

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ

PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO

MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS

GESTÃO INTEGRADA DE SISTEMAS PRODUTIVOS

DIMENSIONAMENTO DE LOTES DE PRODUÇÃO, ESTOCAGEM E  
TRANSPORTE AO LONGO DE UMA CADEIA DE SUPRIMENTOS  
GERAL MULTIESTÁGIO, SUJEITA A RESTRIÇÕES DE  
CAPACIDADE DE PRODUÇÃO.

CURITIBA

2003

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ

PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO

MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS

GESTÃO INTEGRADA DE SISTEMAS PRODUTIVOS

DIMENSIONAMENTO DE LOTES DE PRODUÇÃO, ESTOCAGEM E  
TRANSPORTE AO LONGO DE UMA CADEIA DE SUPRIMENTOS  
GERAL MULTIESTÁGIO, SUJEITA A RESTRIÇÕES DE  
CAPACIDADE DE PRODUÇÃO.

Dissertação apresentada à Pontifícia  
Universidade Católica do Paraná, como parte  
dos requisitos para a obtenção do título de  
Mestre sob a orientação do Professor Doutor  
Marco Antônio Barbosa Cândido pelo aluno  
Romeu Guimarães Machado Neto.

CURITIBA

2003

## **AGRADECIMENTOS**

À minha esposa, Iliana, pelo seu amor, incentivo e apoio.

Ao Prof. Dr. Marco Antonio Barbosa Cândido pela orientação, apoio e amizade, sem o que não seria possível a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Ricardo Pacheco pela ajuda em grande parte deste tempo de estudos.

Ao Prof. Dr. Raimundo Sampaio pelo apoio, incentivo e orientação.

Ao Prof. Dr. Paulo França pela colaboração e incentivo.

A Profa. Dra. Regina Berretta pela colaboração.

Ao Prof. Dr. Alfredo Iarozinski pelo grande auxílio e amizade.

A todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho.

## ÍNDICE

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>1. Descrição do problema.....</b>	<b>13</b>
<b>2. Objetivo do trabalho. ....</b>	<b>14</b>
<b>3. Justificativa para o desenvolvimento do trabalho.....</b>	<b>15</b>
<b>4. Hipóteses/diretrizes do trabalho. ....</b>	<b>15</b>
<b>5. Metodologia a ser adotada.....</b>	<b>16</b>
<b>6. Organização do trabalho. ....</b>	<b>17</b>
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>20</b>
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA. ....</b>	<b>20</b>
<b>1.1 Introdução ao SCM. ....</b>	<b>20</b>
1.1.1 Sistema de logística integrado. ....	21
1.1.2 Cadeia de valor. ....	23
1.1.3 SCM - Gerenciamento da cadeia de suprimentos.....	26
1.1.4 Estratégias de gestão da demanda. ....	29
1.1.5 Conceito de <i>lead-time</i> . ....	31
<b>1.2 Alguns campos de pesquisa em SCM.....</b>	<b>32</b>
1.2.1 Dimensionamento de lotes.....	32
1.2.2 Efeito <i>bullwhip</i> . ....	34
<b>1.3 Alguns modelos para a solução de problemas de dimensionamento de lotes. ..</b>	<b>37</b>
<b>1.4 Formulação matemática do problema de dimensionamento de lotes.....</b>	<b>41</b>
1.4.1 Formulação do problema monoestágio e único item.....	41
1.4.2 Formulação do problema multiestágio e único item. ....	45
1.4.3 Formulação do problema multiestágio e estoque de escalão.....	46
<b>1.5 Metodologia de França et al. (1997).....</b>	<b>48</b>
1.5.1 Introdução à heurística proposta por França et al. (1997). ....	48
1.5.2 Passo 1 (P1) .....	48
1.5.3 Passo 2 (P2). ....	52

1.5.4 Passo 3 (P3).	53
1.5.5 Passo 4 (P4).	53
<b>1.6 O modelo de Brandolese e Cigolini.</b>	<b>54</b>
<b>1.7 Generalização dos modelos de MSCLSP para o contexto do SCM.</b>	<b>56</b>
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>58</b>
<b>FORMULAÇÃO E MODELO PROPOSTO.</b>	<b>58</b>
<b>2.1 Formulação do problema proposto.</b>	<b>58</b>
<b>2.2 Representação matricial de estrutura de produtos.</b>	<b>61</b>
<b>2.3 Heurística proposta para o problema.</b>	<b>64</b>
2.3.1 Passo 1 (P1)	65
2.3.2 Passo 2 (P2).	74
2.3.3 Passo 3 (P3).	78
2.3.4 Passo 4 (P4).	82
2.3.5 Pseudo código da heurística proposta.	83
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>87</b>
<b>RESULTADOS.</b>	<b>87</b>
<b>3.1 Introdução.</b>	<b>87</b>
<b>3.2 Validação do modelo proposto.</b>	<b>88</b>
<b>3.3 Geração dos problemas-teste.</b>	<b>88</b>
<b>3.4 Análise dos resultados.</b>	<b>91</b>
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>97</b>
<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.</b>	<b>97</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.</b>	<b>100</b>
<b>GLOSSÁRIO</b>	<b>114</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Representação matricial de uma estrutura serial.....	63
Tabela 2.2 Representação matricial de uma estrutura de montagem.....	63
Tabela 2.3 Representação matricial de uma estrutura geral.....	64
Tabela 3.1 Parâmetros para geração de dados.....	89
Tabela 3.2 Viabilização da heurística.....	92
Tabela 3.3 Eficácia da heurística (relativa ao <i>gap</i> ).....	94

## LISTA DE FIGURAS

Figura I.1 Representação do problema de SCM.....	14
Figura 1.1 Representação dos tipos de gestão de demanda.....	31
Figura 2.1 Representação da heurística proposta.....	65
Figura 3.1 Comportamento de parte da heurística.....	93
Figura 3.2 Comportamento geral da heurística.....	93
Figura G.1. Exemplo de uma estrutura de produção serial.....	115
Figura G.2. Exemplo de uma estrutura de produção de montagem..	115
Figura G.3. Exemplo de uma estrutura de produção geral.....	115



## LISTA DE SIGLAS

**CIMSs** – *Computer Integrated Manufacturing Strategic system*. Sistema estratégico de manufatura integrado por computador.

**CLSP** – *Capacitated Lot Sizing Problem*. Problema de dimensionamento de lotes de produção em ambiente sujeito a restrições de capacidade.

**CRP** – *Continued Replacement Problem*. Problema de reposição contínua.

**DLSP** – *Discrete Lot Sizing and Scheduling Problem*. Problema de programação e dimensionamento discreto de lotes.

**ELSP** – *Economic Lot Scheduling Problem*. Problema de dimensionamento de lote econômico.

**EOQ** – *Economic Order Quantity*. Quantidade econômica de pedidos de compra.

**ERP** - *Enterprise Resources Planning*. Planejamento de recursos de um empreendimento.

**IMSs** – *Integrated manufacturing strategic systems*. Sistemas Industriais Estratégicos Integrados.

**JIT** – *Just in time*. Exatamente no momento necessário.

**MIP** – *Mixed-Integer Programming*. Programação mista inteira.

**MRP** – *Manufacturing Resources Planning*. Planejamento de recursos de manufatura.

**MSCLSP** – *Multistage capacitated lot-sizing Problem*. Problema de dimensionamento de lotes em ambiente multiestágio e sujeito à restrição de capacidade.

**PLSP** – *Proportional Lot Sizing and Scheduling Problem*. Problema de programação e dimensionamento proporcional de lotes.

**SIG** – Sistemas Integrados de Gestão.

**SCM** – *Supply Chain Management*. Gerenciamento de cadeia de suprimentos.

## RESUMO

Este trabalho tem por finalidade determinar o dimensionamento de lotes de produção, estocagem e transporte ao longo de uma cadeia de suprimentos geral multiestágio, sujeita a restrições de capacidade de produção, visando a obter o menor custo total do sistema. Busca-se dimensionar lotes de cada um dos produtos em um horizonte de tempo conhecido, de forma a atender a demanda de produtos componentes e também de produtos finais, demanda esta informada para cada um dos períodos. Por se tratar de sistemas multiestágios, o planejamento de cada produto depende do planejamento dos demais produtos situados em níveis hierárquicos inferiores. Objetivando ampliar o campo de aplicação para problemas reais, o modelo formulado inclui custos de produção, estocagem e transporte e custos de preparação para a produção e custos de transporte. Em razão da complexidade computacional envolvida, propõe-se uma nova heurística mista de troca e de busca e uma representação matricial de estrutura de produtos. Simulações realizadas comprovam a viabilidade e boa *performance* da solução proposta.

## **ABSTRACT**

This work consists in determining the products quantities to be produced, stocked and transported in different periods in a planning horizon such that a forecast demand would be attained, on a general multistage supply chain subjects to constraints of production capacity, in order to obtain the smallest total cost of the system. In multistage system the planning of each product depends on the planning of others products located in lower hierarchical levels. Seeking to enlarge the application field for real problems, the formulated model considers production, stock, transport and setup costs. A new heuristic is proposed to address this problem. Simulations proved the viability and good performance of the proposed method.

## Introdução

Em razão do atual ambiente econômico globalizado e altamente competitivo, as empresas necessitam possuir um sistema de planejamento e de controle da produção, estocagem e fluxo de materiais muito eficiente, buscando a diminuição dos seus custos em conjunto com a melhoria da qualidade.

Atualmente, *Suplly chain management* (SCM) é atualmente o foco de estudos por duas razões: em primeiro lugar, para se obter uma melhoria global na produtividade de cada indústria e um melhor planejamento e gerenciamento dos complexos sistemas de controle de materiais e estoques, deve-se tanto dimensionar a capacidade produtiva e a capacidade logística como desenvolver sistemas de controle dos processos ao longo de uma cadeia de suprimentos; em segundo lugar, os avanços das tecnologias de informação e de comunicação, complementados por sistemas sofisticados de apoio à decisão, tornam possível projetar, implementar e controlar diversas estratégias mercadológicas.

Uma cadeia de suprimentos possui três fontes principais de incerteza: demanda (volume e mix), processo (resultado, manuseio e confiabilidade no transporte) e suprimento (qualidade das peças, confiabilidade na entrega). O gerenciamento de uma cadeia de suprimentos é uma estratégia por meio da qual a integração entre indústria, atacadistas, varejistas e lojistas poderá ser alcançada, mas a coordenação entre os vários membros da cadeia é fundamental para sua efetiva administração.

Devido à importância da informação a respeito da demanda por parte do consumidor final dos produtos estar centralizada, o gerenciamento do processo é de

vital importância. Para se obter, em uma cadeia de suprimentos, uma administração adequada da distorção das informações de demanda, é necessária uma política que integre processo e suprimento.

## **1. Descrição do problema.**

A questão central deste trabalho de pesquisa é o dimensionamento de lotes de produção, estocagem e transporte ao longo de uma cadeia de suprimentos geral multiestágio, sujeita a restrições de capacidade de produção, de transporte por modal e também de disponibilidade dos diversos tipos de modal em cada período.

A contribuição primordial desta pesquisa é estudar a possibilidade da transposição de modelos já desenvolvidos para *Multistage capacitated lot-sizing Problem* (MSCLSP) para o contexto SCM. Apesar das dificuldades adicionais criadas nessa transposição, propõe-se uma comparação entre problemas de dimensionamento de lotes em uma planta com os problemas de dimensionamento de lotes em uma cadeia de suprimentos.

Uma segunda contribuição é a representação matricial dos itens predecessores para estruturas serial, de montagem e geral, facilitando o tratamento computacional. Essa matriz permite armazenar a quantidade necessária do item predecessor imediato para compor cada item sucessor.

Uma terceira contribuição é a proposição de uma nova heurística, baseada na heurística de França et al. (1997), ajustada para problema de SCM proposto, incluindo-se os custos referentes a modais de transporte entre estágios.

Os custos envolvidos no problema são os de produção, de estocagem e de transporte em cada estágio, conforme representados na Figura I.1.

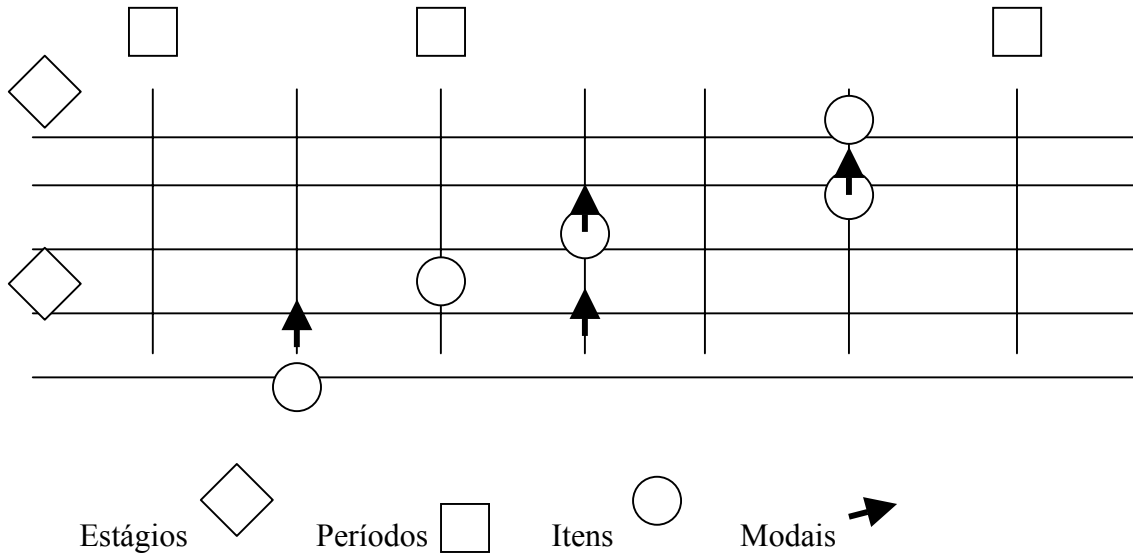


Figura I.1 Representação do problema de SCM.

As restrições consideradas são as de capacidade de produção em cada estágio/período e de transporte por modal, bem como a restrição de disponibilidade de modal em cada período.

## 2. Objetivo do trabalho.

O objetivo do presente trabalho é propor uma nova heurística que forneça boas soluções para o problema de dimensionamento de lotes de produção, estoques e transporte em uma cadeia de suprimentos geral multiestágios, sujeita a restrições de capacidade e com a centralização da informação de demanda.

Partindo de um modelo de MSCLSP, buscou-se adaptá-lo ao problema de SCM, no qual se considerou a cadeia de suprimentos como equivalente a um sistema de produção multiestágios capacitado. Cada estágio passou a representar armazéns de atacadistas, ou armazéns de varejistas, e lojas que comercializam diretamente com o cliente final. Cada estágio continua representando uma camada, em que todos os passos necessários para que um item final ou um item componente sejam efetuados até que esses itens estejam finalizados. Nesses estágios podem ocorrer estocagem e transformações que integram o produto final.

Uma vez determinado o problema de SCM, e com a finalidade de buscar a sua solução, adaptou-se a heurística apresentada por França et al. (1997), incluindo-se o fluxo de materiais com opções de modais de transporte que possuem diferentes capacidades e custos unitários e fixos.

### **3. Justificativa para o desenvolvimento do trabalho.**

A justificativa deste estudo é encontrar um método aproximado, com custo computacional aceitável, para o problema de SCM, pela utilização de um modelo e de uma heurística mista de busca e de troca, bem como pela transferência de produção, de estocagem e de transporte entre períodos, que possa ser aplicado também a problemas de SCM de maior porte.



#### **4. Hipóteses/diretrizes do trabalho.**

Algumas hipóteses foram estabelecidas para este trabalho, com o objetivo de determinar o escopo do mesmo.

Considerou-se a demanda variável em cada período e conhecida por todos os participantes da cadeia. Um item intermediário poderá também ter demanda independente em um determinado período.

A capacidade de produção para o atendimento dos pedidos dentro dos prazos de entrega é considerada global para todos os componentes em cada período da cadeia de suprimentos.

O custo de transporte considera, quando da utilização de modais alternativos, um custo fixo acrescido de um custo variável, determinado pela multiplicação do custo unitário de transporte entre estágios pelo tamanho do lote. Cada modal possui um limite de capacidade de transporte conhecido. Poderá não haver disponibilidade de um ou mais modais entre estágios para determinados itens em determinados períodos.

Procura-se minimizar o custo total, formado pelos custos variáveis de produção, estocagem e transporte, acrescido de custos de *setup* de produção e do custo fixo de transporte entre os estágios.

Para a avaliação do modelo utilizaram-se estrutura serial, de montagem e geral.

#### **5. Metodologia a ser adotada.**

Na fase construtiva do planejamento da pesquisa optou-se por ser ela aplicada, quantitativa, exploratória, bibliográfica e experimental.

A revisão bibliográfica foi feita mediante leitura sistemática, com fichamento de cada obra, ressaltando os pontos pertinentes ao assunto em questão abordados pelos autores.

O modelo proposto neste trabalho considera uma cadeia de suprimentos com unidades empresariais autônomas, cujas políticas de operação local podem não ser as melhores do ponto de vista global. O modelo proposto considera cada estágio como sendo uma unidade empresarial. Como consequência, para continuar permitindo a identificação de várias unidades empresariais, o modelo representa uma cadeia de suprimentos multiestágios.

Também são levados em conta limites de capacidade de produção e de transporte, uma vez que o nível de produção e transporte, em cada período, não pode exceder um limiar máximo pré-definido.

A tarefa da escolha de um modelo é crítica, pois deve refletir um grau adequado de realismo, uma vez que tal modelo deve ser eficiente e ter ampla aplicabilidade no mundo real. Cada variável introduzida no modelo deve ser bem avaliada pela sua real necessidade em relação à dimensão do problema final a ser resolvido, uma vez que possui impacto direto no tempo para a solução.

## **6. Organização do trabalho.**

No primeiro capítulo apresenta-se uma revisão bibliográfica na área de SCM sobre sistema de logística integrado e a respeito de cadeia de valor. Estão apresentadas estratégias de gestão de demanda, alguns campos de pesquisa em SCM e trabalhos sobre

a importância da informação da demanda estar centralizada, e de como essa importância pode ser quantificada quando analisada por meio do efeito *bullwhip* (distorção chicote do touro). Também estão apresentados alguns modelos para a solução de problemas de dimensionamento de lotes.

No referido capítulo é apresentada, também, a formulação matemática de um problema monoestágio e único item proposto por Trigeiro et al. (1989), bem como a formulação para um problema multiestágios e único item, proposta por Billington et al. (1983). A seguir, é apresentada a formulação de um problema multiestágio com estoque de escalão, conceito proposto por Afentakis et al. (1984).

