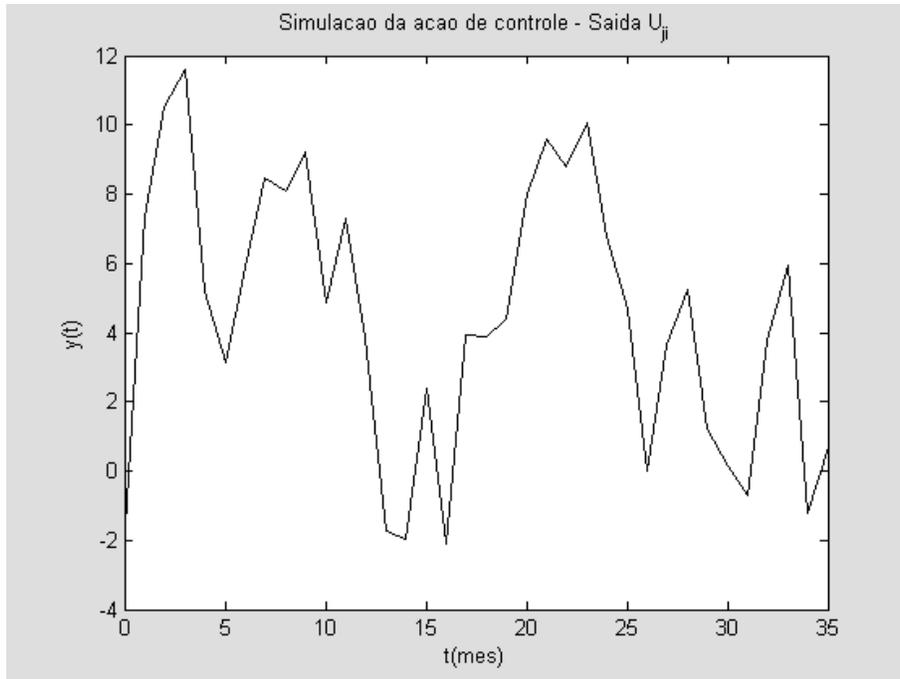


Figura 58 - Simulação da ação de controle de  $U_{ji}$

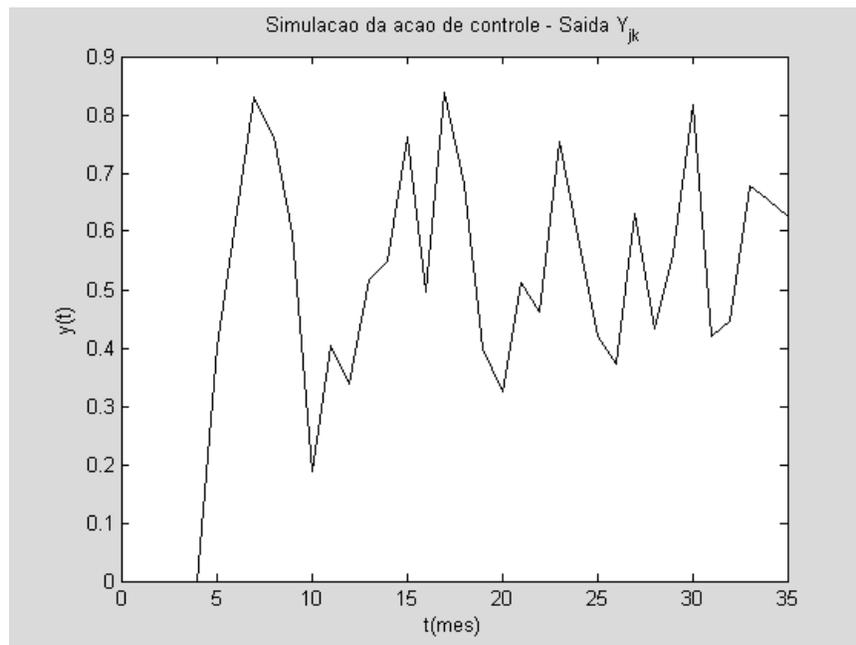


Figura 59 - simulação da ação de controle  $Y_{jk}$

Se  $K_j < 1$ , a magnitude pode realmente ser reduzida ao longo da cadeia. Mas qual seria o incentivo para que gerentes emitissem menos pedidos do que o necessário para alcançar a

meta do estoque se esta meta é grande o suficiente para que a segurança do estoque seja capaz de cobrir todas as flutuações de demanda a curto-prazo. Emitir ordens de compra um pouco menores do que aquilo que é necessário pode reduzir o estoque sem sacrificar a satisfação do consumidor. Portanto, os administradores do elo de distribuição implementarão ordens de compra menos agressivas se eles estiverem confiantes de que a meta para a posição de estoque é boa o suficiente para satisfazer as tendências de demanda a longo-prazo.

Se  $K_j > 1$  produzira pequenos aumentos nas flutuações de demanda, porém se  $K_j > 2$  poderá ocasionar instabilidade do elo (filtro) desencadeando um processo crescente na sinalização da mesma. O lead time  $L > 2$  também causa instabilidade do sistema.

Valores práticos de  $L$  e  $K_j$  para que o sistema além de estável suavize satisfatoriamente a variabilidade da demanda são:  $L = 1$  e  $0.7 < K_j < 1.1$ .

## CAPÍTULO 5

### 5.1 Conclusão

Esta dissertação apresentou uma solução analítica ao problema de chicoteamento para uma política de pedidos específica. Mostrou conclusivamente que o modo para minimizar o problema de chicoteamento para uma dada política de pedidos é aumentar o tempo comum de previsões e reduzir a taxa à qual estoque e correção de WIP, são importantes na produção-distribuição-pedido. Isto pode ser alcançado sem efetivamente influir indevidamente na variância de estoque. Foi realçado o valor de Paradigma de Compressão de Tempo como medida que efetivamente significa reduzir o efeito de chicoteamento em políticas de pedidos.

Uma expressão analítica para variância de estoque também foi derivada e foi investigada. Analistas podem explorar este procedimento facilmente e determinar o chicoteamento na variância de estoque sem recorrer para teoria de controle desde que seja levado a cabo, agora, por simulação em um ambiente de planilha eletrônica. A relação entre chicoteamento e a medida de largura de faixa de ruído foi investigada.

Deve ser salientado, que métodos de controle de estoque e sistemas de pedidos, usando sistemas de controle discreto é muito eficiente para qualquer que seja a causa, ou causas, que originaram o efeito de chicoteamento, sendo esta uma das grandes contribuições do presente trabalho.

Outra contribuição está na capacidade do sistema de controle de se adequar às mudanças de cenário de forma robusta, pois, para cada demanda de entrada no sistema, implicará numa saída dependente de informações passadas e presentes de forma suave e exponencial e estável.

Uma política de reposição contínua de pedidos para um nó de distribuição em uma cadeia de suprimentos foi analisada utilizando a transformada  $z$ . Equações características de malha fechada foram derivadas. Daí investigou-se a estabilidade do sistema analisando o efeito de chicoteamento.

Este estudo mostra que o efeito de chicoteamento é inevitável se é empregada política de pedidos baseada em heurística com previsão de demandas. Várias políticas de pedidos foram formuladas com controladores P, PI e controle em cascata. Diretrizes baseadas em sintonia de controlador foram utilizadas.

Ao se implementar um controlar PI, o efeito de chicoteamento pode ser eliminado, mas tendências a longo-prazo de demanda de consumidores devem ser acompanhadas.

Um controlador em cascata não apenas fornece ao elo da cadeia de suprimentos a eliminação do efeito de chicoteamento, mas também aumenta a satisfação do cliente ao seguir a demanda do consumidor.