Incluiu-se no mesmo capítulo a heurística proposta por França et al. (1997), utilizada como base para a solução do problema de SCM, proposto neste trabalho. A revisão bibliográfica sobre a interdependência entre o dimensionamento de lotes e a programação da produção é abordada conforme modelo de Brandolese e Cigolini (1999) e, finalmente, apresenta-se uma generalização dos modelos de MSCLSP para o contexto SCM.

No segundo capítulo formulou-se matematicamente o problema proposto de SCM. Apresenta-se a representação por meio de matriz das estruturas serial, de montagem e geral dos produtos. A seguir, detalha-se a heurística mista de busca e de troca, proposta neste trabalho, para se encontrar uma solução aproximada para o problema em questão. Detalharam-se os quatro passos que integram a heurística e incluiu-se o pseudocódigo desses passos.

No terceiro capítulo apresentam-se os relatos dos experimentos computacionais e os resultados de testes, em duas classes de problemas de SCM. Na primeira classe de

testes, que tinha por objetivo validar o modelo, utilizaram-se os mesmos parâmetros dos problemas propostos por França et al. (1997) e, nesse caso, a heurística obteve resultados ligeiramente melhores que aqueles obtidos por França. A segunda classe de testes incluiu valores diferentes de zero para custos fixos e variáveis de modais.

Os problemas foram gerados com dados criados aleatoriamente, utilizando-se parâmetros baseados nos trabalhos de Clark e Armentano (1995). Para os modais, utilizaram-se parâmetros compatíveis com os demais. Os resultados foram inicialmente analisados, tomando-se por base o número de soluções viáveis encontradas no universo testado com a heurística. Uma segunda análise, a da eficácia, baseou-se nos valores da função objetivo, encontrados quando comparados com o limitante inferior obtido pela heurística de Wagner e Within (1958).

No quarto capítulo apresentam-se as conclusões deste trabalho quando da aplicação da heurística proposta. Também estão apresentadas as sugestões para trabalhos futuros.

# Capítulo 1

## Revisão bibliográfica.

### 1.1 Introdução ao SCM.

A visão da produção como sendo um sistema de informação, no processo de transformar um projeto em um produto final (Young e Mayer, 1984), cobre uma extensa gama de aspectos: planejamento e projeto, obtenção de matéria-prima, produção propriamente dita, estocagem, gerenciamento da produção, distribuição, marketing, vendas e pós-vendas. O chamado fluxo de informação de produção reflete as necessidades dos clientes, englobando atividades de gerenciamento, usualmente planejamento e controle.

O fluxo de materiais é a chave em uma indústria de manufatura e o fluxo de informações é agora mais importante para vencer em um ambiente competitivo (Hitomi, 1991).

Em razão da inovação tecnológica (desenvolvimento de novos produtos, processos e automação de fábricas), da produção orientada ao mercado (multi-produtos, produção de pequenos lotes e diversificação de produtos) e do mercado globalizado (produção internacional e corporações internacionais), a estratégia de fabricação passou a ter papel importante na condução de empresas, auxiliada pelos chamados *Integrated manufacturing strategic systems* (IMSS), que integram esses três pontos de forma conjunta. Quando utilizando computadores, são chamados de *Computer Integrated Manufacturing Strategic system* (CIMSs).

O *Manufacturing Resources Planning* (MRP) é um conceito de controle de produção, desenvolvido especialmente para empresas *Make-to-stock* e em situações específicas para *Assemble-to-order* (Wight e Landwater, 1983; Berry et al., 1988).

O *Supply chain* é uma rede de instalações e opções de distribuição, que busca matérias-primas, transforma estas matérias-primas em produtos intermediários e em produtos acabados e distribui estes produtos acabados ou serviços aos clientes.

Os sistemas *Enterprise Resources Planning* (ERP) são meios com a pretensão de suportar todas as necessidades de informação em um ambiente corporativo, da engenharia de produto à manutenção, da logística ao custo, dos recursos humanos ao comercial e passando pelas áreas de métodos e de manufatura.

Houlihan (1985), Stevens (1989), Lee e Billington (1993) e Lamming (1996) definem *supply chain management* como sendo um sistema composto por fornecedores, fabricantes, distribuidores, varejistas e clientes, em que os materiais fluem dos fornecedores para os clientes e a informação sobre essa movimentação flui em ambas as direções.

O SCM tem por objetivo a administração das atividades de uma cadeia de suprimentos, de tal forma que um produto passe pela cadeia no tempo mais curto com o mais baixo custo (Lee et al., 1997) e qualquer elemento da cadeia é fortemente dependente do sistema total (Stalk e Hout, 1990).

### **1.1.1 Sistema de logística integrado.**

Um sistema de logística integrado é composto por itens a serem processados em centros de produção e transportados até o consumidor final. Abrange cinco fases, que

são: busca de fornecedores, logística de aquisição, produção, logística de entrega e pós-venda.

Para se obter um conjunto de critérios, que permita decidir não apenas com base em custos, mas que sejam voltados às estratégias de uma indústria, deve-se avaliar o sistema logístico completo, considerando sua complexidade, as perdas de vendas no processo, o tempo de resposta às exigências do mercado, a satisfação dos clientes e o impacto quanto à posição no mercado. Além dessas análises globais, deve-se dividir os sistemas logísticos em três subsistemas: o de provisão, o de operação e o de distribuição.

No subsistema de provisão pode-se avaliar, dentre outros: disponibilidade de material, eficiência no transporte e estoque de matéria-prima. No subsistema de operação tem-se: responsabilidades, flexibilidade, quantidade de retrabalho, estabilidade, *lead time* (tempo de atendimento), qualidade dos produtos, capacidade ociosa, estoques no processo e estoques de produtos. No subsistema de distribuição avalia-se: custos e tempos de entrega, novos serviços e estoques no departamento de vendas e/ou rede de distribuição.

Nash (1954) demonstrou que a política de operação local, em cada uma das unidades empresariais autônomas, não resulta necessariamente na melhor solução de um sistema global de manufatura. Por essa razão, o modelo precisa considerar todos como partícipes de um conjunto com objetivo único, buscando o melhor resultado global.

O planejamento da capacidade de produção a longo prazo e o gerenciamento da demanda de mercado foram reconhecidos como campos em que a responsabilidade em

comum de comercializar e conduzir operações podia conduzir a pontos de vista contraditórios (Shapiro, 1977; Schonberger e Knod, 1991).

Além disso, nos anos oitenta, a turbulência sempre crescente do mercado mundial, associada ao sucesso da abordagem japonesa de fabricação, e o desenvolvimento inexorável da tecnologia de informação mostraram que a flexibilidade é muito mais importante que considerar apenas a taxa de utilização (Kimura e Terada, 1981), e apontou para o assunto crucial da administração dos estoques como uma ferramenta efetiva para estudar, ao mesmo tempo, tanto a demanda externa de mercado como a capacidade de produção interna (Hall, 1983).

### **1.1.2 Cadeia de valor.**

Forrester (1961) afirma que os cinco fluxos (dinheiro, pedidos, materiais, pessoas e equipamentos), em qualquer atividade econômica, estão inter-relacionados por meio de uma cadeia de informações. Atualmente esse relacionamento é definido como cadeia de valor, um conceito obtido pela extensão da definição de SCM (Brassler e Schneider, 2001).

Forrester (1961) descreveu assim o valor da informação: "Uma maior utilidade da informação pode ser obtida quando se melhoram as fontes de informação existentes e as decisões são baseadas em fontes novas e diferentes, que não foram usadas no passado. O valor de uma nova informação normalmente pode ser calculado com grande precisão, porém deve-se ter condições de quantificar qual será o ganho para o sistema, quando da alteração do fluxo atual de informações".



Kivijarvi e Tuominen (1991) apresentam um estudo sobre a importância da administração de uma cadeia de suprimentos como um método para avaliar os investimentos de distribuição e produção, dentro de uma indústria com diversas estratégias de arranjo de suas operações logísticas por duas principais razões: a primeira é que as técnicas tradicionais de análise de investimento não são facilmente suportadas por métodos computacionais; a segunda razão é que a combinação das diferentes estratégias de suas operações logísticas e seus efeitos necessita ser avaliada por meio de múltiplos e diversificados critérios e não apenas minimização de custos.

Um dos objetivos do planejamento agregado é encontrar a melhor forma de ajustar o sistema de produção, de forma a atender a demanda do mercado da maneira mais competitiva possível. Fischer et al. (1999) afirmam que desenvolver um planejamento estratégico de produção é desenvolver um padrão projetado de maneira a formular alternativas de manufatura, que objetivem melhorar as capacidades básicas industriais e apoiar o negócio e a estratégia da corporação, ressaltando a importância da cooperação e negociação entre agentes.

A complexidade da cadeia pode variar bastante de uma indústria para outra, bem como de uma empresa para outra. Na prática, as cadeias de suprimentos têm múltiplos produtos finais, compartilhando componentes, instalações e capacidades (Lalsare e Sem, 1995). O fluxo de materiais não é sempre uma rede arborescente, pois podem ser considerados vários modais de transporte e a lista de materiais (BOM) para os itens finais pode ser detalhada e extensa.

Também se pode afirmar que o termo produção, em si mesmo, não inclui somente o sistema de manufatura, mas abrange produção, processos e recursos. Esses

três subconjuntos, por sua vez, estão sujeitos à possibilidade de inovação, variação ou eliminação, como consequência de um processo contínuo de planejamento sistêmico.

Tradicionalmente, marketing, vendas, distribuição, planejamento, fabricação e o setor de compras das diversas organizações operam de forma independente ao longo da cadeia de suprimentos. Esses departamentos têm os seus próprios objetivos e são freqüentemente contraditórios, uma vez que o objetivo do departamento de marketing é o de atender a grandes consumidores, obtendo o máximo de vendas sem se preocupar com os objetivos do departamento de fabricação ou com as metas de distribuição. Muitas operações industriais são projetadas para maximizar a produção sem considerar os custos e com pouca consideração pelo impacto nos níveis de estoque e pelas capacidades de distribuição. Contratos de compra são muitas vezes negociados com muito pouca informação e fora dos padrões históricos de compras. O resultado desses fatores é que não há um plano único e integrado para a organização.

Sterman (1992) afirma que em um ambiente de indústria é impossível evitar completamente os efeitos de eventos externos. Em outras palavras, ambientes industriais têm sistemas dinâmicos e imprevisíveis. Então, o controle de estruturas internas é mais aplicável que o externo, gerando "padrões" de comportamento qualitativos. Claramente, há uma necessidade de um mecanismo pelo qual essas funções diferentes possam ser integradas. Daí a necessidade do sistema integrado de SCM.

Uma cadeia de suprimentos possui três fontes principais de incerteza: demanda (volume e mix), processo (resultado, paradas das máquinas e confiabilidade no transporte) e suprimento (qualidade das peças, confiabilidade na entrega).

### **1.1.3 SCM - Gerenciamento da cadeia de suprimentos.**

O gerenciamento da cadeia de suprimentos é uma estratégia pela qual a integração poderá ser alcançada e a coordenação entre os vários membros da cadeia é fundamental para sua efetiva administração. Magee et al. (1985) abordam formas de gerenciamento da logística atual.

Atualmente, o SCM é o foco dos estudos por duas razões:

a) um melhor planejamento e gerenciamento de sistemas relacionados complexos, tais como planejamento de materiais, administração de estoques, planejamento da capacidade produtiva e produção na cadeia de suprimentos, que conduzirão a uma melhoria global na produtividade de cada indústria;

b) os avanços das tecnologias de informação e de comunicação, complementados por sistemas de apoio de decisão sofisticados, tornam possível projetar, implementar e controlar estratégias por meio de sistemas integrados (Stock et al., 1998).

Ballou (2001) afirma que o gerenciamento de estoques na cadeia logística de uma empresa tem se tornado cada vez mais importante para sua própria sobrevivência no mercado.

Atualmente, formam-se também SCN fazendo com que a administração das mesmas seja crucial, dando vital importância à coordenação entre processos. O foco passou da simples criação de processos eficientes para a coordenação das atividades através do conhecimento que surge do fluxo de informações compartilhadas e a importância da estabilidade dessas cadeias (Riddalls, 2002).

Programas como *Just-in-time* (JIT), utilizados na produção (Burbidge, 1991), *Continued Replacement Problem* (CRP) e resposta rápida (Fisher et al., 1997), utilizados pelos varejistas, levaram à disseminação da informação de *scheduling*, fabricação e entrega entre as partes envolvidas. A informação compartilhada melhora a coordenação entre o processo de *supply chain*, capaz de reduzir os custos de estoque e fluxo de material (Strader et al., 1998; Gavirneni, 2002).

Um SCN é uma série de processos agregadores de valor (também chamados de *tier* (camada, estado ou fase) que envolve mais de uma empresa, começando no fornecedor de matéria-prima e terminando com o consumidor. Cada *tier* intermediário é um fornecedor para o *tier* adjacente cadeia abaixo e é um cliente para o próximo *tier* cadeia acima.

Esse processo torna-se dia-a-dia mais complexo, uma vez que os clientes estão se tornando mais exigentes e a globalização leva os fabricantes a buscarem mão-de-obra em diversos países. A variedade de produtos faz com que as previsões de demanda tornem-se mais complexas e exige a coordenação do SCM interno e externo.

O SCM tem duas metas, que são:

a) coordenar as atividades de cada *tier*, bem como a transição entre os mesmos, buscando menor tempo e custos;

b) ajustar o fornecimento à demanda do mercado, o que, leva a dois paradigmas de SCM: *make-to-sell* e *sense-and-respond* (Bradley e Nolan, 1998).

O problema básico é adquirir, produzir, estocar, transportar e vender as quantidades certas, de produtos certos, para os mercados certos, no tempo certo, da forma mais econômica. Para que isto possa acontecer, precisa-se definir:

a) em relação ao controle de estoque: políticas de armazenagem da matéria-prima e dos produtos acabados, previsão de vendas a curto prazo, mix de produtos nos pontos de estocagem, número, tamanho e local destes pontos de estocagem, estratégias “*pull*” e “*push*”;

b) em relação ao fluxo de informação e processamento de pedidos: procedimentos de venda relacionados ao pedido-estoque, métodos de transmissão das informações sobre os pedidos e as regras de pedidos;

c) em relação ao almoxarifado: espaços físicos, *layout*, configuração e regras de reposição;

d) em relação ao manuseio do material: equipamentos e políticas de substituição desses equipamentos, procedimentos de atendimento dos pedidos e ações para armazenar e recuperar os itens;

e) em relação às políticas de compra: escolha de fornecedores, *timing* de compras e tamanho de lotes;

f) em relação à proteção: procedimentos de manuseio, armazenagem, perdas e danos;

g) em relação à integração operação-produção/compra: quantidades agregadas, seqüência e tempos de produção/reposição;

h) em relação à manutenção: informações sobre a recepção, armazenamento e manuseio dos itens e análise de dados e procedimentos de controle. (Lee et al., 1997).

O trabalho apresentado por França et al. (1997) considera que o problema MSCLS é NP-Completo. Bitran e Yanasse (1982) mostraram que vários casos de problemas com um único item podem ser resolvidos em tempo polinomial, tornando-se

Np-completo quando um segundo item é introduzido. Maes et al. (1991) afirma que quando se considera tempo de preparação, o problema de se encontrar uma solução viável é NP-completo.

Também no trabalho apresentado por Staggemeir e Clark (2001) são apresentados diferentes modelos de dimensionamento de lotes. Inicialmente apresenta-se um modelo básico para dimensionamento de lotes para minimizar custos de estocagem e se classifica o problema como trivial. A inclusão da restrição de capacidade torna o problema não trivial. O problema torna-se não linear ao se acrescentar os custos de *setup*. Para problemas multiestágios com restrições de capacidade o trabalho o classifica como NP-completo.

#### **1.1.4 Estratégias de gestão da demanda.**

Existem quatro estratégias para a gestão de demanda, representadas pela figura 1.1, que são:

a) *Engineer-to-Order* – ETO. Esta estratégia dá ênfase à fase do projeto, que é usualmente desenvolvida somente após o recebimento do pedido do cliente. Após o projeto ser aprovado pelo cliente é que se inicia o processo de fabricação. Como consequência, não existe estoque antes da chegada do pedido, nem mesmo durante a fase de projeto. A dificuldade dessa estratégia é implantar controles em um ambiente dinâmico, de incerteza e complexidade (Bertrand e Muntslag, 1993).

b) *Make-to-Order* – MTO. A produção dos produtos desejados somente se inicia após a chegada de um pedido confirmado do cliente. Não trabalha com estoques de produtos acabados. É adequada a produtos com demanda pouco contínua e que possuem

alto custo de estocagem, ou perecíveis, sendo desaconselhável a produtos cujo mercado tenha o fator velocidade de atendimento como vital (Kingsman et al., 1996). Kolish (2000) propõe um modelo para minimizar os atrasos de atendimento das ordens de compra emitidas pelos clientes de uma empresa MTO.

c) *Assemble-to-Order* – ATO. Os principais componentes de um determinado produto são produzidos com base em uma previsão de demanda, sendo esses componentes produzidos e armazenados antes da chegada do pedido. Quando o pedido chega, é executada a montagem do produto, utilizando os componentes anteriormente produzidos. Tem como vantagem a redução do *lead time* de atendimento, já que esse fica reduzido ao tempo de montagem final. É adequado quando um pequeno grupo de componentes serve para a produção de um grande número de produtos finais, sendo que um produto se diferencia do outro em termos de inclusão ou troca de um ou poucos componentes (Bertrand et al., 2000).

d) *Make-to-Stock* – MTS – O produto tem sua fabricação iniciada com base em uma previsão de demanda. A chegada do pedido provoca o seu atendimento praticamente imediato. O *lead time* de atendimento é muito reduzido. É adequado para produtos com demanda bastante previsível, porém o custo de estoque pode ser crítico, principalmente para empresas que possuam grande variedade de itens comercializados e demanda com previsão deficiente (Pacheco e Cândido, 2001).