A limitação do modelo é que na análise foi considerada uma cadeia de suprimento simples, ou seja, nesta modelagem analisou-se uma cadeia constituída em cada nível de apenas um elo tanto a montante como a jusante. Na realidade uma cadeia é um sistema muito mais complexo.

A engenharia de controle abre um horizonte de aplicações em logística, no que se refere à otimização, com ferramentas até então não utilizadas, com modelos dinâmicos através de controle digital, constituindo-se num instrumento de apoio à decisão, quando o número de variáveis é elevado. É uma ferramenta importante para futuras pesquisas.

## 6. Referência Bibliográfica

ALBINO, V., GARAVELLI, A.C., GIANNOCCARO, I., 2002. Process and logistics flexibility for the supply chain management. Proceedings of the Seventh International Symposium on Logistics and Fifth International Symposium on Operations Strategy, Melbourne, Australia, 14–17 July.

BHATNAGAR, R., CHANDRA, P., GOYAL, S.K., 1993. Models for multiplant coordination. *European Journal of Operational Research* 67, 141–160.

BHATTACHARYA, A. K.; COLEMAN, J. L.; BRACE, G.. Re-positioning the supplier: an SME perspective. *Production Planning & Control*, 1995, vol. 6, n.º. 3, 218-226.

BURTON, M. H.; MURALEETHARAN, M.; GARCIA, J.G. Generalised filters 1. *Fuzzy Sets and Systems*, v. 106, n. 2, p. 275-284, set. 1999.

BYRDA, T. A.; DAVIDSON, N. W. Examining possible antecedents of IT impact on the Cardi. *University* 27, n. 8/9, p. 1201-1218, set. 2003.

CHATFIELD, C., 1996. *The Analysis of Time Series: An Introduction Texts in Statistical Sciences*. Chapman & Hall, London, p. 283.

CHEN, C.-F., EGBELU, P.J., WU, C.T., 1994. Production planning models for a central factory with multiple satellite factories. *International Journal of Production Research* 32 (6), 1431–1450.

CHEN, F., DREZNER, Z., RYAN, J., SIMCHI-LEVI, D., 2000a. Quantifying the bullwhip effect in a simple supply chain: The impact of forecasting, lead times, and information. *Management Science* 46 (3), 436–443.

CHEN, F., RYAN, J., SIMCHI-LEVI, D., 2000b. The impact of exponential smoothing forecasts on the bullwhip effect. *Naval Research Logistics* 47 (4), 271–286.

CHILDERHOUSE, P.; TOWILL B, D. R. Simplified material flow holds the key to supply chain integration. *Omega: The International Journal of Management Science*, v. 31, n.1, p. 17-27, fev. 2003.

CHRISTOPHER, M., 1992. *Logistic and Supply Chain Management*. Pitman, London.

DEFATA, LUCAS, HODGKISS, DSP – A systems design approach. John Wiley & Sons, 1988.

DEJONCKHEERE J, DISNEY SM, LAMBRECHT MR, TOWILL DR. Measuring and avoiding the bullwhipelect: A control theoretic approach. *European Journal of Operational Research* 2003;147(3):567–90.

DEJONCKHEERE J, DISNEY SM, LAMBRECHT MR, TOWILL DR. The impact of information enrichment on the bullwhip effect in supply chains: A control engineering perspective. Forthcoming in the *European Journal of Operational Research*

DEJONCKHEERE, J., DISNEY, S.M., FARASYN, I., JANSSEN, F., LAMBRECHT, M., TOWILL, D.R., VAN DE VELDE, W., 2002. Production and Inventory Control: The variability trade-o.. Proceedings of the 9th EUROMA Conference, 2–4 June, Copenhagen, Denmark,

DEJONCKHEERE, J.; DISNEY, S. M.; LAMBRECHT, M. R.; TOWILL, D. R. The impact of information enrichment on the Bullwhip effect in supply chains: A control engineering perspective. *European Journal of Operational Research*, p. 1-24, 2003.

DEJONCKHEERE, J.; DISNEY, S.M; LAMBRECHT, M.R.; TOWILL, D.R. Transfer function analysis of forecasting induced bullwhip in supply chains. *Int. J. Production Economics*, v. 78, n. 2, p. 133-144, jul. 2002.

DEJONCKHEERE, J.; DISNEY,S.M.; LAMBRECHT, M.R.; TOWILL, D.R. Measuring and avoiding the bullwhip effect: A control theoretic approach. *European Journal of Operational Research*, v. 147, n. 3, p. 567–590, jun. 2003.

DEZIEL, D.P., EILON, S., 1967. A linear production-inventory control rule. *The Production Engineer* 43, 93–104.

DISNEY SM, NAIM MM, TOWILL DR. Dynamic simulation modelling for lean logistics. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management* 1997;27(3):174–96.

DISNEY SM, NAIM MM, TOWILL DR. Dynamic simulation modelling for lean logistics. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management* 1997; 27(3):174–96.

DISNEY, S. M; TOWILL, D. R. The effect of vendor managed inventory (VMI) dynamics on the Bullwhip Effect in supply chains. *Internatinal Journal of Production Economics*, v. 85, n.2, p. 199-215, Ago. 2003.

DISNEY, S.M., 2001. The production and inventory control problem in Vendor Managed Inventory supply chains, Ph.D. Thesis, Cardiff University, UK.

DISNEY, S.M., 2001. The production and inventory control problem in Vendor Managed Inventory supply chains, Ph.D. Thesis, Cardiff University, UK.

DISNEY, S.M., 2001. The production and inventory control problem in Vendor Managed Inventory supply chains, Ph.D. Thesis, Cardi. University, UK.

DISNEY, S.M., TOWILL, D.R., 2001a. A discrete transfer function model to determine the dynamic stability of a Vendor Managed Inventory supply chain. *International Journal of Production Research* 40 (1), 179–204.

DISNEY, S.M., TOWILL, D.R., 2001b. A procedure for the optimization of the dynamic response of a Vendor Managed Inventory system. *Computers and Industrial Engineering* 43 (1), 7–58.

DISNEY, S.M., TOWILL, D.R., 2002. A robust and stable analytical solution to the production and inventory control problem via a z-transform approach. *Proceedings of the 12th International Working Conference on Production Economics*, vol. 1. ISSN 0925 5273, Igls, Austria, 18–22 February, pp. 37–47.

DORNIER PP, ERNST R, FENDER M, KOUVELIS P. *Global operations and logistics—text and cases*. New York: Wiley, 1998.

DORNIER PP, ERNST R, FENDER M, KOUVELIS P. *Global operations and logistics—text and cases*. New York: Wiley, 1998.

DUCLOS, L.K., LUMMUS, R.R., VOKURKA, R.J., 2001. A conceptual model of supply chain flexibility, *Proceedings of the Paper Presented at the 32th Decision Science Institute Annual Meeting*, San Francisco, USA, November 17–20.

EGBELU, P.J., 1991. Batch production time in a multi-stage system with material handling consideration. *International Journal of Production Research* 29 (4), 695–712.

EVANS, G. N., TOWILL, D. R., AND MAIM, M. M., 1994. Business process re-engineering the supply chain. *Production Planning and control*. 6, 227 – 237

FORRESTER, J., 1958. Industrial dynamics, a major breakthrough for decision makers. *Harvard Business Review* July–August, vol. 36,37–66.

FORRESTER, J., 1961. *Industrial Dynamics*. MIT Press, Cambridge MA.

FRANSOO, J. C.;WOUTERS, M. J. F.. Measuring the bullwhip effect in the supply chain. *International Journal of Supply Chain Management*, 2000, 5 (2), 78 – 89.

GARAVELLI, A. C. Flexibility configurations for the supply chain management. *Int. J. Production Economics*, v. 85, n. 2, p. 141–153, ago. 2003.

GIANNOCCARO, I.; PONTRANDOLFO, P. Inventory management in supply chains: a reinforcement learning approach. *Int. J. Production Economics*, v. 78, n. 2, p. 153-161, jul 2002.

GRUBBSTROM RW. Stochastic properties of a production-inventory process with planned production using transform methodology. *International Journal of Production Economics* 1996;45:407–19.

HOEKSTRA, J. ROMME, *Integral Logistics Structures: Developing Customer-Oriented Goods Flows*, McGraw-Hill, London, 1992.

INGER, ROD; BRAITHWAITE, A.; CHRISTOPHER, M.. Creating a manufacturing environment that is in harmony with the market – the “how” of supply chain management. *Production Planning & Control*, 1995, vol. 6, n°. 3, 246 – 257.

J.W. FORRESTER, *Industrial Dynamics*, MIT Press, Cambridge, Ma, 1961.

JOHANSSON, H.J, MCHUGH. P., PENDLEBURY. A.J., AND WHEELER. W.A., 1993. *Business Process Reengineering – Breakpoint Strategies for Market Dominance*: Wiley.

JOHN, S., NAIM, M.M., TOWILL, D.R., 1994. Dynamic analysis of a WIP compensated decision support system. *International Journal Manufacturing System Design* 1 (4), 283–297.

JOHN, S., NAIM, M.M., TOWILL, D.R., 1994. Dynamic analysis of a WIP compensated decision support system. *International Journal Manufacturing System Design* 1 (4), 283–297.

JOHNSON, M., DAVIS, T., WALLER, M., 1999. Vendor managed inventory in the retail supply chain. *Journal of Business Logistics* 20 (1), 183–203.

KOGUT, B., KULATILAKA, N., 1994. Operating flexibility, global manufacturing, and the option value of a multinational network. *Management Science* 40 (1), 123–139.

LAMMING. R., 1993. *Beyond Partnership: Strategies for Innovation and Lean Supply*. Prentice Hall. Pp. 178-211.

LEE, H.L., PADMANABHAN, V., WHANG, S., 1997a. The Bullwhip effect in supply chains. *Sloan Management Review* Spring 38 (3), 93– 102.

LEE, H.L., PADMANABHAN, V., WHANG, S., 1997b. Information distortion in a supply chain: The bullwhip effect. *Management Science* 43 (4), 546–558.

LEE, H.L., SO, K.C., TANG, C.S., 2000. The value of information sharing in a two level supply chain. *Management Science* 46 (5), 628–643.

LEE, L. HAU; PADMANABHAN, V.; WHANG, S.. Information Distortion in a Supply Chain: The Bullwhip Effect. *Management Science*, vol. 43, n°. 4, Stanford, April 1997.

LIN, PIN-HO; WONG, D. SHAN-HILL; JANG; SHIEH; CHU. Controller design and reduction of bullwhip for a model supply chain system using z-transform analysis. *Journal of Process Control* 14. Beijing, set. 2003.

LINDBERG. P., AND TRYGG. L., 1991, Manufacturing strategy in the value system. *International Journal of Operations and Production Management*, 52-61.

LYONS, T.F., KRACHENBERG, A.R., AND HENKE JR., J.W., 1990, Mixed motive marriages: what's next for buyer-supplier relations? *Sloan Management Review*. Spring, 29-36

MAKRIDAKIS, S., WHEELWRIGHT, S.C., MCGEE, V.E., 1978. *Forecasting: Methods and Applications*. John Wiley & Sons, New York.

MASON-JONES, R., TOWILL, D.R., 1997. Information Enrichment: Designing the supply chain for competitive advantage. *International Journal of Supply Chain Management* 2 (4), 137–148.

METTERS, R. Quantifying the bullwhip effect in supply chains. *Journal of Operations Management*, v. 15, n. 2, p. 89-100, maio 1997.

METTERS, R., 1997. Quantifying the bullwhip effect in supply chain. *Journal of Operations Management* 15, 89–100.

NISE, N.S., 1995. *Control Systems Engineering*. The Benjamin/ Cummings Publishing Company Inc., California. Porges, S.W., Bohrer, R.E., 1991.

OLSON, J. Research on Forecasting. *International Journal of Forecasting*, v. 19, n. 3, p. 543-545, jul/set 2003.

OPPENHEIM, A. V.; SHAFFER, R. W.. *Discrete-Time Signal Processing*. Prentice Hall, 1975.

OVALLE, O. R.; MARQUEZ, A. C. Exploring the utilization of a CONWIP system for supply chain management A comparison with fully integrated supply chains. *International Journal of Production Economics*, v. 83, n. 2, p. 195–215, fev. 2003.

PHILLIPS, C. L.; NAGLE, H. T. *Digital Control System Analysis and Design*. Prentice Hall, New Jersey, 1995.

PRAHALAD, C.K., HAMEL, G., 1990. The core competence of the corporation. *Harvard Business Review* 68 (3), 79–91.

PRESUTTI, JR., W.D., 1992, The Single source issue: US and Japanese sourcing strategies. *International Journal of Purchasing and Materials Management*, Winter, 1-9.

QUINTÃO, Ronan Torres. Avaliação do desempenho logístico da cadeia brasileira de suprimentos de refrigerantes. 2003. 210 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

RAMARAO, D.; MOORTHY, S.. Managing a Distribution Channel Under Asymmetric Information with Performance Requirements. *Management Science*, vol. 43, N°. 12, Dec. 1997.

SPEARMAN, M.L., WOODRUFF, D.L., HOPP, W.J., 1990. CONWIP: a pull alternative to kanban. *International Journal of Production Research* 28, 879–894.

SRINIVASAN, K., KEKRE, S., MUKHOPADHYAY, T., 1994. The impact of electronic data interchange technology on JIT shipments. *Management Science* 40 (10), 1291–1309.

STERMAN, J., 1989. Modelling managerial behaviour: Misperceptions of feedback in a dynamic decision making experiment. *Management Science* 35 (3), 321–339.

STRADER, T.J., LIN, F., SHAW, M.J., 1999. The impact of information sharing on order fulfillment in divergent differentiation supply chain. *Journal of Global Information System* 7 (1), 17–25.

TANG O.. Modelling stochastic lead-times in a production inventory system using the Laplace transform method. In: Hillery MT, Lewis HJ, editors. *The 15th International Conference on Production Research, ICPR-15 Manufacturing for a Global Market*, Limerick, Ireland, August 9–13, 1999. p. 439–42.

TOWILL DR. Forridge—Principles of good practice in material flow. *International Journal of Production Planning and Control* 1997;8(7):622–32.

TOWILL DR. The seamless supply chain. *International Journal Technology Management* 1997;13(1):37–56.

TOWILL, D. R., 1991, Supply chain dynamics. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 4, 197 – 208.

TOWILL, D.R., 1970. *Transfer Function Techniques for Control Engineers*. Iliffe Books, London.

TOWILL, D.R., 1982. Dynamic analysis of an inventory and order based production control system. *International Journal of Production Research* 20, 369–383.

TOWILL, D.R., 1997. The seamless supply chain—the predator’s strategic advantage. *International Journal of Technology Management* 13 (1), 37–56.

TOWILL, D.R., 1999. Fundamental theory of bullwhip induced by exponential smoothing algorithm, MASTS Occasional Paper No. 61, Cardi. University.