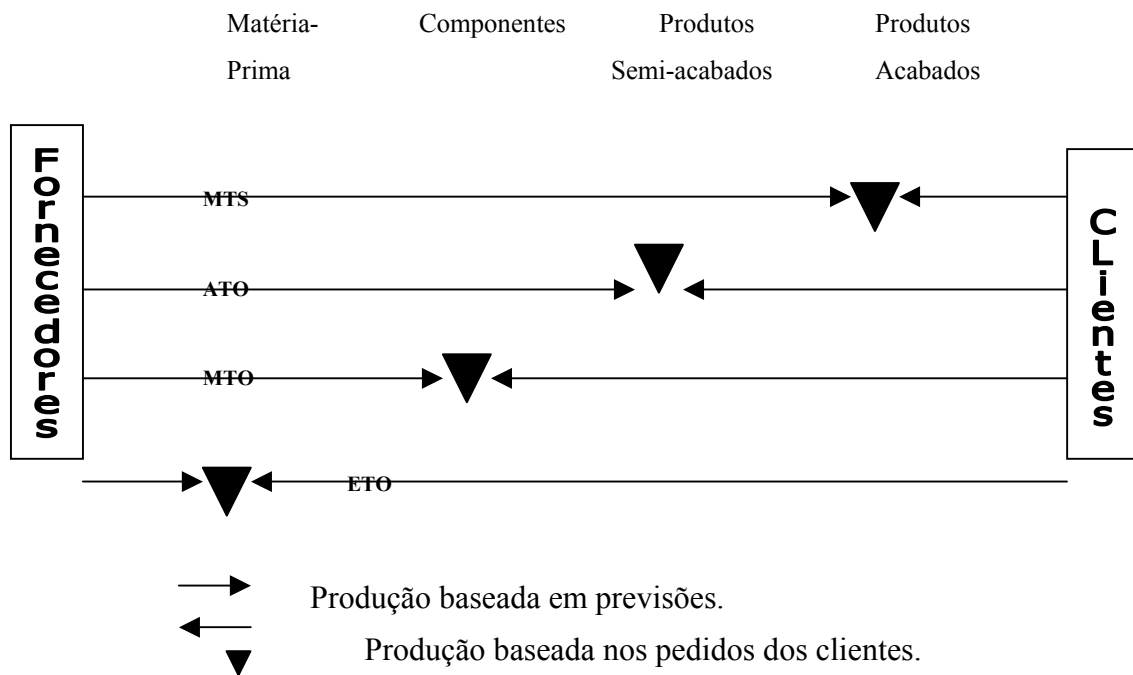


Figura 1.1 Representação dos tipos de gestão de demanda.

Empresas estão no mercado para atender os consumidores, competindo com todas as demais empresas e suas diferentes estratégias de SCM, com base no preço, *expertise* técnico, tempo de atendimento e confiabilidade de entrega. Kingsman et al. (1996) ressaltam que um sistema de apoio à decisão é vital, propondo que as fases de previsão, planejamento da capacidade e análise do mercado estejam interligadas em tempo contínuo. Tobin et al. (1988) concluíram que a *Strike rate*, que representa a proporção de cotações que se tornam pedidos firmes, varia de 3% até virtualmente 100% e está diretamente baseada na qualidade do fornecimento da informação de preço e data de entrega, o que ressalta ainda mais a importância de um bom SCM.

### 1.1.5 Conceito de *lead-time*.



O *lead time* de atendimento é o tempo entre o recebimento de um pedido e a entrega do item ao cliente.

O *lead time* de produção é definido como o tempo necessário para o departamento de produção aceitar uma ordem de produção e a produção em si do produto final. Wouters (1991) apresenta várias maneiras de reduzir o *lead time* de produção e as suas conseqüências internas e externas e aborda a importância de se levar em conta o fluxo de caixa da empresa.

O problema do *lead time* de atendimento agrava-se quando a cadeia de produção de um determinado produto é composta por processos que são executados dentro dos fornecedores, isto é, parte importante do processo de fabricação é iniciada nos fornecedores.

## **1.2 Alguns campos de pesquisa em SCM.**

### **1.2.1 Dimensionamento de lotes.**

O problema industrial de dimensionamento de lotes de produção e a correspondente programação da produção, com a finalidade de atender os prazos estabelecidos, respeitando a capacidade limitada de fabricação, considerando os custos de armazenamento dos itens e o custo de produção, bem como levando em conta o tempo de preparação das máquinas dependente da seqüência do processo (Toledo et al., 2000), pode ser modelado pela linearidade e aproximando-se bastante de uma situação real.

O problema de dimensionamento de lotes de produção surgiu como parte da lógica do MRP, cujo objetivo é determinar um plano de produção baseado em previsões de demanda de cada produto final ao longo de um horizonte de planejamento de T períodos, com estrutura conhecida de produtos e tempo de produção de cada item também conhecido.

O problema de dimensionamento de lote, abordado inicialmente por Erlenkotter e Harris (1990), chamado de *Economic Order Quantity* (EOQ), considerava o processo de produção em um único nível, sem restrições de capacidade, com demandas estacionárias e horizonte de fabricação infinito. No tempo, novos estudos surgiram impondo restrições adicionais, tais como: o *Economic Lot Scheduling Problem* (ELSP) (Rogers, 1958 e Elmaghraby, 1978), com capacidade disponível limitada; *Capacitated Lot Sizing Problem* (CLSP) com capacidade disponível limitada e horizonte de planejamento finito dividido em vários períodos, com dimensionamento de lotes em cada período, modelo esse que foi contestado por Bitran e Yanasse (1982) e por Eppen e Martin (1987) uma vez que não considera o problema de programação dos lotes dentro de cada período.

Salomon et al. (1993) e Fleischmann (1994) apresentam o modelo *Discrete Lot Sizing and Scheduling Problem* (DLSP), que integra as decisões relacionadas ao dimensionamento do lote à programação da produção, dividindo cada período em micro-períodos e restringindo em cada micro período a fabricação de apenas um item, utilizando toda a capacidade disponível. Já no modelo *Proportional Lot Sizing and Scheduling Problem* (PLSP) permite-se uma única troca de itens por período (Drexel e Haase, 1995 e Kimms, 1999). Já o modelo *General Lot Sizing and Scheduling Problem*

(Fleischmann e Meyr, 1997 e Meyr, 2002) aceita um maior número de troca de itens por macro período, respeitando-se a capacidade disponível.

O modelo matemático, proposto por Toledo et al. (2002) para dimensionamento de lotes e programação da produção, representa simultaneamente dois estágios, um primeiro estágio de preparação e mistura de xaropes e um segundo estágio de engarrafamento de xaropes. A função objetivo visa à minimização dos custos de estoque (itens) somados aos custos de preparação (itens e xaropes) e custos de produção (itens e xaropes). As 19 restrições consideram os diversos modelos de interdependência de lotes e programação de produção, obtendo um modelo muito próximo da realidade. Devido à complexidade computacional detectada, o autor sugere a adoção de metaheurísticas.

Chen et al. (2000) ressaltam a importância da informação da demanda dos clientes finais ser centralizada na indústria e quantifica o impacto do *lead-time* de distribuição no efeito *bullwhip* e na performance de uma cadeia de suprimentos.

### **1.2.2 Efeito *bullwhip*.**

Burbidge (1984) postulou a lei da dinâmica industrial quando afirmou que se a demanda de produto é transmitida por meio de uma série de controles de estoque, então haverá um acréscimo da variação em cada uma dessas transferências.

O estudo de incerteza na demanda em cadeias de suprimento conduz a um conceito chamado de efeito Forrester ou efeito *bullwhip*. Forrester (1961) fez a primeira descrição acadêmica do efeito *bullwhip*. Desde então, pesquisadores da área de administração de operações discutem as suas causas e efeitos.

A sazonalidade e a variação da demanda resulta em falhas no atendimento, no caso de baixa capacidade, ou baixa utilização de recursos durante os tempos de demanda baixa. Em ambos os casos, a ineficiência crescente é cara para as empresas e reduz a sua rentabilidade.

Estudos realizados por Forrester (1961) e Sterman (1992) identificaram, como uma causa do efeito *bullwhip*, a falta de um ciclo de informação adequado entre empresas, seguida por decisões incompletas ou demoradas. Os autores sugerem que o processo deve ser visto como um todo.

Nash (1954) identificou como causa das incertezas nas informações quanto à demanda, por parte dos consumidores finais, a política de compras, principalmente para os itens de variações sazonais. Lee et al. (1993) sugeriram o desenvolvimento de sistemas de informação que avaliem melhor o gerenciamento da demanda, tais como o acesso via Internet aos bancos de dados dos Pontos de Venda, permitindo que as mudanças de demanda possam ser previstas.

Sterman (1992) criou o jogo da Distribuição de Cerveja, que é uma simulação do efeito da correlação que se forma entre quatro posições: varejista, atacadista, distribuidor e fábrica, e utilizou os conceitos de sistema dinâmico. O cliente só tem contato com o varejista, conseqüentemente ocorrem demoras no recebimento das ordens de compra recebidas e também na entrega das cervejas. A empresa não tem informações sobre a demanda dos clientes, o gerente é inexperiente e desconhece completamente o comportamento histórico do mercado. O resultado é um fracasso empresarial.

Lee et al. (1997) resumem as causas de incertezas na demanda em quatro categorias:

a) atualização da previsão de demanda. Cada entidade, ao longo da cadeia, é a responsável por efetuar a sua própria ordem de compra, visando a repor estoques, dentro de níveis de segurança definidos por uma política individual. Em situações em que o *lead time* de entrega é longo, podem existir estoques de segurança suficientes para atender a semanas de consumo, o que provoca grandes flutuações nas ordens de compra;

b) agrupamento de pedidos. As empresas podem agrupar pedidos com o objetivo de diminuir o custo do processamento de ordens mais freqüentes, diminuir o custo de transporte e utilizar carga completa do veículo. Esses fluxos irregulares de ordens causam o efeito *bullwhip* para os fornecedores e, quando o ciclo de pedidos se sobrepõe, há um agravamento ainda maior do problema;

c) flutuação de preço. Promoções especiais resultam em compras de grandes quantidades pelos clientes e o estoque pessoal aumenta. Os clientes deixam de comprar quando se retorna à situação normal de venda. Como resultado, o padrão de compras não reflete o padrão de consumo;

d) racionamento, falta de produto e grandes *lead times* de atendimento. Um fabricante pode racionar seus produtos quando a demanda de um produto excede a previsão. Os clientes, em contrapartida, podem exagerar a quantidade do seu pedido para contornar o racionamento. Isto torna impossível, para o fabricante, determinar a real demanda de seu produto.

Hieber (1998) ressalta a importância de se considerar a variação da demanda em uma cadeia de suprimentos como condição para o sucesso de qualquer ferramenta de análise dessas cadeias.

Carlsson e Fuller (2001) demonstram que, quando as etapas de uma cadeia de suprimentos utilizam suporte da tecnologia para compartilhar informações, conseguem obter, no decorrer do tempo, estimativas de demanda cada vez melhores e o efeito *bullwhip* pode ser significativamente reduzido.

Entre outros modelos de gestão de estoques por ponto de reposição, Carvalho e Fernandes (1999) propõem a modelagem da cadeia de suprimentos por meio do fluxo em redes. Esse modelo foi linearizado por Furtado e Carvalho (2001).

### **1.3 Alguns modelos para a solução de problemas de dimensionamento de lotes.**

Brandolese e Cigolini (1999) propõem a criação de estoques intermediários entre dois processos durante a etapa de produção. Shapiro (1977), Schonberger e Knod (1991) relacionam o dimensionamento de lotes com o problema de *scheduling* e Christopher e Braithwait (1992), Lovejoi (1990) e Walker (1992) consideram aspectos dinâmicos da demanda.

Lambert e Stock (1992) alertam para a dificuldade de se administrar picos súbitos de demanda de mercado, sem se prever procedimentos adequados, devido à não disponibilidade de dados. Ronen et al. (2001) propõem diversas maneiras de gerenciar esses picos. Verganti (1997) alerta para o erro de se capturar informações sobre as exigências de demanda dos clientes, focando-se apenas no comportamento de compra

de cada cliente em particular. Wacker (1985) apresenta alguns modelos, também caracterizados por uma estrutura complexa multiestágio de materiais, que propõem administrar situações de demanda com picos por meio de sistemas MRP.

O comportamento dinâmico de sistemas de controle de estoque pode ser compreendido por duas abordagens encontradas na literatura:

a) a primeira abordagem usa a teoria de controle linear para analisar sistemas únicos ou sistemas de *multi-loops*. Essa abordagem analítica, primeiramente introduzida por Simon (1952), variou muito. A contribuição desse autor foi aplicar conceitos da transformada de Laplace a sistemas de tempo contínuo com um único *loop*; seu trabalho foi logo estendido a sistemas discretos por Vassian (1955), que aplicou Z-transformadas para tal propósito. Porém, viu-se que a abordagem baseada na análise não se ajusta muito bem aos sistemas reais de controle de produção, uma vez que esses problemas representam uma grosseira simplificação do que de fato acontece na prática. Além disso, uma mudança secundária pode fazer a teoria existente ineficaz. Os modelos baseados na análise exibem uma robustez muito baixa, sendo essa a sua desvantagem principal;

b) a segunda abordagem encontrada é aquela que usa uma metodologia específica, chamada antigamente de dinâmica industrial (Forrester, 1961) e, agora, freqüentemente chamada de Sistema Dinâmico ou de Gerenciamento Dinâmico (Luenberger, 1979). Basicamente, esse método envolve a simulação das equações de movimento no modelo. Não obstante, a desvantagem principal é que a simulação acontece em uma base de tentativa e erro e existem poucas diretrizes por meio das quais o pesquisador poderia melhorar desempenhos (Burbidge, 1991).

Vários autores tentaram obter *insight* útil no comportamento dinâmico, de produção e dos sistemas de estoque, usando essas duas ferramentas básicas, algumas vezes dando origem a aproximações híbridas.

A diferença óbvia entre as duas abordagens, entretanto talvez não a mais significativa, é que a primeira considera tempo-discreto e a segunda considera tempo-contínuo para os sistemas de produção-estoque.

A linha de pesquisa anterior, relacionada aos modelos de tempo-discreto de produção e sistemas de estoque foi apresentada por O'Grady e Bonney (1987) e provê um *framework* para a aplicação da moderna teoria de sistemas de controle para aperfeiçoar uma gama extensa de sistemas industriais, inclusive sistemas multiestágios. Como o processo de otimização se baseia no padrão de demanda futuro, não necessariamente constante, porém com certeza um padrão conhecido, essa desvantagem dá ao modelo uma gama limitada de aplicabilidade, uma vez que previsões perfeitas raramente estão disponíveis na prática, principalmente sob mudanças bruscas de demanda. Do ponto de vista estrutural, o sistema de produção-estoque é representado como um sistema de tempo-discreto, dinâmico e determinístico, caracterizado por um conjunto de variáveis de estado associado a equações diferenciais.

Essa linha de pesquisa foi melhorada por Popplewell e Bonney (1987) e Bonney et al. (1994), que representaram dois sistemas de controle de produção multi-produtos e multi-níveis em condições gerais, por meio de diagramas de bloco, e calcularam a resposta de cada sistema para diferentes padrões de demanda; porém, a manipulação de Z-transformadas e a antitransformação final, necessária para obter o comportamento do sistema no tempo-domínio, é bastante incômoda do ponto de vista computacional, mesmo sem levar em conta os limites de capacidade de produção.



O primeiro modelo de sistema de produção em tempo-contínuo, considera pedidos integrados, chamado *Inventory and Order Based Production Control System*, (Towill,1982) é baseado em transformada de Laplace de um único produto, um nível de produção e um sistema de estoque onde as decisões nos níveis de produção são tomadas utilizando a demanda atual (*forward*) e os desvios da previsão de estoque (*backward*). Esse modelo foi estendido para um único-produto, sistema de produção-estoque multi-nível por meio da abordagem de simulação chamada de Dinâmica Industrial (Edghill et al. 1989).

O modelo analítico anteriormente proposto por Towill (1982; 1991 e 1992) foi melhorado por meio de quatro novos modelos (Edghill e Towill, 1989), representando estratégias de programação diferentes, todos tendo resultados praticamente aproximados. Já o modelo proposto por Del Vecchio e Towill (1994) emprega uma aproximação de simulação baseada no conhecimento tirado da teoria de sistemas especialistas em que os usuários podem gerar um modelo de produção e um sistema de distribuição sob exame das respostas a uma sucessão de consultas pré-definidas. Esse modelo é comparado, então, à otimização teórica do sistema de produção em tempo-contínuo baseado em pedidos integrados (Towill, 1997), e o sistema especialista baseado no projeto ótimo é encontrado muito próximo dos parâmetros baseados na teoria de controle.

Uma investigação mais aprofundada neste tópico pode ser achada no modelo de Edghill e Towill (1990), em que a frequência das respostas é considerada como uma avaliação geral e ferramenta de projeto.

Melhorias neste campo de pesquisa foi apresentada por Wikner et al. (1992) a partir da análise do comportamento dinâmico dos sistemas de produção e estendida ao nível da cadeia de suprimentos por Houlihan (1985).

A representação por meio de modelos dinâmicos de fluxo em rede (Carvalho e Fernandes., 1999) permite uma visão diagramática de um problema físico, facilitando a definição pelas estruturas gráficas, o que facilita a compreensão tanto de especialistas como de não especialistas. Aspectos visuais de rede facilitam a interpretação dos resultados.

#### **1.4 Formulação matemática do problema de dimensionamento de lotes.**

Bahl et al. (1987) afirmam que o problema monoestágio de dimensionamento de lotes de itens a serem produzidos pode ser subdividido em várias categorias, por exemplo: pode ser considerado para um único item ou para vários itens, com ou sem restrição de capacidade ou, ainda, pode considerar ou não o tempo de preparação.

Para a formulação matemática do problema de dimensionamento de lotes de produção e fluxo de materiais ao longo da cadeia de suprimentos sujeito às restrições de capacidade em sistemas multiestágios, necessita-se inicialmente apresentar a formulação matemática para um problema de dimensionamento de lotes monoestágio para um único item, cujo objetivo é minimizar os custos envolvidos, atendendo a demanda e obedecendo às limitações de recursos de produção de cada período.

##### **1.4.1 Formulação do problema monoestágio e único item.**

O modelo matemático para esse problema, de dimensionamento de lotes monoestágio para um único item, segundo Trigeiro et al.(1989) , é o seguinte:

Considere-se os seguintes dados:

- $N$  : número de itens a serem produzidos ( $i = 1, \dots, N$ );
- $T$  : número de períodos ( $t = 1, \dots, T$ );
- $E_{it}$  : estoque de escalão do item  $i$  no período  $t$ ;
- $c_{it}$  : custo de produção do item  $i$  no período  $t$ ;
- $h_{it}$  : custo de estoque do item  $i$  no período  $t$ ;
- $e_{it}$  : custo de estoque de escalão do item  $i$  no período  $t$ ;
- $d_{it}$  : demanda do item  $i$  no período  $t$ ;
- $s_{it}$  : custo de preparação do item  $i$  no período  $t$ ;
- $v_{it}$  : recurso utilizado na produção do item  $i$  no período  $t$ ;
- $f_{it}$  : recurso utilizado na preparação do item  $i$  no período  $t$ ;
- $b_t$  : disponibilidade de recursos no período  $t$ ;
- $B_i$  : um número suficientemente grande para o item  $i$ .