TOWILL, D.R., 2001. Engineering the agile supply chain. In: Gunesekaran, A. (Ed.), *Agile Manufacturing: 21st Century Manufacturing Strategy* Chapter 8. Elsevier Science, Oxford.

TOWILL, D.R., del Vecchio, A.L., 1995. Application of filter theory to the study of supply chain dynamics. *Production Planning and Control* 5 (1), 82–96.

TOWILL, D.R., MCCULLEN, P., 1999. The impact of an agile manufacturing programme on supply chain dynamics. *International Journal Logistics Management* 10 (1), 83–96.

TOWILL, D.R., Yoon, S.S., 1982. Some features common to inventory system and process controller design. *Engineering Costs and Production Economics* 6, 225–236.

TSYPKIN YZ. *Sampling systems theory and its application*. Oxford: Pergamon Press, 1964.

TSYPKIN YZ. *Theory of pulse systems*. Moscow: State Press for Physics and Mathematical Literature, 1958 (in Russian).

UPTON, D.M., 1994. The management of manufacturing flexibility. *California Management Review* 36 (Winter), 72–89.

VAN ACKERE, A., LARSEN, E.R., MORECROFT, J.D.W., 1993. Systems thinking and business process redesign: An application to the Beer Game. *European Management Journal* 11 (4), 412–423.

ZHANG, X. The impact of forecasting methods on the bullwhip effect. *Int. J. Production Economics*, v. 88, n.1, p. 1-13, mar 2004.

ZHAO, X., LEE, T.S., 1993. Freezing the master production schedule in multilevel material requirements planning systems under demand uncertainty. *Journal of Operations Management* 11, 185–205.

ZHAO, X., LEE, T.S., GOODALE, J., 1995. Lot-sizing rules and freezing the master production schedule in MRP systems under demand uncertainty. *International Journal of Production Research* 33 (8), 2241–2276.

ZHAO, X., XIE, J., ZHANG, W., 2001. The impact of information sharing and order coordination on supply chain performance. *Supply Chain Management*, forthcoming.

ZHAO, X.;XIE, J.;LEUNG, J. The impact of forecasting model selection on the value of information sharing in a supply chain *European Journal of Operational Research* 142 (2002) 321–344, 1999.

## 7. Apêndice

### Apêndice 1

#### A.1 INVERSA DE MOORE-PENROSE

##### A.1.1 Definição

Dada uma matriz real  ${}_m A_n$  de posto  $r$ , então existe a matriz  ${}_n A_m^+$ , de posto  $r$ , que satisfaz as quatro condições seguintes:

i)  $AA^+A = A$

ii)  $A^+AA^+ = A^+$

iii)  $AA^+ = (AA^+)'$  (simétrica)

iv)  $A^+A = (A^+A)'$  (simétrica)

A matriz  $A^+$  que satisfaz as quatro condições e definida como a inversa generalizada de Moore-Penrose de  $A$ .

Esta inversa generalizada por ser a "mais exigente" apresenta propriedades ótimas, sendo excelente em deduções teóricas, no entanto, sua obtenção numérica é bastante trabalhosa.

*Teorema:* Para cada matriz  ${}_m A_n$  existe uma e somente uma  ${}_n A_m^+$ .

i) Existência

Se  ${}_m A_n = {}_m \Phi_n$  então  $\exists {}_n \Phi_m$ , o que é trivial.

Se  ${}_m A_n \neq {}_m \Phi_n$  e se  $r[A] = r \neq 0$ , então existe as matrizes  ${}_m B_r$  e  ${}_r C_n$ , ambas de posto  $r$ , tais que,  ${}_m A_n = {}_m B_r {}_r C_n$ . Veja o tópico de fatoração de matrizes.

Sendo B de posto “coluna completo” e C de posto linha completo, então B'B e CC' são não singulares, isto é,  $r[B'B] = r$  e  $r[CC'] = r$  por construção,

ii) Unicidade

Demonstra-se a existência de unicidade da inversa de Moore-Penrose. Se  $A_1^+$  e  $A_2^+$  são duas inversas de Moore-Penrose para a matriz A, então  $A_1^+ = A_2^+$ . Mais informações pode ser vista em Searle (1971), lemma (1987) e lemma (1988).

Pela definição, tem-se

a.1  $A A_1^+ A = A$

a.2  $A A_2^+ A = A$

b.1  $A_1^+ A A_1^+ = A_1^+$

b.2  $A_2^+ A A_2^+ = A_2^+$

c.1  $A A_1^+ = (A A_1^+)' = A_1^+ 'A'$  (simétrica)

c.2  $A A_2^+ = (A A_2^+)' = A_2^+ 'A'$

(simétrica)

d.1  $A_1^+ A = (A_1^+ A)' = A' A_1^+ '$  (simétrica)

d.2  $A_2^+ A = (A_2^+ A)' = A' A_2^+ '$

(simétrica)

**A.1.2 Obtenção de  $A^+$**

Para a obtenção de  $A^+$ , deve-se fatorar a matriz  ${}_m A_n$  na forma  $A = BC$ , e usar a expressão:

$$A^+ = C'(CC')^{-1}(B'B)^{-1} B'$$

Para obter a matriz inversa generalizada de Moore-Penrose. Para a verificação de que uma matriz assim obtida é uma inversa de Moore-Penrose basta substituir esta expressão nas quatro condições da definição, para verificar se todas elas são satisfeitas. Por exemplo,

i)  $AA^+ A = BCC'(CC')^{-1}(B'B)^{-1} B'BC = B I I C = B C = A$

$$\text{ii) } A^+ A A^+ = C'(CC')^{-1}(B'B)^{-1} B' B C C'(CC')^{-1}(B'B)^{-1} B' = C'(CC')^{-1} I I (B'B)^{-1} B' = \\ = C'(CC')^{-1}(B'B)^{-1} B' = A^+$$

$$\text{iii) } A A^+ = B C C'(CC')^{-1}(B'B)^{-1} B' = B I (B'B)^{-1} B' = B(B'B)^{-1} B' \text{ e uma forma} \\ \text{simétrica, para qualquer matriz B}$$

$$\text{iv) } A^+ A = C'(CC')^{-1}(B'B)^{-1} B' B C = C'(CC')^{-1} I C = C'(CC')^{-1} C \text{ que é uma forma} \\ \text{simétrica, qualquer que seja a matriz C. Sem duvida, a obtenção da inversa de Moore-} \\ \text{Penrose e, em geral, bastante trabalhosa, principalmente quando não se pode contar com} \\ \text{pacotes estatísticos; essa dificuldade e devido, em grande parte, a fatoração da matriz A} \\ \text{em } A = B C$$

### A.1.3 Algoritmo de Dwivedi

A fatoração de posto  $r$ ,  $A = BC$ , através do uso de matrizes não singulares  $M$  e  $N$ , pode ser pouco operacional para grandes dimensões de  $A$ . Por isso, Dwivedi (1975) propôs um algoritmo que permite a obtenção direta das matrizes  $B$  e  $C$ , e o procedimento tem a propriedade de convergir em  $r[A] = r$  passes.

Dada uma matriz  ${}_m A_n = (a_{ij})$ , de posto  $r$ , onde:  $i = 1, 2, \dots, p, \dots, m$  e o índice de linhas;

$j = 1, 2, \dots, q, \dots, n$  e o índice de colunas, faz-se:

(a) escolher algum elemento  $a_{pq} \neq 0$ ;

(b) obter o produto  $U_1 \cdot V_1'$

Onde:  $U_1 = (1/a_{pq}) \begin{bmatrix} a_{1q} \\ a_{2q} \\ \dots \\ a_{mq} \end{bmatrix}; V_1 = [a_{p1} \ a_{p2}, \dots, a_{pn}]$ ,

(c) Fazer  $A_1 = A - U_1 V_1'$

(d) Se  $A_1 = \phi$ , o processo esta encerrado, então  $B = U_1$  e  $C = V_1'$

(e) Se  $A \neq \phi$ , repetir o mesmo processo para  $A_1$ , e assim, sucessivamente até obter

$A_r = \phi$ .

(f) Ao final do processo, tem-se:

$${}_m A_n = U_1 V_1' + U_2 V_2' + \dots + U_r V_r' = {}_m B_r C_n$$

onde  $B = [U_1, U_2, \dots, U_r]$  e  $C = \begin{bmatrix} V_1' \\ V_2' \\ \dots \\ V_r' \end{bmatrix}$

Exemplo: Seja a matriz  $A = \begin{bmatrix} 4 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 0 \\ 2 & 0 & 2 \end{bmatrix}$  do exemplo anterior

(a) Tomando  $a_{11} = 4$

(b)  $U_1 = (1/4) \begin{bmatrix} 4 \\ 2 \\ 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1/2 \\ 1/2 \end{bmatrix}$  e  $V_1' = [4 \ 2 \ 2] \therefore U_1 V_1' = \begin{bmatrix} 1 \\ 1/2 \\ 1/2 \end{bmatrix} [4 \ 2 \ 2] = \begin{bmatrix} 4 & 2 & 2 \\ 2 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 \end{bmatrix}$

(c)  $A_1 = A - U_1 V_1' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \neq \phi$

(d) Como  $A_1 \neq \phi$ , então repetir processo em  $A_1$

(e) (a') seja  $A_1, a_{22} = 1$

(b') obter o produto  $U_2V_2'$

$$U_2 = 1/1 \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix}; V_2' = [0 \ 1 \ -1] \therefore U_2V_2' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$(c') A_2 = A_1 - U_2V_2' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \phi$$

(d') Como  $A_2 = \phi$ , então o processo está encerrado.

$$\text{Então, } B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/2 & 1 \\ 1/2 & -1 \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} 4 & 2 & 2 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$\text{E, sem dúvidas, verifica-se que: } A = B.C = \begin{bmatrix} 4 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 0 \\ 2 & 0 & 2 \end{bmatrix}, \text{ com } r[A] = r[B] = r[C] = 2.$$

Exemplo: Seja a matriz

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

i) Usando o algoritmo de Dwivedi (1975), pode-se fatorar a matriz A, nas seguintes submatrizes:

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \text{ e } \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

Facilmente, verifica-se que  $A = BC$

ii) Obter  $(B'B)^{-1}$  e  $(CC')^{-1}$

$$B'B = \begin{bmatrix} 4 & 2 \\ 2 & 2 \end{bmatrix} \Rightarrow (B'B)^{-1} = \begin{bmatrix} 1/2 & -1/2 \\ -1/2 & 1 \end{bmatrix} = (1/2) \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$CC' = \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix} \Rightarrow (CC')^{-1} = \begin{bmatrix} 2/3 & 1/3 \\ 1/3 & 2/3 \end{bmatrix} = (1/3) \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}$$

iii) Aplicando a definição, tem-se:

$$A^+ = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2/3 & 1/3 \\ 1/3 & 2/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/2 & -1/2 \\ -1/2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$(1/6) \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 2 & 2 \end{bmatrix}$$

## Apêndice 2

### A.2 Programa de cálculo dos coeficientes e simulação dos elos

**%Limpa tela e variáveis residuárias**

**clc;**

**clear all;**

**close all;**

**%Carrega os dados da planilha**

**load dadosbarbosa.txt**

**%Atribui nome aos dados**

**%tempo**

**t = dadosbarbosa(:,1);**

**%entrada primeiro estágio**

**u1 = dadosbarbosa(:,2)./max(dadosbarbosa(:,3));**

**%saída primeiro estágio**

**y1 = dadosbarbosa(:,3)./max(dadosbarbosa(:,3));**

**%entrada segundo estágio**

**u2 = dadosbarbosa(:,4)./max(dadosbarbosa(:,3));**

**%saída segundo estágio**

**y2 = dadosbarbosa(:,5)./max(dadosbarbosa(:,3));**

**%#####**

**%PRIMEIRO ESTÁGIO**

**%Constroi a matriz de regressores**

```

P1 = [u1(1:end-1) y1(1:end-1)];

%Estima por mínimos quadrados os parâmetros

parametros1 = pinv(P1)*y1(2:end);

%sendo o modelo ==>

% y[k] parametros1(1)*Z
% ---- = -----

% u[k] 1 - parametro1(2)*Z

%Simula o modelo

ysim1(1) = y1(1);

for k = 2:length(t)
    ysim1(k) = [u1(k-1) ysim1(k-1)]*parametros1;
end

%mostra a saída em comparação com a real

figure(1);

plot(t,ysim1);hold on;

plot(t,y1,'r-.');title('Simulação modelo do primeiro estágio');

xlabel('t(mes)');ylabel('y(t)');legend('Dados Simulados','Dados reais');hold off;

%#####

%SEGUNDO ESTÁGIO

%Constroi a matriz de regressores

P2 = [u2(1:end-1) y2(1:end-1)];

%Estima por mínimos quadrados os parâmetros

parametros2 = pinv(P2)*y2(2:end);

```

```

%sendo o modelo ==>

% y[k]  parametros1(1)*Z

% ---- = -----

% u[k]  1 - parametro1(2)*Z

% Simula o modelo

ysim2(1) = y2(1);

for k = 2:length(t)

ysim2(k) = [u2(k-1) ysim2(k-1)]*parametros2;

end

%mostra a saída em comparação com a real

figure(gcf+1);

plot(t,ysim2);hold on;

plot(t,y2,'r-.');title('Simulação modelo do segundo estágio');

xlabel('t(mes)');ylabel('y(t)');legend('Dados Simulados','Dados reais');hold off;

%#####

save parametros parametros1 parametros2

%#####

%simula via simulink

open barbosa.mdl;

sim('barbosa',[0 35]);

%mostra a saída em comparação com a real

figure(gcf+1);

plot(t,y2,'b');hold on;

plot(saida3(:,1),saida3(:,2),'r-.');title('Simulação modelo da cadeia completa');

```

```
xlabel('t(mes)');ylabel('y(t)');legend('Datos reais','Datos simulados');hold off;
```



```

%%%%%%%%%%
if (valor ~= 0) & (valor ~= 1) & (valor ~= 2)
    error('Digite apenas valores validos, por favor');
else
    if (valor == 0)
        error('Programa abortado ...')
    end
    if (valor == 2)
        open('CONTROLEESTOQUE.html');
    end
    if (valor == 1)

        %Limpa tela e variáveis residuárias
        clc;
        clear all;
        close all;

        %Carrega os dados da planilha
        load dadosbarbosa.txt;

        %Atribui nome aos dados
        %tempo
        t = dadosbarbosa(:,1);

        %entrada primeiro estágio

```

```

u1 = dadosbarbosa(:,2)./max(dadosbarbosa(:,3));

%saída primeiro estágio

y1 = dadosbarbosa(:,3)./max(dadosbarbosa(:,3));

%Entradas para o SIMULINK

entrada = [t y1];

entrada2 = [t u1];

L = input('Entrar com o valor de L => ');

Kj = input('Entrar com o valor de Kj => ');

%#####

%simula via simulink

open barbosa_controle.mdl;

sim('barbosa_controle',[0 35])

%mostra a saída em comparação com a real

figure(1);

plot(saida(:,1),saida(:,2));title('Simulacao da acao de controle - Saida U_{ji}');

xlabel('t(mes)');ylabel('y(t)')

figure(gcf+1);

plot(saida2(:,1),saida2(:,2));title('Simulacao da acao de controle - Saida Y_{jk}');

xlabel('t(mes)');ylabel('y(t)');

end