E as seguintes variáveis:

- $x_{it}$  : quantidade produzida do item  $i$  no período  $t$ ;
- $I_{it}$  : quantidade estocada do item  $i$  no período  $t$ ;

$$y_{it} : \begin{cases} 1, \text{ se houver produção do item } i \text{ no período } t; \\ 0, \text{ c.c.} \end{cases}$$

$$\min z = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (c_{it} x_{it} + h_{it} I_{it} + s_{it} y_{it}) \quad (1)$$

sujeito a:

$$I_{i,t-1} + x_{it} - I_{it} = d_{it}, \quad i = 1, \dots, N \text{ e } t = 1, \dots, T \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N (v_{it} x_{it} + f_{it} y_{it}) \leq b_t, \quad t = 1, \dots, T \quad (3)$$

$$x_{it} \leq B_i y_{it}, \quad i = 1, \dots, N \text{ e } t = 1, \dots, T \quad (4)$$

$$x_{it}, I_{it} \geq 0, \quad i = 1, \dots, N \text{ e } t = 1, \dots, T \quad (5)$$

$$y_{it} \in \{0, 1\}, \quad i = 1, \dots, N \text{ e } t = 1, \dots, T \quad (6)$$

A função objetivo (1) minimiza a soma dos custos de produção, estoque e de preparação ao longo do horizonte de planejamento. As equações (2) indicam o balanceamento entre a produção e o estoque, determinando que a demanda de um item será atendida pela produção do período acrescido do estoque do período anterior, e o excedente ficará estocado. As restrições (3) representam as restrições de capacidade que limitam a utilização de recursos pela sua disponibilidade em cada período. As restrições (4) garantem que, se não houver produção de um item no período, então não haverá preparação no mesmo e atribui-se a B um valor em função da demanda total de um

item; portanto, para cada item tem-se:  $B_i = \sum_{it=1}^T d_{it}$ . As restrições (5) impõem a não negatividade das variáveis de estoque e de produção. As restrições (6) indicam tratar-se de variáveis binárias.

O modelo desenvolvido por Trigeiro et al. (1989) é um método heurístico que propõe utilizar a técnica da relaxação Lagrangeana, relaxando as restrições de capacidade (3), obtendo vários subproblemas, um para cada item. A seguir, resolvem-se os subproblemas por meio da programação dinâmica, aplicando-se o algoritmo de Wagner e Within (1958).

O valor da solução do problema lagrangeano determina um valor de limitante inferior ao problema original (Tempelmeier e Derstroff, 1996). A atualização dos multiplicadores de Lagrange é feita utilizando-se o método de otimização do subgradiente (Held et al., 1974; Camerini et al., 1975 e Espejo e Galvão, 2001), obtendo-se o melhor (maior) limitante inferior.

Porém, por se tratar de *Mixed-Integer Programming* (MIP), tem-se que o valor do melhor limitante inferior pode ser menor que o valor ótimo da função objetivo do problema original, devido ao chamado “*gap* de dualidade”, que consiste na diferença entre o valor ótimo da função objetivo do problema dual lagrangeano (melhor limitante inferior) e o valor ótimo da função objetivo do problema original (Araújo e Arenales; 2000).

Trigeiro et al. (1989) propõem a avaliação da solução obtida pela diferença percentual entre a função objetivo para a melhor solução factível encontrada (limitante superior) e o valor do melhor limitante inferior, chamada de “*gap* da solução”. Quando

o “*gap* da solução” é pequeno, pode-se dizer que o valor da função objetivo obtido pela solução factível está próximo do ótimo.

Porém, quando o *gap* da solução é alto, não se pode afirmar que o valor obtido pela solução factível está longe do valor ótimo, ou se existe um *gap* de dualidade grande. Por essa razão, neste trabalho não se buscou a limitante inferior, calculando-se o *gap* da solução diretamente com as soluções iniciais obtidas por meio da heurística de Wagner e Within (1958).

#### 1.4.2 Formulação do problema multiestágio e único item.

Como o problema considera sistema multiestágio, em que a produção de um item deve ser suficiente para compor os lotes de seus sucessores, além da sua própria demanda, usa-se a notação abaixo para o modelo matemático, segundo Billington et al. (1983) :

$S(i)$  : conjunto dos itens sucessores imediatos do item  $i$ ;

$P(i)$  : conjunto dos itens predecessores imediatos do item  $i$ ;

$r_{ij}$  : quantidade necessária do item  $i$  para compor uma unidade do item  $j$ .

$$\min z = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (c_{it} x_{it} + h_{it} I_{it} + s_{it} y_{it}) \quad (7)$$

sujeito a:

$$I_{i,t-1} + x_{it} - I_{it} = d_{it} + \sum_{j \in S(i)} r_{ij} x_{jt}, \quad i = 1, \dots, N \text{ e } t = 1, \dots, T \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^N (v_{it} x_{it} + f_{it} y_{it}) \leq b_t, t = 1, \dots, T \quad (9)$$

$$x_{it} \leq B_i y_{it}, i = 1, \dots, N e t = 1, \dots, T \quad (10)$$

$$x_{it}, I_{it} \geq 0, i = 1, \dots, N e t = 1, \dots, T \quad (11)$$

$$y_{it} \in \{0,1\}, i = 1, \dots, N e t = 1, \dots, T \quad (12)$$

A função objetivo (7) minimiza a soma dos custos de produção, estoque e de preparação ao longo do horizonte de planejamento. As equações (8) indicam o balanceamento entre a produção e o estoque, determinando que a demanda de um item acrescida do estoque de escalão será atendida pela produção do período mais o estoque do período anterior. O excedente ficará estocado. As restrições (9) representam as restrições de capacidade que limitam a utilização de recursos pela sua disponibilidade em cada período. As restrições (10) garantem que, se não houver produção de um item no período, então não haverá preparação no mesmo. Nesse caso, atribuiu-se a B um valor em função da demanda total de um item, sendo que para cada item tem-se:  $B_i = \sum_{t=1}^T d_{it}$ . As restrições (11) impõem a não negatividade das variáveis de estoque e de produção. As restrições (12) indicam tratar-se de variáveis binárias.

### 1.4.3 Formulação do problema multiestágio e estoque de escalão.

O problema proposto considera estoque de escalão e, portanto, para o item  $i$ , período  $t$ , item precedente  $j$ , tem-se o estoque de escalão dado por:

$$E_{it} = I_{it} - \sum_{j \in S(i)} r_{ji} E_{jt} \quad (13)$$

e o custo de estoque de escalão dado por:

$$e_{it} = h_{it} - \sum_{j \in P(i)} r_{ji} h_{jt} \quad (14)$$

Uma vez que é necessário respeitar a equivalência, tem-se:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T e_{it} E_{it} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T h_{it} I_{it} \quad (15)$$

A demanda de escalão é a demanda do item  $i$  mais a demanda de seus sucessores e é dada por:

$$D_{it} = d_{it} + \sum_{j \in S(i)} r_{ij} D_{jt} \quad (16)$$

A equação do balanceamento para um item  $i$  num período  $t$ , em termos de estoque de escalão é dada por:

$$E_{i,t-1} + x_{it} - E_{it} = D_{it} \quad (17)$$

Assim sendo, a formulação em estoque de escalão para o problema de dimensionamento de lotes em ambiente multiestágio, é dada por:

$$\min z = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (c_{it} x_{it} + e_{it} E_{it} + s_{it} y_{it}) \quad (18)$$

$$E_{i,t-1} + x_{it} - E_{it} = D_{it} \quad i=1 \dots N \text{ e } t=1 \dots T \quad (19)$$



$$\sum_{j \in S(i)} r_{ij} E_{jt} - E_{it} \leq 0 \quad i = 1 \dots N \text{ e } t = 1 \dots T \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^N (v_{it} x_{it} + f_{it} y_{it}) \leq b_t \quad t = 1 \dots T \quad (21)$$

$$x_{it} \leq B_i y_{it} \quad i = 1 \dots N \text{ e } t = 1 \dots T \quad (22)$$

$$x_{it}, E_{it} \geq 0 \quad i = 1 \dots N \text{ e } t = 1 \dots T \quad (23)$$

$$y_{it} \in \{0,1\} \quad i = 1 \dots N \text{ e } t = 1 \dots T \quad (24)$$

## 1.5 Metodologia de França et al. (1997).

### 1.5.1 Introdução à heurística proposta por França et al. (1997).

Neste ponto detalham-se os quatro passos da heurística desenvolvida por França et al. (1997), utilizada como base inicial para o problema SCM a ser apresentado no capítulo seguinte.

### 1.5.2 Passo 1 (P1)

O primeiro passo (P1) do algoritmo, visa a obter uma solução inicial para o problema aplicando o algoritmo de programação dinâmica de Wagner e Whitin (1958). Esse algoritmo encontra a solução ótima de um problema de dimensionamento de lotes monoestágio para um único item, sem levar em conta as restrições de capacidade ao longo de um horizonte de planejamento.

O problema de dimensionamento de lotes chamados monoestágio é determinar as quantidades a serem produzidas e os estoques de  $N$  itens com demanda conhecida ao longo de  $T$  períodos. O objetivo é minimizar os custos envolvidos, atendendo a demanda e obedecendo às limitações de recursos de produção de cada período. A demanda e os custos envolvidos podem variar de um período para outro, bem como as limitações de capacidade.

Clark e Armentano (1993) demonstraram a equivalência entre a formulação para problema com estoque de escalão, equações (18) a (24) e a formulação para problema monoestágio e único item, equações (1) a (6).

Note-se que nas equações de balanceamento (19) não há dependência entre os itens, como havia no modelo anterior; essa dependência surge, agora, nas inequações (20). O conjunto de equações (20) garante que o estoque de escalão de um item seja suficiente para suprir o estoque de escalão de seus sucessores imediatos.

Aplicando-se a relaxação lagrangeana (Espejo e Galvão, 2001) e relaxando-se o conjunto de restrições (20) e (21), obtemos um modelo de dimensionamento de lotes monoestágio não capacitado.

Tal modelo pode ser decomposto em  $N$  subproblemas, um para cada item. Pode, então, ser aplicado o algoritmo de Wagner e Whitin (1958), obtendo um limitante inferior para o problema original. A solução encontrada pode ser inviável com relação às restrições relaxadas, tornando-se necessária a utilização de algum outro procedimento para viabilizar esta solução. Em seguida, a demanda é recalculada para os predecessores imediatos com base na solução obtida anteriormente.

Aplica-se novamente o algoritmo para esses itens. Após  $N$  aplicações do algoritmo, reúnem-se as soluções obtidas, encontrando uma solução inicial para o problema original. Como as restrições de capacidade foram desconsideradas, a solução provavelmente será inviável com relação à capacidade para algum período  $t$  ( $t = 1 \dots T$ ).

O excedente de recursos utilizados em relação à capacidade disponível no período violado é medido pela função Excesso ( $t$ ) e representa uma medida da infactibilidade de uma solução em cada período. Essa função não informa se existem sobras de recursos no período, pois, quando isto ocorre, a função assume valor nulo. Caso a solução seja inviável, aplica-se um procedimento de viabilização, melhoria e alteração, baseado em transferências de produção entre períodos.

As transferências de uma quantidade ( $q$ ) de um período origem ( $t$ ) para outro período destino ( $\tau$ ), anterior ou posterior, devem manter a viabilidade inter-escalão. Por essa razão, haverá uma certa quantidade máxima ( $M_{it\tau}$ ) permitida para se efetuar determinada transferência. Haverá também outra quantidade de itens necessária para se eliminar o excesso de recursos utilizados em um determinado período, excesso este relativo ao total de recursos disponíveis em um determinado período.

Para calcular a quantidade máxima a ser transferida ( $M_{it\tau}$ ) para um período anterior ( $\tau < t$ ), tem-se que, ao deduzir  $q$  unidades do lote ( $x_{it}$ ), deve-se atualizar o estoque de escalão do item  $i$ . Acrescentam-se as mesmas  $q$  unidades ao estoque de escalão do item  $i$ , do período  $\tau$  ao  $t-1$ , com o objetivo de garantir que o estoque de escalão de seus predecessores imediatos continuará a ser suficientes para prover o seu estoque de escalão.

Nos períodos em que ocorre a produção de todos os itens, sempre irá existir uma quantidade, pelo menos de um dos itens, que possa ser transferida. A limitação ocorre para itens que possuam predecessores, mas sempre existe pelo menos um item que não possui predecessor.

Em alguns casos poderá existir, para cada item, uma certa quantidade  $Q_{it} < M_{itr}$ ; capaz de reduzir a zero a parcela em Excesso (t) deste item, sem que haja sobra de recursos no período. Para avaliar uma determinada transferência  $(q, i, t, \tau)$  no processo de escolha entre várias transferências possíveis, pode-se utilizar um valor chamado razão, dado por:

$$Raz\tilde{o} = \frac{\Delta custo + \beta \cdot penalidade}{\Delta excesso} \quad (25).$$

A variação no custo de preparação ( $\Delta$  custo) dependerá do lote ser transferido em sua totalidade, ou da existência, ou não, de produção do item no período destino. Em geral, transferências para períodos posteriores fazem com que a variação do custo seja negativa, enquanto que para períodos anteriores a variação é positiva. No entanto, a variação dependerá em grande parte dos custos de preparação. Acrescenta-se à Razão uma penalidade sempre positiva. Essa penalidade depende dos valores de excesso de utilização de recursos nos períodos de origem e destino da transferência.

A soma ponderada do custo e da penalidade é feita para que se possa dar maior importância ou para a variação do custo ou para a variação do excesso. Aumenta o peso da variação do excesso, em relação ao peso da variação do custo, ao longo da aplicação dos passos regressivo e progressivo, uma vez que  $\beta =$  número de vezes em que esses

passos são aplicados. O acréscimo de  $\beta$  a cada ciclo reflete a grande importância do acréscimo ao valor de excesso de recursos para a escolha da transferência a ser efetuada.

No caso em que a solução é viável, antes e após a possível transferência, o valor obtido no cálculo da Razão será  $= \infty$ ; portanto, a transferência não será efetuada. No entanto, quando a solução antes e/ou depois da transferência é inviável, a Razão contabiliza um custo penalizado, que leva em conta a variação no consumo dos recursos em excesso.

### 1.5.3 Passo 2 (P2).

O segundo passo (P2) do algoritmo de construção de França et al. (1997) visa obter, a partir de uma solução inviável, uma solução viável por meio de transferências de produção entre períodos, escolhendo-se a transferência que apresentar a menor Razão, apresentada em (25). No passo regressivo ( $\tau < t$ ), para cada período  $t$  ( $t = T...2$ ) inviável são feitas tentativas para todas as transferências  $(q,i,t,\tau)$ .

As transferências são efetuadas até que o período se torne viável ou até que não existam mais transferências possíveis. Quando isto ocorre, o período anterior é então analisado. Se, ao final desse processo, a solução encontrada for inviável, o passo Progressivo ( $\tau < t$ ) é executado. Para cada período  $t$  ( $t = 1...T$ ) inviável são feitas tentativas de transferências, até que o período se torne viável ou não existam mais transferências possíveis.

Executam-se os dois passos até que uma solução viável seja encontrada, ou exceda um limite pré-estabelecido de passos. Nesse último caso, considera-se que o método falhou.

#### **1.5.4 Passo 3 (P3).**

O terceiro passo (P3) do algoritmo de construção de França et al. (1997), também progressivo ou regressivo, visa a obter, a partir também de transferências de produção entre períodos, melhoria nos custos finais do sistema; porém, somente permite movimentos que melhorem a função objetivo e não inviabilizem a solução.

Esse passo pode ser visto como uma heurística de busca local. Avalia duas quantidades para as transferências: uma é a quantidade máxima  $Mit\tau$ , e a outra é uma quantidade aleatória sorteada dentro do intervalo  $[1, Mit\tau]$ . O intuito do sorteio aleatório de quantidade é dificultar a ocorrência de ciclagem na execução dos procedimentos.

Nesse procedimento há também a possibilidade de não existirem movimentos possíveis que melhorem a função objetivo. Em razão disso, um procedimento alternativo permite reiniciar todo o processo a partir de uma nova solução.

#### **1.5.5 Passo 4 (P4).**

O quarto passo (P4) do algoritmo de construção de França et al. (1997) visa a reconfigurar uma solução viável ou inviável para que um dos passos anteriores possa ser novamente aplicado, resultando em uma solução nova, também viável ou não. As transferências são analisadas para cada item, num único passo, e uma quantidade

aleatória é sorteada entre  $[1, \text{Mitt}]$ . Os períodos considerados como origem e destino das transferências são ordenados de acordo com a utilização dos recursos. Para calcular a utilização dos recursos em cada período, define-se a função Folga (t), que representa a quantidade de recursos não utilizados no período e pode assumir valores negativos em períodos para os quais as capacidades foram violadas.

A partir desses valores, os períodos são classificados em ordem decrescente, ou seja, o procedimento tenta transferir a produção do item analisado dos períodos com menor folga para os períodos com maior folga. A primeira transferência possível é realizada, não procedendo qualquer avaliação com outros possíveis movimentos. Após efetuar-se essa transferência, o algoritmo passa para o item seguinte, isto é, somente uma transferência é efetuada para cada item. Após a análise dos  $n$  itens, o procedimento encerra.

O passo P3 é aplicado somente nas soluções viáveis. Enquanto não há uma solução viável, os procedimentos P2 e P4 são aplicados. O procedimento P4 não é aplicado na última iteração.

O fato da heurística não encontrar nenhuma solução viável não implica que o problema seja inviável, pois a heurística não garante que encontrará uma solução viável.

## **1.6 O modelo de Brandolese e Cigolini.**

Brandolese e Cigolini (1999) desenvolveram um modelo não linear, considerando explicitamente os limites da capacidade de produção sob condições dinâmicas para determinar o estoque estratégico, definido como o nível mínimo de estoque inicial necessário para suprir um pico súbito de produtos acabados, como

também o mínimo lapso de tempo entre dois picos sucessivos de modo a evitar falta de estoque.