```

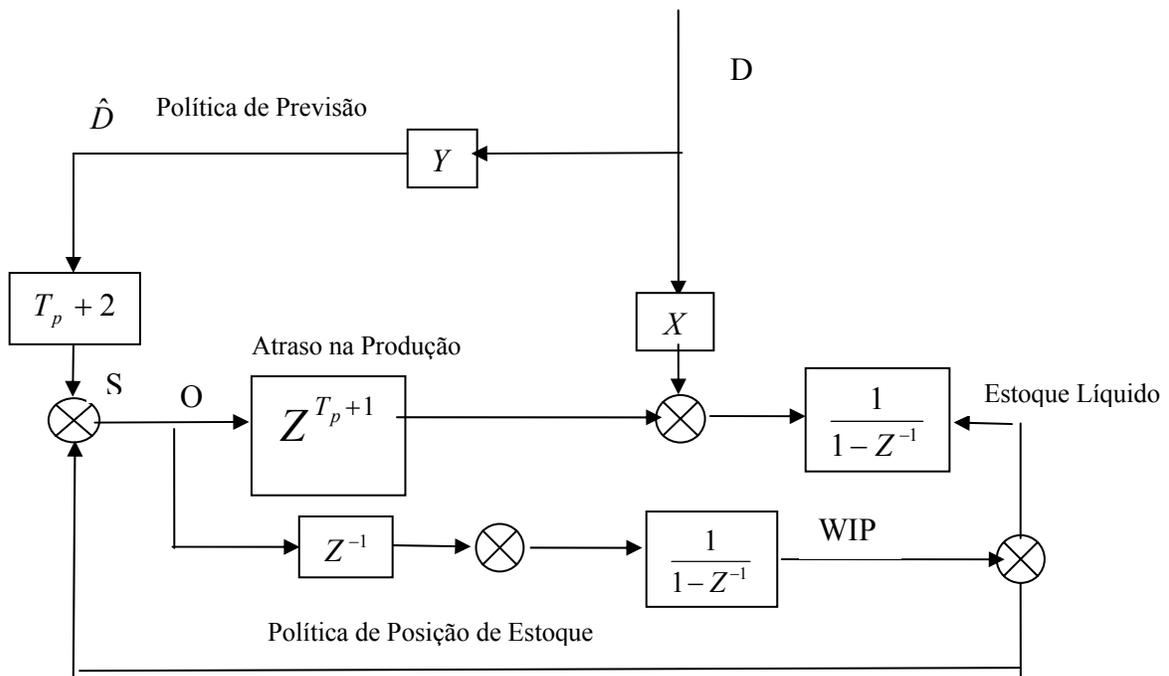
## 8. Anexos

### 8.1 Anexo 1

Sumário de fórmulas de expressões fechadas para chicoteamento		
Cadeia de suprimento tradicional		com informação enriquecida
Pedidos cadeia acima com suavizador exponencial	Chicoteamento para demandas i.i.d. em cada elo = $\frac{13 + 2T_a^2 + 2T_p(5 + T_p) + T_a(11 + 4T_p)}{(1 + T_a)(1 + 2T_a)}$	Chicoteamento em cada elo para i.i.d. no consumidor final com algum parâmetro em cada elo $\frac{[1 + 3T_a + 2(T_a^2 + n(1 + 2T_a)(2 + T_p) + n^2(2 + T_p)^2)]}{(1 + T_a)(1 + 2T_a)}$
Pedidos cadeia acima com média móvel	Chicoteamento para demandas i.i.d. em cada elo = $\frac{8 + 4T_m + 4T_m^2 + 8T_p + 2T_m T_p + 2T_p^2}{T_m^2}$	Chicoteamento em cada elo para i.i.d. no consumidor final com algum parâmetro em cada elo $\frac{T_p^2 + 2n(2 + T_p)(T_m + n(2 + T_p))}{T_m^2}$
Pedidos cadeia acima com sinalização de demanda	Chicoteamento em cada elo para i.i.d. no consumidor final com algum parâmetro em cada elo, onde: $n=1, 1+2\gamma(1+\gamma)$ $n=2, 1+2\gamma(1+\gamma)(2+3\gamma(1+\gamma))$ $n=3, (1+2\gamma(1+\gamma))(1+2\gamma(1+\gamma)(2+5\gamma(1+\gamma)))$ $n=4, 1+2\gamma(1+\gamma)(4+\gamma(1+\gamma)(8+5\gamma(1+\gamma)(8+7\gamma(1+\gamma))))$	Chicoteamento em cada elo para i.i.d. no consumidor final com algum parâmetro em cada elo $1 + 2\pi\gamma(1 + \pi\gamma)$
Política de suavização	Chicoteamento para demandas i.i.d. em cada elo, onde: $T_n = T_w = T_a + 1 = \frac{13 + T_a^2 + 2T_p(5 + T_p) + 2T_a(1 + 4T_p)}{(1 + 2T_a)^3}$	Expressões do chicoteamento não são óbvias. Gráfico produzido via integração numérica de (largura de faixa do ruído)/ $\pi$ .