A pesquisa de Brandolese e Cigolini (1999) analisou uma situação típica de uma empresa *Make-to-Stock Assemble-to-Order* (MTS-ATO), que produzia uma gama extensa de produtos acabados sob condições dinâmicas: a demanda de produtos acabados normalmente fixa, mas, a intervalos de tempo imprevisíveis, acontecia um pico significativo. O sistema de produção estudado compunha-se de duas fases (respectivamente relacionadas à fabricação de componentes e à montagem de produtos acabados), caracterizadas pelos seus tempos de fluxo e seus limites da capacidade de produção. A companhia precisava suprir os picos de demanda de altura máxima e duração determinados, também obedecendo ao *lead time* de entrega permitido.

Muitas companhias reais enfrentam esse tipo de problema, usando como recursos regras empíricas e intuição (Bartezzaghi e Verganti, 1995).

Russel e Taylor (1985) apresentam uma avaliação das regras de sequenciamento em uma empresa de montagem. O modelo encontra, sob amplas condições, o valor exato do estoque estratégico para a montagem de componentes, definido como o nível de estoque inicial mínimo de componentes necessários para suprir um pico súbito de demanda de produtos acabados, conhecido *a priori* em termos de altura e duração. De um ponto de vista metodológico, uma aproximação analítica foi adotada e deixou claras as ligações entre os resultados e os parâmetros de sistemas, permitindo a análise de sensibilidade de um modo direto.



## **1.7 Generalização dos modelos de MSCLSP para o contexto do SCM.**

Estudou-se a gestão da demanda como parte fundamental da estratégia competitiva de uma empresa (Volmann et al., 1993). Existem diversas estratégias de gestão da demanda, as quais se aplicam conforme a política de variedade de produtos e da presença da empresa em seu mercado.

Também se pesquisou o efeito da distorção da informação de demanda (*bull whip*), desde sua descoberta, por meio da Dinâmica Industrial (Forrester, 1961), cujo projeto foi proposto por Burns e Sivazlian (1978) e demonstrada a sua existência em uma cadeia de suprimentos por Kahn (1987) e posteriormente quantificada por Whang et al. (1995), visando à redução do efeito pela utilização de previsões exponenciais de demanda, tempo de atendimento dos pedidos e informação centralizada (Chen et al., 1998).

Pesquisou-se a modelagem da cadeia de suprimentos por meio do fluxo em redes (Carvalho e Fernandes, 1999), possível de ser linearizado (Furtado e Carvalho, 2001) entre outros modelos de gestão de estoques por ponto de reposição.

A representação pelos modelos dinâmicos de fluxo em rede (Carvalho e Fernandes, 1999) permite uma visão diagramática de um problema físico, facilitando a definição por meio de estruturas gráficas, melhorando a compreensão de especialistas ou não. Aspectos visuais de rede facilitam a interpretação dos resultados.

O trabalho de Hoesel et al. (2002) apresenta diversos algoritmos para resolver o problema de dimensionamento de lotes em tempo polinomial, considerando ambientes de produção com restrições de capacidade.

A pesquisa feita por Staggemeier e Clark (2001) apresenta diversos modelos de seqüenciamento e dimensionamento de lotes com ênfase nos casos de mono-estágio. Analisa cada diferente aspecto de tais modelos na área de Pesquisa Operacional e comenta sobre alguns métodos metaheurísticos de solução. Aborda a complexidade crescente de cada modelagem, à medida que restrições são acrescentadas ao modelo, o que resulta na classificação de nosso problema como NP-completo, quando os tempos de preparação são acrescentados ao problema.

No próximo capítulo formula-se matematicamente o problema proposto e apresenta-se a heurística. Esta pesquisa adaptou a heurística de França et al. (1997) ao problema de dimensionamento de lotes em ambiente multiestágio com restrições de capacidade de recursos, determinando-se um plano de produção para o item final e seus componentes, com o objetivo de encontrar a demanda prevista para cada horizonte de planejamento.

Considerou-se estoque de escalão e objetivo de minimizar a soma dos custos de produção, preparação, estoque e transporte, para o problema de dimensionamento de lotes de produção, estocagem e transporte, em uma cadeia de suprimentos sujeita a restrições de capacidade de produção em sistemas multiestágios.

## Capítulo 2

### Formulação e Modelo Proposto.

#### 2.1 Formulação do problema proposto.

A seguir, apresenta-se a formulação matemática para o problema de dimensionamento de lotes de produção, estocagem e transporte ao longo da cadeia de suprimentos geral e multiestágio, sujeita a restrições de capacidade de produção.

Considerem-se os seguintes dados:

- $S(i)$  : conjunto dos itens sucessores imediatos do item  $i$ ;
- $P(i)$  : conjunto dos itens predecessores imediatos do item  $i$ ;
- $E_{it}$  : estoque de escalão do item  $i$  no período  $t$ ;
- $r_{ij}$  : quantidade necessária do item  $i$  para compor uma unidade do item  $j$ ;
- $N$  : número de itens a serem produzidos ( $i = 1, \dots, N$ );
- $T$  : número de períodos ( $t = 1, \dots, T$ );
- $M$  : número de modais;
- $c_{it}$  : custo unitário de produção do item  $i$  no período  $t$ ;
- $e_{it}$  : custo unitário de estoque de escalão do item  $i$  no período  $t$ ;
- $s_{it}$  : custo de preparação para produção do item  $i$  no período  $t$ ;
- $d_{it}$  : demanda do item  $i$  no período  $t$ ;
- $F_{imt}$  : custo fixo de movimentação do item  $i$ , via modal  $m$  no período  $t$  por veículo;

- $w_{imt}$  : custo unitário de movimentação do item  $i$  via modal  $m$  no período  $t$ ;
- $k_{imt}$  : capacidade de transporte do item  $i$ , via modal  $m$  no período  $t$  por veículo;
- $nv_{imt}$  : número de veículos, via modal  $m$  no período  $t$  utilizado para transportar o item  $i$ ;
- $v_{it}$  : quantidade de recursos utilizada na produção de uma unidade do item  $i$  no período  $t$ ;
- $f_{it}$  : quantidade de recursos utilizada na preparação da produção do item  $i$  no período  $t$ ;
- $b_t$  : disponibilidade total de recursos no período  $t$ ;
- $B_i$  : um número suficientemente grande em relação ao item  $i$ .

e as seguintes variáveis :

- $x_{it}$  : quantidade a produzir do item  $i$  no período  $t$ ;
- $y_{it}$  : quantidade a estocar do item  $i$  no período  $t$ ;
- $q_{imt}$  : quantidade do item  $i$  enviada pelo modal  $m$  no período  $t$ ;
- $q_{it}$  : quantidade total enviada do item  $i$  no período  $t$ ;
- $z_{it}$  :  $\left\{ \begin{array}{l} 1, \text{ se houver produção do item } i \text{ no período } t; \\ 0, \text{ c.c;} \end{array} \right.$
- $\rho_{imt}$  :  $\left\{ \begin{array}{l} 1, \text{ se houver disponibilidade para o item } i \text{ do modal } m \text{ no período } t; \\ 0, \text{ c.c.} \end{array} \right.$

A função objetivo é a seguinte:

$$\min z = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (c_{it}x_{it} + e_{it}y_{it} + s_{it}z_{it} + \sum_{m=1}^M (w_{imt}q_{imt} + nv_{imt}F_{imt}) \rho_{imt}) \quad (26)$$

sujeito a:

$$y_{i,t-1} + x_{it} - y_{it} = d_{it} \quad i=1\dots N \quad t=1\dots T \quad (27)$$

$$\sum_{i=1}^N (v_{it}x_{it} + f_{it}z_{it}) \leq b_t \quad t=1\dots T \quad (28)$$

$$\sum_{j \in S(i)} r_{ij} E_{jt} - E_{it} \leq 0 \quad i=1\dots N \quad e \quad t=1\dots T \quad (29)$$

$$q_{it} = \sum_{m=1}^M q_{imt} \quad i=1\dots N \quad t=1\dots T \quad m=1\dots M \quad (30)$$

$$x_{it} \leq B_i z_{it} \quad i=1\dots N \quad e \quad t=1\dots T \quad (31)$$

$$nv_{imt} = \left\lfloor \left( \frac{q_{imt}}{k_{imt}} + 0,5 \right) \right\rfloor \quad i=1\dots N \quad t=1\dots T \quad m=1\dots M \quad (32)$$

$$q_{imt} \leq B_i \rho_{imt} \quad i=1\dots N \quad t=1\dots T \quad m=1\dots M \quad (33)$$

$$q_{imt} \geq 0 \quad i=1\dots N \quad t=1\dots T \quad e \quad m=1\dots M \quad (34)$$

$$x_{it}, y_{it} \geq 0 \quad i=1\dots N \quad e \quad t=1\dots T \quad (35)$$

$$z_{it} \text{ e } \rho_{imt} \in \{0,1\} \quad i=1\dots N \quad e \quad m=1\dots M \quad e \quad t=1\dots T \quad (36)$$

A função objetivo (26) minimiza a soma dos custos de produção, estoques, *setup*, transportes fixos e variáveis ao longo do horizonte de planejamento. As equações

(27) indicam o balanceamento entre a produção e o estoque, determinando que a demanda de um item será atendida pela produção do período mais o estoque do período anterior e o excedente ficará estocado. As restrições (28) representam as restrições de capacidade que limitam a utilização de recursos pela sua disponibilidade em cada período. O conjunto de restrições (29) garante que o estoque de escalão de um item deve ser suficiente para suprir o estoque de escalão dos seus sucessores imediatos. As equações (30) indicam que o total enviado é a soma dos envios parciais por modal. As restrições (31) garantem que, se não houver produção de um item no período, então não haverá preparação do mesmo; atribui-se a  $B$  um valor em função da demanda total de um item, portanto, para cada item, tem-se:  $B_i = \sum_{t=1}^T d_{it}$ . As equações (32) indicam o número de veículos necessários para transportar o item  $i$  no período  $t$ , utilizando o modal  $m$ . As restrições (33) garantem que, somente se houver disponibilidade do modal  $m$  no período  $t$ , ocorrerá o envio para o item  $i$ . As restrições (34) e (35) impõem a não negatividade das variáveis de produção, estoque e de transporte. As restrições (36) indicam tratar-se de variáveis binárias.

## **2.2 Representação matricial de estrutura de produtos.**

Neste item é mostrada a representação matricial de itens predecessores de estruturas serial, de montagem e geral dos produtos. Essa representação, por meio de matriz, teve por objetivo a simplificação computacional.

Conforme exemplificado nas Tabelas 2.1, 2.2 e 2.3, as linhas  $i$  representam cada um dos itens pertencentes ao sistema, e cada coluna  $j$  contém a quantidade de cada

um dos itens predecessores imediatos, necessária para compor cada item sucessor. As células  $(i, j)$ , em que  $i$  é igual a  $j$ , são necessariamente iguais a zero.

O conjunto dos sucessores imediatos do item  $j$ , representado por  $S(j)$ , é formado pelo conjunto de itens  $i$  correspondente a todas as linhas  $i$  que possuam valor diferente de zero na coluna  $j$ . O conjunto dos predecessores imediatos do item  $i$ ,  $P(i)$ , é formado pelo conjunto de itens  $j$ , correspondente a todas as colunas que possuam valor diferente de zero na linha  $i$ .

A Tabela 2.1 representa matricialmente a estrutura serial de um determinado produto. Em uma estrutura serial, com exceção do primeiro e do último item, todos possuem um único sucessor e um único predecessor. Cada linha poderá possuir, no máximo, uma coluna com valor diferente de zero e cada coluna poderá possuir, no máximo, uma linha com valor diferente de zero.

Itens (i) ↓	Predecessor Imediato (j) →	1	2	3
1		0	1	0
2		0	0	2
3		0	0	0

Tabela 2.1 Representação matricial de uma estrutura serial.

A Tabela 2.2 representa matricialmente a estrutura de montagem de um determinado produto. Em uma estrutura de montagem, todos os itens possuem um único sucessor, mas não há limites quanto ao número de predecessores. Cada linha poderá possuir qualquer quantidade de colunas com valores diferentes de zero, e cada coluna poderá possuir, no máximo, uma linha com valor diferente de zero.

Itens (i) ↓	Predecessor Imediato (j) →	1	2	3	4
1		0	1	1	0
2		0	0	0	0
3		0	0	0	1
4		0	0	0	0

Tabela 2.2 Representação matricial de uma estrutura de montagem.



A Tabela 2.3 representa matricialmente a estrutura geral de um determinado produto. Em uma estrutura geral não há restrições quanto ao número de predecessores e sucessores. Cada linha poderá possuir qualquer quantidade de colunas com valores diferentes de zero e cada coluna poderá ter qualquer quantidade de linhas com valor diferente de zero.

Itens (i) ↓	Predecessor Imediato (j) →	1	2	3	4
1		0	1	1	0
2		0	0	1	1
3		0	0	0	1
4		0	0	0	0

Tabela 2.3 Representação matricial de uma estrutura geral.

### 2.3 Heurística proposta para o problema.

Neste item detalha-se também os quatro passos da heurística proposta para o problema de dimensionamento de lotes de produção e fluxo de materiais ao longo da cadeia de suprimentos sujeito às restrições de capacidade em sistemas multiestágios, representados pela Figura 2.1.

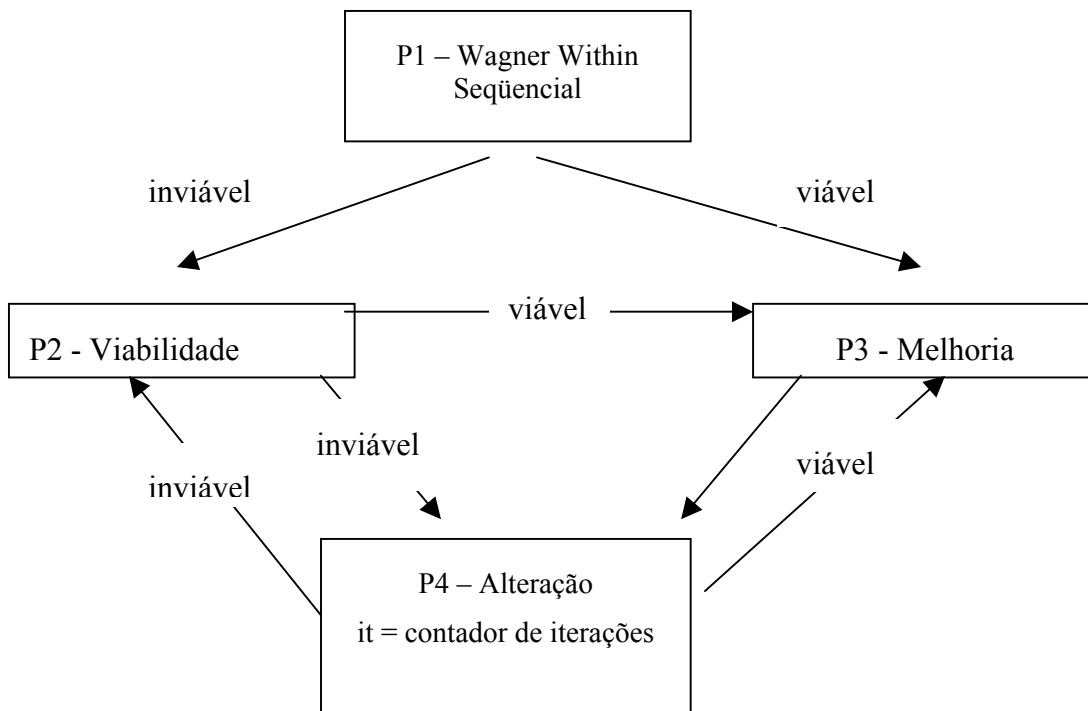


Figura 2.1 Representação da heurística proposta.

O passo P1 é aplicado para se obter uma solução inicial e, enquanto não houver uma solução viável, os procedimentos P2 e P4 são aplicados. O passo P4 é executado até que o contador de iterações chegue ao limite estabelecido inicialmente para o total de iterações a serem executadas pela heurística. O procedimento P3 é aplicado somente nas soluções viáveis. O procedimento P4 não pode ser aplicado na última iteração.

Esta heurística não garante que se encontrará sempre uma solução viável, portanto, não se pode concluir que o problema seja inviável pelo fato de a mesma não encontrar alguma solução viável.

### 2.3.1 Passo 1 (P1)

O primeiro passo (P1) do algoritmo de construção visa a obter uma solução inicial para o problema, aplicando seqüencialmente o algoritmo de programação dinâmica de Wagner e Within (1958).

Esse procedimento preserva a viabilidade entre os estoques. Em seguida, a demanda é recalculada para os predecessores imediatos, com base na solução obtida anteriormente:

$$d_{it}^* = d_{it} + \sum_{j \in S(i)} r_{ij} x_{jt} \quad (37).$$

Aplica-se novamente o algoritmo para esses itens. Após N aplicações do método, reúnem-se as soluções obtidas, encontrando-se uma solução inicial para o problema original.

Como as restrições de capacidade foram desconsideradas, a solução provavelmente será inviável com relação à capacidade para algum  $t$  ( $t=1, \dots, T$ ), ou seja:

$$\sum_{i=1}^N (v_{it} x_{it} + f_{it} z_{it}) > b_t \quad (38).$$

O excedente de recursos utilizados em relação à capacidade disponível no período, é medido pela função Excesso( $t$ ).

$$Excesso(t) = [exc] = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (v_{it} x_{it} + f_{it} z_{it}) - b_t}{b_t} \right]^+ \quad (39)$$

$$[exc]^+ = \max \{0, exc\}.$$

A função Excesso representa uma medida da inviabilidade de uma solução em cada período, uma vez que expressa a proporção de recursos utilizados no período  $t$ , além da capacidade disponível. A função Excesso não informa se existe sobras de recursos no período, pois, quando isto ocorre, a função assume valor nulo.

Caso a solução seja inviável, aplica-se um procedimento de viabilização, melhoria e alteração, baseado em transferências de produção entre períodos.

As transferências de uma quantidade  $q$  de um período origem  $t$  para outro período destino  $\tau$ , anterior ou posterior, devem manter a viabilidade inter-escalão, portanto haverá uma certa quantidade máxima de transferência ( $M_{it\tau}$ ), bem como um valor também para a quantidade necessária para se eliminar o excesso num período.