## 8.2 Anexo 2

Diagrama de bloco de pedidos OUT numa cadeia de suprimentos

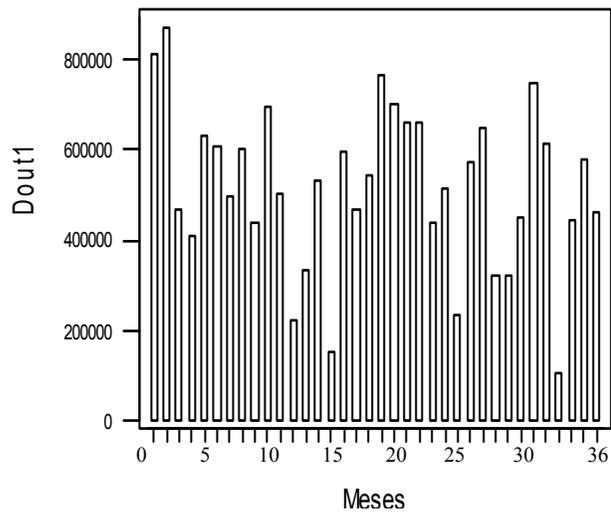


### 8.3 Anexo 3

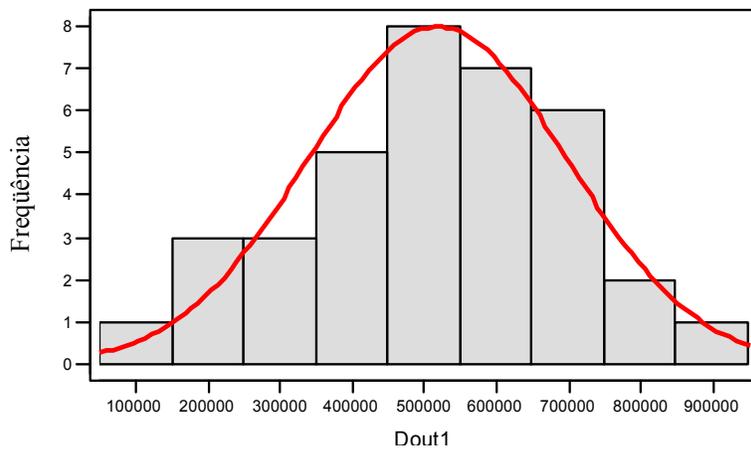
Política	Foco	Cadeia de suprimento Tradicional	Cadeia com informação enriquecida
Política OUT com suavizador exponencial de previsão	TF1 Geral TFs Mesmo Parâmetro TFs	$TF_1 = \frac{z(T_a + T_p + 3) - (T_a + T_p + 2)}{-T_a + z + T_a z}$ $TF_n = \frac{O_n}{D} = \prod_{j=1}^n \left[ \frac{z(T_{aj} + T_{pj} + 3) - (T_{aj} + T_{pj} + 2)}{-T_{aj} + z + T_{aj} z} \right],$ $TF_n = \frac{O_n}{D} = \left[ \frac{z(T_a + T_p + 3) - (T_a + T_p + 2)}{-T_a + z + T_a z} \right]^n,$	$TF_n = \frac{O_n}{D} = TF_1 + \sum_{j=2}^n \left[ \frac{(2 + T_{pj})(z - 1)}{-T_{aj} + z + T_{aj} z} \right]$ $TF_n = \frac{O_n}{D} = \frac{z(2n + 1 + T_a + nT_p) - (2n + T_a + nT_p)}{-T_a + z + T_a z}$
Política OUT Com média móvel de Geral previsão	TF1 Geral TFs mesmo parâmetro TFs	$TF_1 = \frac{O}{D} = \frac{-2 - T_p + 2z^{T_m} + T_m z^{T_m} + T_p z^{T_m}}{T_m z^{T_m}}$ $TF_n = \frac{O_n}{D} = \prod_{j=1}^n \left[ \frac{-2 - T_{pj} + 2z^{T_{mj}} + T_{mj} z^{T_{mj}} + T_{pj} z^{T_{mj}}}{T_{mj} z^{T_{mj}}} \right],$ $TF_n = \frac{O_n}{D} = \left[ \frac{-2 - T_p + 2z^{T_m} + T_m z^{T_m} + T_p z^{T_m}}{T_m z^{T_m}} \right]^n,$	$TF_n = \frac{O_n}{D} = TF_1 + \sum_{j=2}^n \left[ \frac{(1 - z^{-T_{mj}})(T_{pj} + 2)}{T_{mj}} \right]$ $TF_n = \frac{O_n}{D} = \frac{-2n - nT_p + 2n z^{T_m} + T_m z^{T_m} + nT_p z^{T_m}}{T_m z^{T_m}}$
Política OUT com sinalização demanda	TF1 Geral TFs Mesmo parâmetro TFs	$TF_1 = \frac{O}{D} = 1 + \gamma - \frac{\gamma}{z}$ $TF_n = \frac{O_n}{D} = \prod_{j=1}^n \left[ 1 + \gamma_j - \frac{\gamma_j}{z} \right],$ $TF_n = \frac{O_n}{D} = \left[ 1 + \gamma - \frac{\gamma}{z} \right]^n,$	$TF_n = \frac{O_n}{D} = 1 + \sum_{j=1}^n \gamma_j - \sum_{j=1}^n \frac{\gamma_j}{z}$ $TF_n = \frac{O_n}{D} = 1 + n\gamma - \frac{n\gamma}{z}$
Suavizador de Reabastecimento Com regra de previsão por suavizador exponencial com n=1: X1=1, $\forall n=2, \dots, \alpha$ Xn=TF <sub>n-1</sub>	TF1 Geral TFs Mesmo parâmetro TFs	$TF_1 = \frac{O}{D} = \frac{z^{1+T_p} ((-1 - T_a)T_w + T_i(T_p z + T_w)(-1 - z) + (2 + T_a)T_w z)}{(T_a(-1 + z) + z)(T_w + T_i(-1 + T_w(-1 + z))z^{T_p})}$ $TF_n = \frac{O_n}{D} = \prod_{j=1}^n \frac{z^{1+T_{pj}} ((-1 - T_{aj})T_{wj} + z(2 + T_{aj})T_{ij} + (-1 + z)T_{ij} + (T_{pj} + T_{wj}))}{(z + (-1 + z)T_{aj})(T_{wj} + T_{ij}(-1 + z^{T_{ij}}(1 + (-1 + z)T_{ij})))}$	$TF_n = \frac{O_n}{D} = \prod_{j=1}^n \frac{z^{1+T_{pj}} ((-1 + z)T_{pn}(T_{pn} + T_{wn}) + (T_{wn}(-1 + z + (z + (-1 + z)T_{an})X_n))}{(z + (-1 + z)T_{an})(T_{wn} + T_{nn}(-1 + z^{T_{pn}}(-1 + z^{T_{pn}}(1 + (-1 + z)T_{wn})))}$

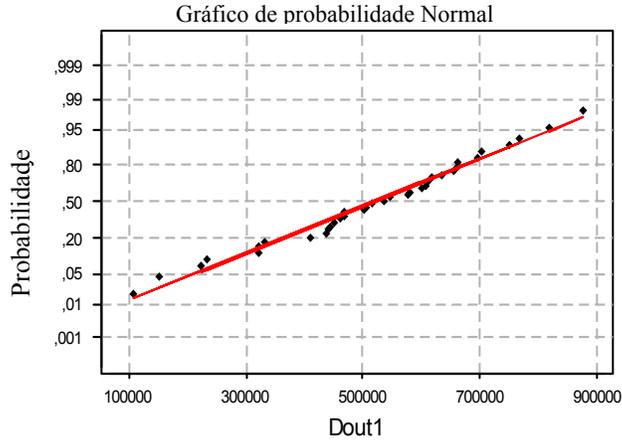
## 8.4 Anexo 4

### Vendas ARMS



Histograma de  $D_{out1}$ , com curva Normal.

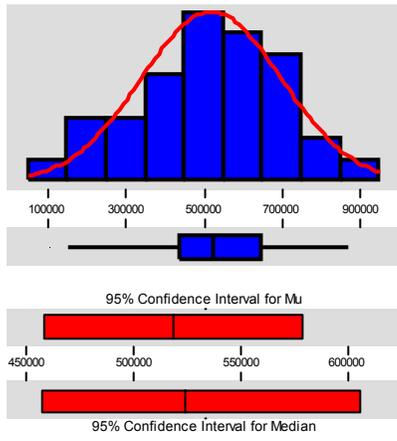




Average: 518275  
 StDev: 179739  
 N: 36

Kolmogorov-Smirnov Normality Test  
 D+: 0,055 D-: 0,106 D : 0,106  
 Approximate P-Value > 0.15

### Estatística Descritiva



### Variável : Dout1

Anderson-Darling Normality Test  
 A-Squared: 0,256  
 P-Value: 0,705

Mean 518275  
 StDev 179739  
 Variance 3,23E+10  
 Skewness -3,6E-01  
 Kurtosis -6,6E-02  
 N 36

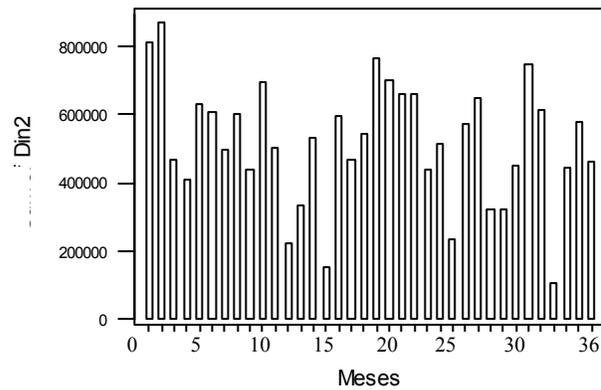
Mnimum 107734  
 1st Quartile 438613  
 Median 524406  
 3rd Quartile 647487  
 Maximum 873084

95% Confidence Interval for Mu  
 457460 579089

95% Confidence Interval for Sigma  
 145783 234458

95% Confidence Interval for Median  
 457284 606575

## Compras FMX



Histograma de  $D_{in2}$ , com curva Normal.