### 2.3.1.1 Transferência para um período posterior.

Para calcular a quantidade máxima a ser transferida ( $M_{it\tau}$ ) para um período posterior ( $\tau > t$ ) e analisando a equação de balanceamento (40), atualiza-se o estoque de escalão, deduzindo  $q$  unidades do lote ( $x_{it}$ ) e garantindo que as necessidades de seus sucessores imediatos sejam atendidas.

$$E_{i,t-1} + x_{it} - E_{it} = D_{it} \quad (40)$$

$$\sum_{j \in S(i)} r_{ij} E_{jt} - E_{it} \leq 0 \quad (41)$$

Portanto, o valor de  $q$  será limitado pela restrição:

$$\sum_{j \in S(i)} r_{ij} E_{j\delta} - E_{j\delta} \leq 0, \quad \delta = t, \dots, \tau - 1 \quad (42)$$

que pode ser reescrita como:

$$E_{i\delta} \geq \sum_{j \in S(i)} r_{ij} E_{j\delta} \quad (43).$$

Deduzindo a quantidade transferida, tem-se:

$$E_{i\delta} - q \geq \sum_{j \in S(i)} r_{ij} E_{j\delta} .$$

Isolando o termo  $q$ , tem-se:

$$q \leq M_{it} = \min \left\{ \min_{\delta=1, \dots, t-1} \left\{ E_{i\delta} - \sum_{j \in S(i)} r_{ij} E_{j\delta} \right\}, x_{it} \right\} \quad (44).$$

Como a quantidade máxima a ser transferida não pode ser superior à produção do período, tem-se:

$$M_{it} = \begin{cases} \min \left\{ M_{i,t,\tau-1}, E_{i,\tau-1} - \sum_{j \in S(i)} r_{ij} E_{j,\tau-1} \right\}, & se \quad \tau > t \\ x_{it}, & se \quad \tau = t \end{cases} \quad (45)$$

Por meio desta expressão (45), podem existir períodos em que a quantidade máxima permitida para transferência é igual a zero, ou seja, não é permitida qualquer transferência.

### 2.3.1.2 Transferência para um período anterior.

Para calcular a quantidade máxima a ser transferida ( $M_{it}$ ) para um período anterior ( $\tau < t$ ), e novamente analisando a equação de balanceamento (40), atualiza-se o estoque de escalão do item deduzindo  $q$  unidades do lote ( $x_{it}$ ). Acrescentam-se as mesmas  $q$  unidades ao estoque de escalão do item  $i$  do período  $\tau$  ao  $t-1$ , garantindo que

o estoque de escalão de seus predecessores imediatos continuarão a ser suficientes para prover o seu estoque de escalão. É necessário verificar para todos os predecessores do item  $i$ , ou seja, para todo  $j \in P(i)$  a restrição:

$$E_{j\delta} \geq \sum_{m \in S(j)} r_{jm} E_{m\delta} + r_{ji} q, \delta = \tau, \dots, t-1 (\delta \leq T) \quad (46).$$

Isolando-se  $q$  no conjunto de restrições (46), tem-se:

$$r_{ji} q \leq E_{j\delta} - \sum_{m \in S(j)} r_{jm} E_{m\delta}, \delta = \tau, \dots, t-1 (\delta \leq T) \quad (47)$$

$$q \leq \frac{\left[ E_{j\delta} - \sum_{m \in S(j)} r_{jm} E_{m\delta} \right]}{r_{ji}}, \delta = \tau, \dots, t-1 (\delta \leq T) \quad (48)$$

$$M_{it\tau} = \begin{cases} \min \left\{ M_{i,t,\tau+1}, \min_{\substack{j \in P(i) \\ \tau < T}} \{ N_{ij\tau} \} \right\}, & \text{se } \tau < t \\ x_{it}, & \text{se } \tau = t \end{cases} \quad (49)$$

$$N_{ij\tau} = \frac{E_{j\tau} - \sum_{m \in S(j)} r_{jm} E_{m\tau}}{r_{ij}} \quad (50).$$

Pela expressão (49), em períodos em que há produção de todos os itens, sempre existe uma quantidade de pelo menos um item que pode ser transferida. A limitação

ocorre para itens que possuem predecessores, mas sempre existe pelo menos um item que não possui predecessor.

Em alguns casos poderá existir uma certa quantidade  $Q_{it} < M_{it\tau}$  capaz de reduzir a zero a parcela desse item em excesso(t) sem que haja sobra de recursos no período, dada por:

$$Q_{it} = \frac{\left[ \sum_{j=1}^N (f_{jt} z_{it} + v_{jt} x_{jt}) - b_t \right]^+}{v_{it}}, \text{ se } Q_{it} < M_{it\tau} \quad (51)$$

$$\text{sendo } [Q_{it}]^+ = \begin{cases} 0, & \text{se } [Q_{it}] \leq 0 \\ [Q_{it}], & \text{se } [Q_{it}] \geq 0 \end{cases}$$

Para avaliar uma determinada transferência  $(q, i, t, \tau)$  no processo de escolha entre várias transferências possíveis, pode-se utilizar um valor chamado Razão, dado por:

$$\text{Razão} = \frac{\Delta \text{custo} + \beta \cdot \text{penalidade}}{\Delta \text{excesso}} \quad (52),$$

em que a variação do custo total é dada pela equação (53):

$$\Delta \text{custo} = \frac{\Delta \text{custo produção} + \Delta \text{custo estoque} + \Delta \text{custo preparação} + \Delta \text{custo modal}}{\text{custo total}} \quad (53).$$

Sendo a variação do custo de produção dada pela equação (54):

$$\Delta \text{custo produção} = q(c_{i\tau} - c_{it}) \quad (54),$$

a variação do custo de estoque é dada pela equação (55)

$$\Delta \text{custo estoque} = \begin{cases} +q \sum_{\delta=\tau}^{t-1} e_{i\delta}, \text{ para } \tau < t \\ -q \sum_{\delta=t}^{\tau-1} e_{i\delta}, \text{ para } \tau > t \end{cases} \quad (55)$$

A variação no custo de preparação dependerá do lote ser todo transferido, ou da existência, ou não, de produção do item no período destino e é dada pela equação (56):

$$\Delta \text{custo preparação} = \Delta S1 - \Delta S2 \quad (56),$$

em que:  $\Delta S1 = s_{it}$ , se  $x_{it} = 0$  ou  $=0$ , caso contrário,  
e  $\Delta S2 = s_{it}$ , se  $q = x_{it}$  ou  $=0$ , caso contrário.

A variação no custo de preparação dependerá do lote ser todo transferido, ou da existência, ou não, de produção do item no período destino.

A variação de custo de modais de transporte é dada pela equação (57)

$$\Delta \text{custo modal} = \Delta M1 - \Delta M2 \quad (57).$$

Em geral, transferências para períodos posteriores fazem com que a variação do custo seja negativa, enquanto que, para períodos anteriores, a variação é positiva. No entanto, essa variação dependerá em grande parte dos custos de preparação.



Como a função  $\text{Excesso}(t)$  contabiliza apenas excessos da capacidade, não considerando as folgas, e que  $\text{Exc\_depois}(\tau) \geq \text{Exc\_antes}(\tau)$ , pode-se concluir que haverá sempre um acréscimo de produção no período  $\tau$ .

Por esse motivo, acrescenta-se à Razão uma penalidade sempre positiva, representada pela equação (58):

$$\text{Penalidade} = \text{Exc\_depois}(t) + [ \text{Exc\_depois}(\tau) - \text{Exc\_antes}(\tau) ] \quad (58),$$

sendo:

$\text{Exc\_antes}(t) = \text{excesso}(t)$  usando a solução anterior à transferência;

$\text{Exc\_depois}(t) = \text{excesso}(t)$  supondo que a transferência tenha sido feita.

Portanto, a variação de Excesso é dada pela equação (59):

$$\Delta \text{excesso} = \text{Exc\_antes}(t) - \text{Exc\_depois}(t) \quad (59).$$

Quando as soluções são factíveis, tem-se em Razão a variação no custo que uma determinada transferência causa. No entanto, quando a solução antes e/ou depois da transferência é infactível, a Razão contabiliza um custo penalizado, que leva em conta a variação no consumo dos recursos em excesso.

### 2.3.1.3 O pseudocódigo para o primeiro procedimento.

**Para**  $i = 1$  **até** Itens **faça**

**Para**  $j = 1$  **até** Períodos **faça**  $d(i, j) = d(i, j) + r(i, j) * d(i-1, j)$  (armazena demanda dos itens filhos)

**Fim\_para\_i**

**Para**  $i = 1$  **até** Itens **faça**

**Para**  $j = \text{Períodos até } 1$  **faça**  $\text{aux} = B(i): k = \text{Períodos} + 1$

**Para**  $jj = j$  **até 1 faça**

$$z = d(i, j) * c(i, jj) + e(i, jj) * d(i, j) * (j - jj) + s(i, jj) + (\text{custo do modal})$$

**Se**  $Z_{\text{atual}} > \text{aux}$  **então faça** próximo  $jj$  ( escolhe o menor custo total)

$$\text{aux} = Z_{\text{atual}}: x'(i, jj) = d(i, j): x'(i, k) = 0: k=jj$$

$$M(i, j) = \text{CustoModal}(i, jj, x'(i, jj)): M(i, jj + 1) = 0$$

**Se**  $jj = j$  **ou**  $jj = \text{Períodos}$  **então faça** próximo  $jj$

$$E(i, jj) = x'(i, jj)$$

**Fim\_para\_jj**

**Para**  $yy = 1$  **até**  $\text{Períodos}$  **faça**  $x(i, yy) = x(i, yy) + x'(i, yy)$  ( acumula produção) :  $E'(i, yy) = E'(i, yy) + E(i, yy)$  (acumula o estoque)

**Fim\_para\_yy**

**Fim\_para\_j**

**Para**  $j = 1$  **até**  $\text{Períodos}$  **faça**

**Para**  $ty = 1$  **até**  $\text{Itens}$  **faça**  $(i, j) = x(i, j)$  (atualiza demandas dos estágios seguintes):  $d(i + 1, j) = d(i + 1, j) + d(ty, j) * r(ty, i + 1)$

**Fim\_para\_ty**

**Fim\_para\_j**

**Fim\_para\_i**

**Para**  $i = 1$  **até**  $\text{Itens}$  **faça**

**Para**  $j = 1$  **até**  $\text{Períodos} - 1$  **faça**  $x = 0: d = 0$  (zera acumuladores)

**Para**  $y = 1$  **até**  $j$  **faça**  $x = x + x(i, y): d = d + d(i, y)$  (armazena produção e demanda) :  $E(i, j) = x - d$

**Fim\_para\_y**

**Fim\_para\_j**

**Fim\_para\_i.**

### 2.3.2 Passo 2 (P2).

O segundo passo (P2) do algoritmo de construção visa a obter, a partir de uma solução inviável, uma solução viável por meio de transferências de produção entre períodos, escolhendo-se a transferência que apresentar a menor Razão.

Essas transferências podem ter passos progressivos ( $t = 1, 2, \dots, T-1$ ) ou regressivos ( $t = T, T-1, \dots, 2$ ). No passo regressivo analisam-se os períodos de trás para a frente e a cada período  $t$  inviável, são feitas tentativas para todas as transferências  $(q, i, t, \tau)$  onde:  $q$  = quantidades  $M_{it}$  e  $Q_{it}$ ,  $I$  = itens que possuem produção no período  $t$ ,  $\tau = t - 1, \dots, \delta$  e  $\Delta$  = primeiro período anterior a  $t$  com produção do item  $i$ , caso não existam períodos anteriores com produção.

As transferências são efetuadas até que o período se torne viável ou até que não existam mais transferências possíveis. Quando isto ocorre, o período anterior é então analisado. Se, ao final deste processo ( $t = 2$ ) a solução for inviável, então o passo progressivo é executado. Novamente, para cada período inviável são feitas tentativas de transferências até que o período se torne viável ou não existam mais transferências possíveis.

Executam-se os dois passos até que uma solução viável seja encontrada, ou exceda um limite pré-estabelecido de passos. Nesse último caso o método falha.

A soma ponderada no cálculo da Razão é feita de forma a aumentar o peso da variação do excesso em relação ao peso da variação do custo, ao longo da aplicação dos passos regressivo e progressivo. Dessa forma, para a equação (52) atribui-se para  $\beta$  o valor  $n$ , sendo  $n$  = número de ciclos, ou seja, o número de vezes que os passos regressivo e progressivo foram aplicados. Assim, quanto maior o número de aplicações

dos passos, maior é a dificuldade de encontrar uma solução viável. Porém a Entropia do sistema tende a um valor menor à medida que as transferências passam a ser cada vez mais precisas.

Os pseudocódigos do algoritmo proposto para os passos regressivo e progressivo são os que seguem.

### 2.3.2.1 Passo Regressivo de Viabilização.

**Para** t = Períodos **até** 2 **faça** tem\_chance = 1

**Enquanto** excessoj(t) > 0 e tem\_chance = 1 **faça** i0 = 0: t0 = 0: q0 = 0: Razão' = B

**Para** i = 1 **até** Itens **faça**

**Se** x(i, t) > 0 **então faça**

**Para** k = 1 **até** kc **faça** Q(k) = Q(i, t, k) (quantidade para eliminar excesso) : Ts  
= primeiro\_setup\_anterior(i, t, x)

**Para** t1 = t - 1 **até** Ts **faça** Trab = CustoModal(i, t1) (custo mínimo)

**Se** Trab > B **então faça** próximo t1 (verifica disponibilidade)

M = M(i, t, t1) (quantidade máxima permitida)

**Se** M = 0 **então faça** t1 = Ts

**Senão**

**Para** k1 = 0 **até** kc **faça** Q = M

**Se** k1 = 0 **então faça** Q = M

**Senão** **Se** Q(k1) < M e Q(k1) > 0 **então** Q = Q(k1)

**Fim\_se\_k1**

**Se** Razão < Razão' **então** i0 = i: t0 = t1: q0 = Q: Razão' = F1  
(melhor transferência)

**Fim\_para\_k1**

**Fim\_se\_M**

**Fim\_para\_t1**

**Fim\_para\_k**

**Fim\_se\_x**

**Fim\_para\_i**

**Se** existe  $(q_0, i_0, t_{fb}, t_0)$  **então** efetue transferência

**Senão** tem\_chance = fracasso

**Fim\_enquanto**

**Fim\_para\_t.**

As transferências para trás tendem geralmente a causar um aumento no custo total, quando há transferência parcial do lote, pois, nesse caso, podem implicar em custos adicionais de estoque e preparação.

### 2.3.2.2 Passo Progressivo de Viabilização.

**Para** t = Períodos **até** Períodos-1 **faça** tem\_chance = 1

**Enquanto** excesso $j(t) > 0$  e tem\_chance = 1 **faça**  $i_0 = 0; t_0 = 0; q_0 = 0; Razão' = B$

**Para** i = 1 **até** Itens **faça**

**Se**  $x(i, t) > 0$  **então faça**

**Para** k = 1 **até**  $k_c$  **faça**  $Q(k) = Q(i, t, k)$  (quantidade para eliminar excesso) :

$T_s = \text{primeiro\_setup\_posterior}(i, t, x)$

**Para** t1 = t + 1 **até**  $T_s$  **faça** Trab = CustoModal(i, t1) (custo mínimo)

**Se** Trab > B **então faça** próximo t1 (verifica disponibilidade)

$M = M(i, t, t1)$  (quantidade máxima permitida)

**Se  $M = 0$  então faça  $t_1 = T_s$**

**Senão Para  $k_1 = 0$  até  $k_c$  faça  $Q = M$**

**Se  $k_1 = 0$  então faça  $Q = M$**

**Senão Se  $Q(k_1) < M$  e  $Q(k_1) > 0$  então  $Q = Q(k_1)$**

**Fim\_se\_k1**

**Razão = Razão(beta, Q, i, t, t1, x, 1)**

**Se Razão < Razão' então  $i_0 = i$ ;  $t_0 = t_1$ ;  $q_0 = Q$ ; Razão' = F1**

**(melhor transferência)**

**Fim\_para\_k1**

**Fim\_se\_M**

**Fim\_para\_t1**

**Fim\_para\_k**

**Fim\_se\_x**

**Fim\_para\_i**

**Se existe  $(q_0, i_0, t_{fb}, t_0)$  então efetue esta transferência senão tem\_chance = fracasso**

**Fim\_para\_t.**

Já no passo progressivo há uma probabilidade maior de ocorrer redução nos custos, pois existe a possibilidade de redução dos custos de estocagem.

Obtida uma solução viável, o procedimento seguinte trabalha com o objetivo de encontrar uma solução com menor custo, também efetuando transferências de produção entre períodos.

### 2.3.3 Passo 3 (P3).

O terceiro passo (P3) do algoritmo da heurística proposta, também progressivo ou regressivo, visa a obter, pelas transferências de produção entre períodos, melhoria nos custos finais, porém realiza somente movimentos que melhorem a função objetivo e não inviabilizem a solução, tanto em relação ao limite de capacidade como considerando a disponibilidade de modais de transporte para o novo período.

Pode ser visto como uma heurística de busca local, uma vez que parte de uma solução factível e, por meio de movimentos, tenta atingir soluções com menor custo. Uma transferência de produção pode ser vista como um movimento, pois ao se efetuar uma transferência, está se passando de uma solução para outra de sua vizinhança. Como o procedimento analisa entre as possíveis transferências, por meio da Razão, pode ser definido como heurística de busca local.

Avalia duas quantidades para as transferências: uma é a quantidade máxima  $M_{it\tau}$ , e a outra é uma quantidade aleatória sorteada dentro do intervalo  $[M_{it\tau} / 2, M_{it\tau}]$ . O intuito do sorteio aleatório de quantidade é dificultar a ocorrência de ciclagem na execução dos procedimentos. A razão para realizar a escolha do intervalo de metade até o valor total da quantidade máxima permitida é possibilitar análise de vizinhança mais rápida para a heurística. À medida que o avanço da melhoria obtida, nos valores da função objetivo, seja menor, reduz-se o início do intervalo do sorteio gradativamente para 1 unidade. A quantidade máxima para uma transferência (  $q, i, t, \tau$  ) pode ser representada por:

$$F_{it\tau} = \min\{M_{it\tau}, G_{it\tau}\} \quad (60),$$

em que  $G_{it\tau}$  = quantidade máxima do item  $i$  que pode ser transferida do período  $t$  para o período  $\tau$ , de modo que o excesso( $\tau$ ) não seja maior que zero. Assim, tem-se:

$$G_{i\tau} = \begin{cases} \frac{J_\tau}{v_{i\tau}}, & \text{se } x_{i\tau} > 0 \\ \frac{J_\tau - f_{i\tau}}{v_{i\tau}}, & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (61),$$

sendo  $J_\tau$  a quantidade de recursos não utilizados no período  $\tau$  dada por:

$$J_\tau = b_\tau - \sum_{i=1}^N (v_{i\tau} x_{i\tau} + f_{i\tau} z_{i\tau}) \quad (62).$$

A Razão é modificada para aceitar apenas movimentos que melhorem o valor da função objetivo. Dessa forma, a Razão =  $\Delta$  custo, se  $\Delta$  custo  $< 0$ ; caso contrário, a Razão =  $\infty$ .

### 2.3.3.1 Passo regressivo para melhoria.

**Para t = Períodos até 2 faça**  $i_0 = 0$ :  $t_0 = 0$ :  $q_0 = 0$ : Razão' = B

**Para i = 1 até Itens faça**

**Se**  $x(i, t) > 0$  **então faça**

**Para**  $t_1 = t - 1$  **até 1 faça** Trab = CustoModal(i,  $t_1$ ) (custo mínimo)

**Se** Trab  $> B$  **então faça** próximo  $t_1$

F = F(i, t,  $t_1$ , x) (quantidade máxima permitida)

**Se** F = 0 **então faça**  $t_1 = 1$  **senão** F1 = F(i,  $t_1$ , x, kc)

**Se** F1  $> 0$  **então faça**

**Se** F  $> F_1$  **então faça** F = F1



**Senão**

**Para**  $k1 = 0$  **até**  $kc$  **faça**

**Se**  $k1 = 0$  **então faça**  $Q = F$

**Senão**  $Q(k1) = \text{inteiro}(F - F/2 + 1) * \text{rnd} + F/2$

**Fim\_se\_k1**

**Se**  $\text{Razão} < \text{Razão}'$  **então**  $i0 = i$ :  $t0 = t1$ :  $q0 = Q$ :  $\text{Razão}' = F1$   
(melhor transferência)

**Fim\_para\_k1**

**Fim\_se\_F1**

**Fim\_se\_F**

**Fim\_se\_x**

**Fim\_para\_i**

**Se** existe  $(q_0, i_0, t, t_0)$  **então** efetue esta transferência **senão**  $\text{tem\_chance} = \text{fracasso}$

**Fim\_para\_t.**

### 2.3.3.2 Passo progressivo para melhoria.

**Para**  $t = \text{Períodos}$  **até**  $\text{Períodos}-1$  **faça** **faça**  $i_0 = 0$ :  $t_0 = 0$ :  $q_0 = 0$ :  $\text{Razão}' = B$

**Para**  $i = 1$  **até**  $\text{Itens}$  **faça**

**Se**  $x(i, t) > 0$  **então faça**

**Para**  $t1 = t + 1$  **até**  $\text{Períodos}$  **faça**  $\text{Trab} = \text{CustoModal}(i, t1)$  (custo mínimo)

**Se**  $\text{Trab} > B$  **então faça** próximo  $t1$

$F = F(i, t, t1, x)$  (quantidade máxima permitida)

**Se  $F = 0$  então faça  $t_1 = \text{Períodos}$  senão  $F_1 = F(i, t_1, x, k_c)$**

**Se  $F_1 > 0$  então faça**

**Se  $F > F_1$  então faça  $F = F_1$**

**Senão**

**Para  $k_1 = 0$  até  $k_c$  faça**

**Se  $k_1 = 0$  então faça  $Q = F$**

**Senão  $Q(k_1) = \text{inteiro}(F - F/2 + 1) * \text{rnd} + F/2$**

**Fim\_se\_k1**

**Razão = Razão(beta, Q, i, t, t<sub>1</sub>, x, 1)**

**Se Razão < Razão' então  $i_0 = i$ :  $t_0 = t_1$ :  $q_0 = Q$ : Razão' = F<sub>1</sub>**  
**(melhor transferência)**

**Fim\_para\_k1**

**Fim\_se\_F1**

**Fim\_se\_F**

**Fim\_se\_x**

**Fim\_para\_i**

**Se existe  $(q_0, i_0, t, t_0)$  então efetue esta transferência senão tem\_chance = fracasso**

**Fim\_para\_t.**

Nesse procedimento há também a possibilidade de não existirem movimentos que melhorem a função objetivo. Em razão disso, um procedimento alternativo permite

reiniciar todo o processo a partir de uma nova solução. Tal procedimento está descrito no passo 4.

#### 2.3.4 Passo 4 (P4).

O quarto passo (P4) do algoritmo da heurística proposta visa a reconfigurar uma solução viável ou inviável, para que um dos passos anteriores possa ser novamente aplicado, resultando em uma solução nova, também viável ou não. As transferências são analisadas para cada item, num único passo, e uma quantidade aleatória é sorteada entre  $[M_{itr} / 2 \text{ e } M_{itr}]$ . Os períodos considerados como origem e destino das transferências são ordenados de acordo com a utilização dos recursos. Para calcular a utilização dos recursos em cada período, define-se, por meio da equação (63), a função  $Folga(t)$ , que representa a quantidade de recursos não utilizados no período e que pode assumir valores negativos, em períodos para os quais as capacidades foram violadas:

$$Folga(t) = \frac{b_t - \sum_{i=1}^N (v_{it}x_{it} + f_{it}y_{it})}{b_t} \quad (63).$$

A partir desses valores, os períodos são classificados em ordem decrescente, ou seja, o procedimento tenta transferir a produção do item analisado, dos períodos com menor folga para os períodos com maior folga.

A primeira transferência possível é realizada, não procedendo qualquer avaliação com outros possíveis movimentos. Após efetuar essa transferência, o algoritmo passa para o item seguinte, isto é, somente uma transferência é efetuada para cada item. Após a análise dos  $n$  itens, o procedimento encerra. O pseudocódigo para esse procedimento é apresentado a seguir.

##### 2.3.4.1 Procedimento de Alteração.

**Para**  $i = \text{Itens até } 1$  **faça**  $\text{fim\_i} = 1$

**Para**  $t = \text{Períodos até } 1$  **faça**

**Se**  $x(i, (\text{ord}(t)) > 0$  e  $\text{fim\_i} = 1$  **então**

**Para**  $t1 = 1$  **até**  $t - 1$  e  $\text{fim\_i} = 1$  **faça**

**Se**  $\text{ord}(t) = \text{ord}(t1)$  **então faça** próximo  $t1$

$\text{Trab} = \text{CustoModal}(i, \text{ord}(t1))$

**Se**  $\text{Trab} > B$  **então faça** próximo  $t1$

$M = M(i, \text{ord}(t), \text{ord}(t1), x)$

**Se**  $M > 0$  **então**  $q_a = \text{Int}((M - M/2 + 1) * \text{Rnd} + M/2)$

**Efetue** a transferência

$\text{fim\_i} = 0$ : **Vá para** o próximo item

**Fim\_se\_M**

**Fim\_para\_t1**

**Fim\_se\_x**

**Fim\_para\_t**

**Fim\_para\_i.**

### 2.3.5 Pseudo código da heurística proposta.

O algoritmo é executado pela reunião dos quatro procedimentos para a resolução do problema, conforme demonstrado no pseudocódigo apresentado a seguir:

## INÍCIO

**Encontra** uma solução inicial aplicando a heurística de Wagner e Within (1958) (P1)

**Se** Excesso = 0 **então** FIM (analisa se a solução inicial é viável)

-----

**VIABILIZAR:** (Rotina de viabilização – P2)

beta = 1: Viabilizaw = Viabilizaw + 1

**Para** y = 1 **até** Maxciclosviab **faça**

**Faça** viabilização\_para\_trás (viabiliza para períodos anteriores)

Excesso = calcula\_Excesso: **Se** z' = 0 **então** MELHORAR

**Faça** viabilização\_para\_a\_frente (viabiliza para períodos posteriores)

Excesso = calcula\_Excesso: beta = beta + 1

**Se** Excesso = 0 **então** MELHORAR

**Fim\_para\_y**

**Vá para** ALTERAR.

-----

**MELHORAR** (Rotina de Melhoria da solução – P3)

**Para** y = 1 **até** Maxciclosmelhoria **faça** z = cálculo\_z

**Faça** Melhoria\_para\_trás

**Faça** Melhoria\_para\_a\_frente

**Se** z' = z **então** ALTERAR

**Fim\_para\_y**

**Se** z' < z\* **então** z\*=z': x\* = x': E\* = E': melhorias=melhorias=1.

-----

**ALTERAR:** (Rotina de Alteração – P4)

Maxiteraçõesw = Maxiteraçõesw + 1: **Se** Maxiteraçõesw > Maxiteracoes **então** FIM

**Faça** alteração\_aleatória:

**Se** Excesso = 0 **então** MELHORAR

**Senão** VIABILIZAR.

-----  
**FIM:** (Encerra e apresenta os valores relativos a melhor solução encontrada ou informa que o método falhou).  
-----

Estabelecem-se os valores limites para ciclos de execução do passo de viabilização e para ciclos de transferências executados dentro dos passos de viabilização e de melhoria.

A heurística termina ao final do primeiro passo, quando a solução inicial, encontrada por meio da aplicação da heurística de Wagner e Within (1958), for viável, uma vez que a solução ótima para o problema foi encontrada.

Caso contrário, a heurística prossegue, executando o passo de viabilização, procedendo a ciclos de transferências para períodos anteriores e posteriores até o limite de ciclos. Caso não consiga viabilizar a solução inicial, dentro dos ciclos permitidos, a heurística executa o passo de alteração aleatória.

Caso tenha conseguido viabilizar a solução inicial, a heurística executa o passo de melhoria. Por meio de heurística mista, de troca e busca, procede a alterações de produção entre períodos, inicialmente melhorias transferindo produção de um período para períodos anteriores e, em seguida, transferências para períodos posteriores. Esse passo de melhoria permite somente movimentações que melhorem o valor da função

objetivo. Os ciclos de melhoria cessam quando chegam ao limite estabelecido, passando a executar o passo de alteração.

Esse passo efetua, no máximo, uma alteração por item em cada execução desse passo. Analisa se a nova solução encontrada é viável. Caso a solução encontrada seja viável, a heurística passa para o passo de melhoria, senão irá passo a passo de viabilização.

A heurística cessa quando o número de vezes que o passo de viabilização foi efetuado chega ao valor limite permitido e apresenta a solução obtida.

No próximo capítulo, os resultados dos testes computacionais são apresentados e classificados para possibilitar conclusões sobre o comportamento da heurística proposta.

## CAPÍTULO 3

### RESULTADOS.

#### 3.1 Introdução.

Nesse capítulo, analisam-se os resultados dos testes computacionais, efetuados para se avaliar a heurística proposta.

Utilizou-se a linguagem *Visual Basic* dentro do *Access*, com o objetivo de tornar possível o acompanhamento visual da evolução, passo a passo, da heurística.

Inicialmente, foram criados procedimentos capazes de gerar dados aleatórios, dentro de parâmetros pré-estabelecidos nos trabalhos de Clark e Armentano (1995) e de França et al (1997), além de parâmetros para modais de transporte, compatíveis com as unidades utilizadas nos demais parâmetros.

Com a possibilidade de um universo significativo de problemas, foram executados testes de forma a analisar o comportamento da heurística e sua eficácia como ferramenta de solução dos mesmos.

Os problemas gerados consideraram custos de *setup*, baixo (U[5;95]) ou alto (U[50;950]), e a folga da capacidade total, alta (até 25%) ou baixa (até 10%), necessária para atender a demanda do sistema.

Após a obtenção dos resultados fixaram-se critérios para comparação dos mesmos. O primeiro critério baseou-se em uma medida de viabilização, isto é, quantos foram os resultados viáveis encontrados no total de testes efetuados. O segundo critério



foi o da eficácia, ou seja, a aproximação do custo final obtido nas soluções com o valor do limitante inferior definido quando da aplicação da heurística de Wagner e Within (1958).

### **3.2 Validação do modelo proposto.**

A fim de validar o modelo proposto foram geradas aleatoriamente duas classes de problemas por meio de distribuições uniformes, dentro de parâmetros pré-estabelecidos por Clark e Armentano (1995) e França et al. (1997).

A primeira classe de testes envolveu a validação da heurística proposta, zerando-se os custos de transporte e comparando-a com a heurística proposta por França et al. (1997).

Após essa série de testes, conclui-se que a modificação no conjunto, utilizado para a escolha aleatória da quantidade de itens a ser transferida,  $[1, M_{it}]$  para  $[M_{it}/2, M_{it}]$  causava uma ligeira melhoria no cálculo da função objetivo, com o mesmo esforço computacional.

### **3.3 Geração dos problemas-teste.**

A segunda classe de testes analisou a qualidade das soluções, encontradas pela aplicação da heurística proposta, com base nos critérios de comparação definidos anteriormente. Os parâmetros utilizados foram também os pré-estabelecidos por Clark e Armentano (1995) e França et al. (1997), acrescidos de parâmetros compatíveis para os modais de transporte, apresentados na Tabela 3.1.

Parâmetro	Representação	Intervalo	Observação
Custo de produção	cit	U[1;3]	
Custo de estoque	eit	U[1;3]	
Custo de preparação	sit	U[5;95] ; U[50;950]	custo baixo ; custo alto
Custo de modal	w imt	U[1;3]	
Custo fixo de modal	S imt	U[1;3]	
Capacidade de modal	vmt	U[1;3]	
Disponibilidade de modal	pmt	[0,1]	
Demanda	dit	[0,18] ; [0,180]	$i > 1$ ; $i = 1$
Recurso para produção	vit	[1,2]	
Recurso para preparação	fit	[10,100]	

Tabela 3.1 Parâmetros para geração de dados.

A geração de estruturas de produtos envolveu estruturas serial, de montagem e geral, considerando sempre  $r_{ij}$  igual a 1.

Para efeito de acompanhamento passo a passo em ambiente Access, limitou-se à matriz 20 itens por 20 períodos. Porém, o modelo não tem limite definido.

Para a geração de capacidade ( $b_t$ ), foram feitos cálculos de forma a permitir problemas que estivessem dentro de capacidades relacionadas com a quantidade de itens e de períodos, considerando-se os limites superiores dos intervalos de dados permitidos e a disponibilidade de modais em todos os estágios e períodos.

Calculada a capacidade total do sistema, distribuiu-se uniformemente as capacidades por período, considerando-se o primeiro período com um peso maior em razão da disponibilidade de todos os modais de transporte nesse período.

Os problemas foram gerados de forma a criar quatro grandes grupos, todos com a mesma quantidade de problemas, os quais foram gerados com custos de *setup* baixo e folga alta e produtos com 4 a 20 itens componentes. Para o segundo conjunto, diminuiu-se a folga de capacidade. Para o terceiro conjunto, alterou-se o custo de *setup* para alto, retornando a folga para alta. Finalmente, alterou-se novamente o parâmetro de folga para baixa.

### 3.4 Análise dos resultados.

Apresentam-se, a seguir, os resultados obtidos por meio de centenas de testes, realizados em 16 grandes grupos.

Inicialmente, os problemas gerados foram agrupados conforme os custos de *setup*, baixo (U[5;95]) ou alto (U[50;950]). Esses dois sub-grupos foram subdivididos de acordo com a folga da capacidade total, necessária para atender a demanda, alta (até 25%) ou baixa (até 10%). A seguir, subdividiu-se conforme a estrutura dos produtos. O primeiro grupo estabelecido foi de 1 até 8 itens, o segundo de 9 até 12 itens, o terceiro de 13 até 16 itens e o último, de 17 até 20 itens.

Houve alguns problemas para os quais a heurística não encontrou solução viável, principalmente quando as folgas de capacidade de produção eram menores. De forma geral, o índice de viabilização permaneceu alto. A Tabela 3.2 mostra a média da viabilização das soluções dos problemas gerados.

Preparação	Capacidade	N	Viabilização (%)
Custo baixo	Alta	Até 8	97
		De 9 a 12	99
		De 13 a 16	95
		De 17 a 20	90
	Baixa	Até 8	92
		De 9 a 12	94
		De 13 a 16	95
		De 17 a 20	95
	Alta	Até 8	96
		De 9 a 12	97
		De 13 a 16	98
		De 17 a 20	98

Custo alto	Baixa	Até 8	90
		De 9 a 12	88
		De 13 a 16	85
		De 17 a 20	80
	Média		97

Tabela 3.2 Viabilização da heurística.

O comportamento da heurística pode ser observado nas Figuras 3.1 e 3.2, em que estão representados os resultados obtidos no decorrer de parte dos ciclos de um teste de um produto com estrutura serial de 20 itens e 14 períodos e uma visão geral dos resultados com um produto com estrutura serial de 20 itens e 7 períodos, respectivamente.

À medida que cada iteração é executada, pode-se observar o comportamento da heurística, encontrando valores mínimos locais, para a função objetivo, de uma forma cíclica. Ao repetir o passo de alteração, volta-se a obter novos mínimos locais. A cada novo mínimo dos mínimos, armazenam-se os dados da solução e se prossegue a execução da heurística. O último resultado armazenado é a melhor solução encontrada, pela heurística proposta, para determinado problema.

À medida que um maior limite de ciclos totais é permitido, a probabilidade de se encontrar melhores resultados aumenta.

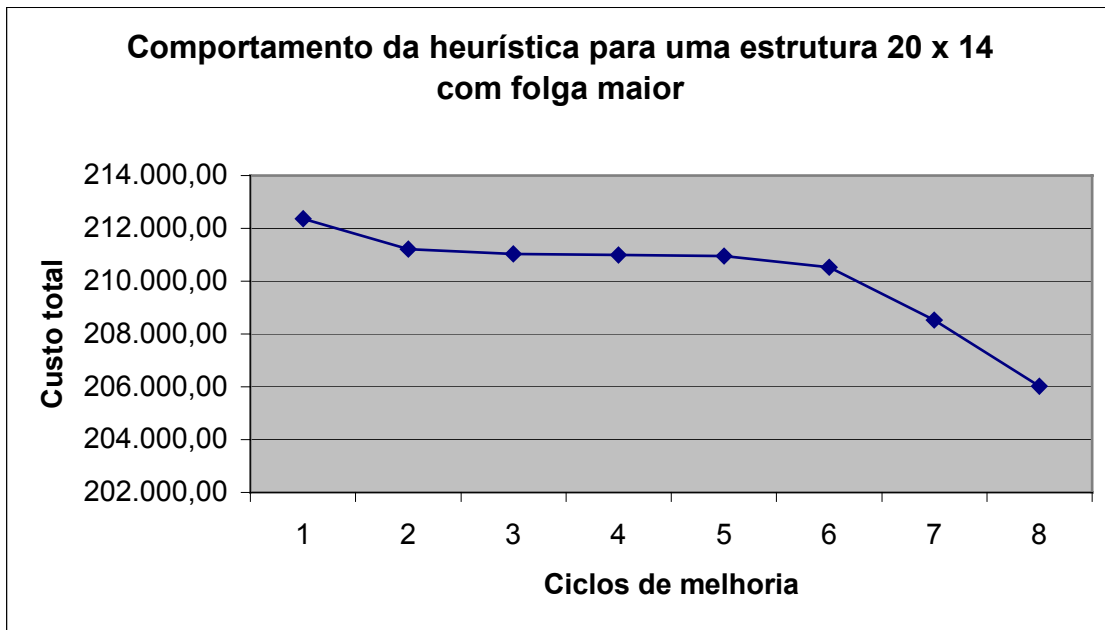


Figura 3.1 Comportamento de parte da heurística.