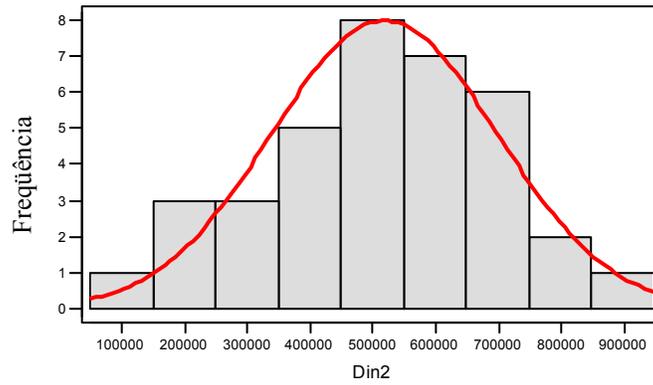
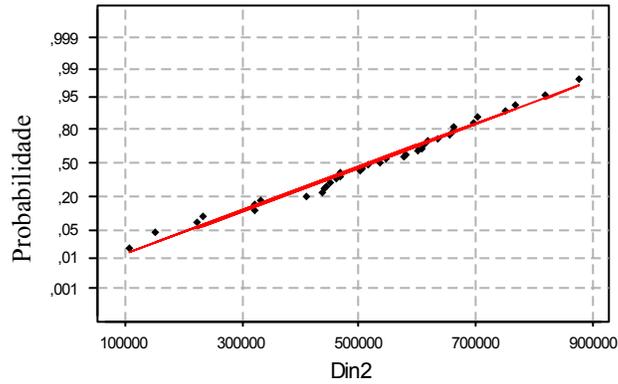


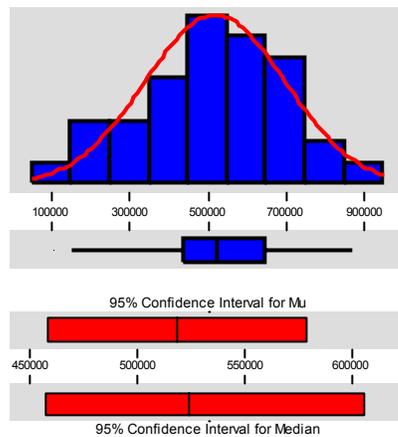
Gráfico de Probabilidade Normal



Average: 518275  
 StDev: 179739  
 N: 36

Kolmogorov-Smirnov Normality Test  
 D+: 0,055 D-: 0,106 D : 0,106  
 Approximate P-Value > 0,15

Estadística Descritiva



Variável : Din2

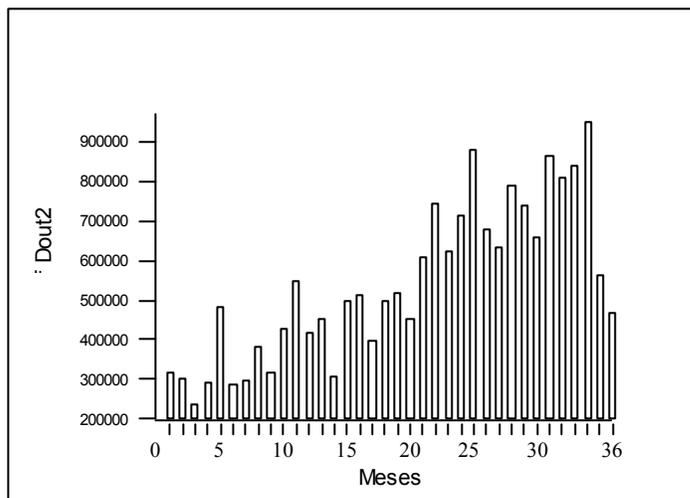
Anderson-Darling Normality Test  
 A-Squared: 0,256  
 P-Value: 0,705

Mean: 518275  
 StDev: 179739  
 Variance: 3,23E+10  
 Skewness: -3,6E-01  
 Kurtosis: -6,6E-02  
 N: 36

Minimum: 107734  
 1st Quartile: 438613  
 Median: 524406  
 3rd Quartile: 647487  
 Maximum: 873084

95% Confidence Interval for Mu: 457460 - 579089  
 95% Confidence Interval for Sigma: 145783 - 234458  
 95% Confidence Interval for Median: 457284 - 606575

## Vendas FMX



Histograma de  $D_{out2}$ , com curva

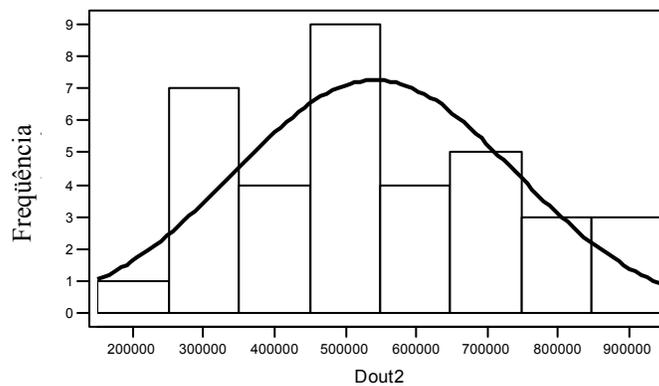
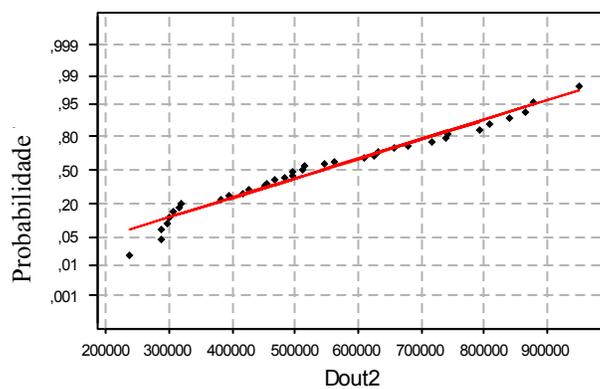


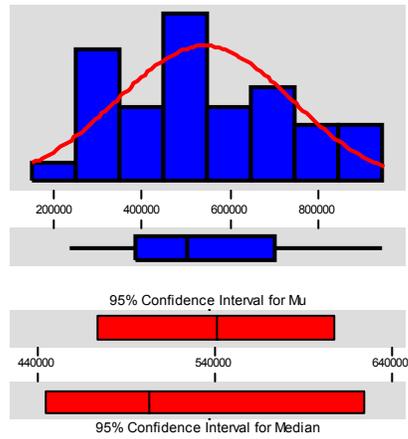
Gráfico de Probabilidade Normal



Average: 541458  
 StDev: 197871  
 N: 36

Kolmogorov-Smirnov Normality Test  
 D+: 0,107 D-: 0,071 D: 0,107  
 Approximate P-Value > 0,15

## Estatística Descritiva



Variável : Dout2

Anderson-Darling Normality Test

A-Squared: 0,493  
P-Value: 0,204

Mean 541458  
StDev 197871  
Variance 3,92E+10  
Skewness 0,354350  
Kurtosis -9,1E-01  
N 36

Mnimum 236456  
1st Quartile 386316  
Median 504120  
3rd Quartile 706284  
Maximum 949471

95% Confidence Interval for Mu  
474508 608408

95% Confidence Interval for Sigma  
160490 258110

95% Confidence Interval for Median  
445432 625952