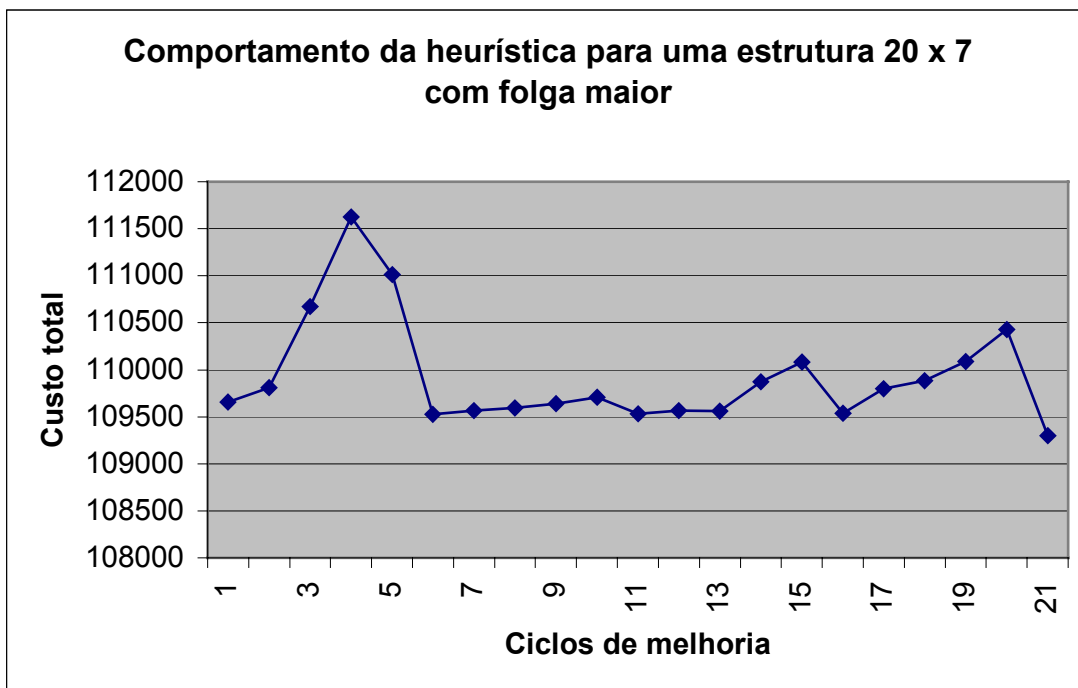


Figura 3.2 Comportamento geral da heurística.

A Tabela 3.3 apresenta a avaliação da qualidade das soluções por meio dos *gaps* entre as soluções obtidas pela heurística proposta e os limitantes inferiores, conseguidos pela heurística de Wagner e Within (1958). Para efeito de cálculo dos valores de *gap* de solução, foram considerados apenas os problemas nos quais foi encontrada solução viável. A interpretação dos valores de *gap* apresenta a eficácia da heurística.

Preparação	Capacidade	N	Eficácia (%)
Custo baixo	Alta	Até 8	3,80
		De 9 a 12	3,59
		De 13 a 16	3,31
		De 17 a 20	3,31
	Baixa	Até 8	6,90
		De 9 a 12	5,93
		De 13 a 16	5,98
		De 17 a 20	6,62
Custo alto	Alta	Até 8	13,37
		De 9 a 12	14,92
		De 13 a 16	11,60
		De 17 a 20	11,24
	Baixa	Até 8	1,87
		De 9 a 12	1,53
		De 13 a 16	1,50
		De 17 a 20	0,25
	Média		6,60

Tabela 3.3 Eficácia da heurística (relativa ao *gap*).

Entendendo-se que a movimentação máxima permitida é a que não viola o estoque de escala e que a movimentação efetuada, em vários passos da heurística, baseia-se em analisar, também, se existe uma quantidade menor que a máxima movimentação permitida, capaz de reduzir a zero o excesso de recursos ao se analisar um determinado período, apresenta-se a análise dos valores relativos à eficácia da heurística proposta, em relação ao *gap* de solução:

a) nos problemas com elevado custo de *setup*, obteve-se a melhor eficácia da heurística, sempre que se utilizou um valor para a folga de capacidade de produção até 10% acima do valor mínimo necessário para atender a demanda total do problema. A quantidade possível de ser movimentada, nos problemas com menores folgas de capacidade é, conseqüentemente, menor. Movimentos menores resultam em maior probabilidade de se obter a solução com menores acréscimos de custos de estoque e de transporte, evitando muitas vezes, novo *setup*;

b) nos problemas com baixo custo de *setup*, obteve-se a segunda melhor eficácia da heurística, sempre que se utilizou um valor para a folga de capacidade de produção de até 25% acima do valor mínimo necessário para atender a demanda total do problema. A quantidade possível de ser movimentada nos problemas com maiores folgas de capacidade é, conseqüentemente, maior. Movimentos maiores resultam em maior probabilidade de se obter a solução com maiores acréscimos de custos de estoque e de transporte, provocando, muitas vezes, novo *setup*. Porém, no caso do custo de *setup* ser baixo, ocorre a probabilidade do acréscimo de custos no total ser inferior;

c) nos problemas com baixo custo de preparação para produção, obteve-se a terceira colocação em relação à eficácia da heurística sempre que se utilizou um valor para a folga de capacidade de produção de até 10% acima do valor mínimo necessário



para atender a demanda total do problema. A quantidade possível de ser movimentada nos problemas com menores folgas de capacidade é, conseqüentemente, menor. Movimentos menores resultam em maior probabilidade de se obter a solução com menores acréscimos de custos de estoque e de transporte em relação a um novo *setup*. Em razão da folga de capacidade ser baixa, a probabilidade dessa movimentação provocar novo *setup* é sempre muito alta;

d) nos problemas com elevado custo de preparação para produção, obteve-se a pior eficácia da heurística sempre que se utilizou um valor para a folga de capacidade de produção até 25% acima do valor mínimo necessário para atender a demanda total do problema. A quantidade possível de ser movimentada nos problemas com maiores folgas de capacidade é, conseqüentemente, maior. Movimentos maiores resultam em maior probabilidade de se obter a solução com maiores acréscimos de custos de estoque e de transporte, provocando muitas vezes, novo *setup*.

No próximo capítulo são apresentadas as conclusões sobre o comportamento da heurística, bem como sugestões para trabalhos futuros.

## **Capítulo 4**

### **Conclusões e trabalhos futuros.**

Este trabalho teve por finalidade estudar o dimensionamento de lotes de produção, estocagem e transporte ao longo de uma cadeia de suprimentos geral multiestágio, sujeita a restrições de capacidade de produção, visando a obter o menor custo total do sistema.

A possibilidade da transposição de modelos já desenvolvidos para MSCLSP para o contexto SCM mostrou-se possível. Apesar da inclusão das restrições para os modais de transporte nessa transposição, a comparação entre problemas de dimensionamento de lotes em uma planta com os problemas de dimensionamento de lotes em uma cadeia de suprimentos, permitiu a aplicação de soluções desenvolvidas anteriormente para o contexto original. Também existe a possibilidade da transposição de modelos desenvolvidos para SCM para o contexto MSCLSP, como é o caso da heurística proposta.

O dimensionamento de lotes de produção, estocagem e transporte ao longo de uma cadeia de suprimentos geral multiestágio, sujeita a restrições de capacidade de produção, busca dimensionar lotes de cada produto em um horizonte de tempo conhecido, de forma a atender a demanda de cada um dos produtos componentes e dos produtos finais, demanda esta informada para cada período.

A proposta consistiu em apresentar uma heurística de busca capaz de resolver problemas de dimensionamento de lotes em cadeias de suprimentos de grande porte.

O planejamento de cada produto depende do planejamento de todos os demais produtos situados em níveis hierárquicos inferiores, já que se trata de um sistema multiestágio.

A representação matricial dos itens predecessores para estruturas serial, de montagem e geral facilitou bastante o tratamento computacional. Essa matriz permitiu armazenar diretamente a quantidade do item predecessor imediato necessária para compor cada item sucessor.

O modelo formulado inclui custos de produção, estocagem e transporte e custos de preparação para produção e transporte, visando a ampliar o campo de aplicação para problemas reais. Em razão da complexidade computacional do problema foi proposta uma nova heurística, mista de busca e de troca.

Essa heurística foi baseada naquela proposta por França et al. (1997) para problemas de MSCLS, incluindo-se custos e limitação de capacidade de modais em cada estágio, mantendo-se as limitações de capacidade de produção em cada período. Fazendo-se a correlação entre os conceitos de lotes de produção para lotes de transformação e montagem nos diferentes níveis da cadeia de suprimentos, tornou-se possível entender o problema no contexto de SCM.

Outra diferença entre a heurística proposta e a de França et al. (1997) foi a alteração nos intervalos de escolha aleatória para a escolha da quantidade a ser movimentada entre períodos.

A partir dos resultados obtidos durante a fase de desenvolvimento e testes do modelo, foram feitas diversas adaptações em critérios particulares da heurística inicial para melhor adaptação ao problema proposto.

Essa abordagem foi avaliada com base em exemplos numéricos gerados aleatoriamente. O modelo foi inicialmente validado a partir de testes realizados nos mesmos problemas apresentados por França et al. (1997), ignorando-se os custos de modais de transporte.

Na etapa final, os resultados foram analisados com o grau de obtenção de soluções viáveis para os problemas gerados. Foram também comparados com limitantes inferiores obtidos pela aplicação da heurística de Wagner e Within (1958).

Pode-se concluir que a heurística proposta obteve resultados bastante satisfatórios em tempo computacional razoável.

O presente trabalho permite desenvolver futuras pesquisas, bem como implementar modificações nos critérios de transferência, nos passos de alteração e melhoria, de forma a obter resultados melhores, com o mesmo esforço computacional. Desta forma, apresenta-se como sugestões para trabalhos futuros:

- a) estudar a possibilidade de utilização de vários modais de transporte, em um determinado estágio, para o mesmo item;
- b) analisar intervalo variável de escolha aleatória, das quantidades a serem movimentadas em transferências de produção, mantendo-se o estoque de escalão;
- c) incluir a restrição de capacidade de armazenagem de itens em cada estágio;
- d) considerar utilização parcial da capacidade disponível em cada um dos períodos, ao se analisar movimentos de produção de itens entre períodos.

## Referências bibliográficas.

1. AFENTAKIS, P.; GAVISH, B. *Optimal Lot-sizing for Complex Product Structures. Operations Research*, n. 34, p. 237-249, 1986.
2. AFENTAKIS, P.; GAVISH, B.; KARMAKAR, U. *Computacionally Efficient optimal Solutions to the Lot\_sizing Problem in Multi-Stage assembly Systems. Management Science*, n.30, p. 222-239. 1984.
3. AFENTAKIS, P. *A Parallel Heuristic Algorithm for Lot\_Sizing in Multi-Stage Production Systems. IIE. Trans*, n. 19, p. 34-42. 1987.
4. ARAÚJO, S.; ARENALES, M.N. *Problema de dimensionamento de lotes monoestágio com restrição de capacidade: modelagem, método de resolução e resultados computacionais. Pesquisa Operacional*, Rio de Janeiro, v. 20, n. 2, 2000.
5. BAHL, H.C.; RITZMANN, L.P.; GUPTA, J.N.D. *Determining Lot Sizes and Resouce Requirements: A Review. Operational Research Society of America*, v.3, n. 35, p. 237-249. 1987.
6. BALLOU, R.H. *Unresolved Issues in Supply Chain Network Design. Information Systems Frontiers*, v. 3, n. 4, p. 2001.
7. BARTEZZAGHI, E.; VERGANTI, R. *Managing demand uncertainty trough order overplanning. International Journal of Production Economics*, v. 40, p. 107-120. 1995.

8. BERRY, W.T.; VOLLMAN, T. E.; WHYBARK, D.C. *Manufacturing Planning and Control Systems*. Dow Jones, Illinois. 1988.
9. BERTRAND, J.W.M.; MUNTSLAG, D.R. *Production control in engineer-to-order firms*. *International Journal of Production Economics* , n. 30, p. 3-22. 1993.
10. BERTRAND, J.W.M.; ZUIJDERWIJK, M.; HEGGE, H.M.H. *Using hierarquical pseudo bills of material for customer order acceptatance and optimal material replenishment in assemble to order manufacturing of non-modular products*. *International Journal of Production Economics*, n. 66, p.171-184. 2000.
11. BILLINGTON, P.J.; MCCLAIN, J.O.; THOMAS, J.L. *Mathematical programming approaches to capacity-constrained MRP systems: review, formulation and problem reduction*. *Management Science*, v. 29, n. 15, p. 1126-1141. 1983.
12. BITRAN G.R.; YANASSE, H.H. *Computational Complexity of the Capacited Lot Size Problem*. *Management Science*, v. 10, n. 28, p. 1174-1186. 1982.
13. BONNEY, M.C.; POPLWELL, K.; MATOUG, M. *Effect of errors and delays in inventory reporting on production system Performance*. *International Journal of Production Economics*, v. 35, p. 93-105. 1994.
14. BRADLEY, S.; NOLAN, R. L. *Managing by Wire: Using IT to transform a Business from Make-and-Sell to Sense-and-respond, in Competing in the Information Age, Strategic Alignment in Praticce*. *Harward Business Review*, cap. 7. 1998.

15. BRANDOLESE, A.; CIGOLINI, R. *A new model for the strategic management of inventories subject to peaks in market demand*, *International Journal Prod. Res.*, v. 37, n.8, p.1859-1880. 1999.
16. BRASSLER, A.; SCHENEIDER, H. *Valuation of Strategic production decisions*. *International Journal of Production Economics*, n. 69, p. 119-127. 2001.
17. BURBIDGE, J.; FALSTER, P.; RIIS, J. *Why is it difficult to sell GT and JIT to industry?* *Production Planning & Control*, v. 2, n. 2, p.160-166. 1991.
18. BURBIDGE, J.L. *Automated Production Control with a Simulation Capability*. *Proceedings of IFIP Conference WG 5-7, Copenhagen*, p. 1-14. 1984.
19. BURNS, J. F.; SIVAZLIAN, B.D. *Dynamic analysis of multi-echelon supply systems*. *Computers and Industrial Engineering*, v.7, p. 181-193. 1978.
20. CAMERINI, P.M.; FRATTA, L.; MAFFIOLI, F. *On Improving Relaxation Methods by Modified Gradient Techniques*. *Mathematical Programming Study*, v. 3, p. 26-34. 1975.
21. CARLSSON, C.; FULLER, R. *Reducing the Bullwhip Effect by Means of Intelligent, Soft Computing Methods* . *34<sup>th</sup> Annual Conference on Systems Sciences*. *Institute of electrical and Electronics Engineers, Inc*. 2001.
22. CARVALHO, M.F.H.; FERNANDES, C.A.O, *Planejamento da produção da manufatura por fluxos em redes*. *Gestão e Produção*, v. 6, n. 1, p. 30-50. 1999.
23. CHEN, F.; DREZNER, Z.; RYAN, J.K.; SIMCHI-LEVI, D. *The Bullwhip Effect: Managerial Insights on the impact of forecasting and information on*

*variability in a supply chain, Sloan Management Review* n.14, p. 419-35.  
1998

24. CHEN, F.; DREZNER, Z.; RYAN, J.; SIMCHI-LEVI, D. *Quantifying the Bullwhip Effect in a Supply Chain: The impact of forecasting, Lead times and information. Management Sciences*, v.46, p. 436-443. 2000.
25. CHRISTOPHER, M.; BRAITWAIT, A. *Managing strategic lead times. In Logistics, the Strategic Issues. Chapman & Hall. London.* 1992.
26. CLARK, A. R.; ARMENTANO, V. A. *Echelon Stock Formulation for Multi-Stage Lot-Sizing with Component Lead Times. Int. J. Systems Science*, n. 24, p. 1759-1775. 1993.
27. CLARK, A.; SCARF, H. *Optimal Policies for Multi-Echelon Inventory Problems, Management Science*, n. 6, p. 475-490. 1960.
28. CLARK, A.R.; ARMENTANO, V.A. *A Heuristic for a Resource-Capacitated Multi-Stage Lot-Sizing Problem with Lead Times. Journal of the Operational research Society*, n. 46, p. 1208-1222. 1995.
29. CLARK, A.R.; ARMENTANO, V.A. *The Application of Valid Inequalities to the Multi-Stage Lot-Sizing Problem. Computers & Opns Res*, n. 22, p. 669-680. 1995.
30. DEL VECCHIO, A.L.; TOWILL, D.R. *Conceptual modeling of industrial production/distribution systems via standard form, Mathematical and Computer Modelling*, n. 14, p. 1029-1034. 1994.
31. DEL VECCHIO, A.L.; TOWILL, D.R. *The application of filter theory to the study of supply chain dynamics, Taylor & Francis Ltda.* 1994.



32. DREXL, A.; HAASE, K. *Proportional Lotsizing and Scheduling Problem. International Journal of Production Economics*, n. 40, p. 73-87. 1995.
33. EDGHILL, J.S.; TOWILL, D.R. *Assessing manufacturing systems performance frequency response revisited. Engineering Costs and Production Economics*, n. 19, p. 319-326. 1990.
34. EDGHILL, J.S.; TOWILL, D.R. *Dynamic behaviour of fundamental manufacturing system design strategies. Annals of the Congress International of Resources Planning*, v. 38, p. 465-468. 1989.
35. ELMAGHRABY, S.E. *The Economic Lot Scheduling Problem (ELSP) : review and extensions. Management Science*, v. 24, p. 587-598. 1978.
36. EPPEN, G.D.; MARTIN, R.K. *Solving multi-item capacitated lot sizing problems using variable redefinition. Operations Research*, v. 35, p. 832-848. 1987.
37. ERLINKOTTER, D.; HARRIS, F.W. *The economic order quantity model. Operations Research*, v. 38, p. 937-946. 1990.
38. ESPEJO, L.G.A.; GALVÃO, R.D. *O uso das relaxações Lagrangeana e Surrogate em problemas de Programação Inteira. XXXIII SBPO*, p. 1191-1202. 2001.
39. FISCHER, K.; CHAIB-DRAA, B.; Muller, J.P.; PISCHEL, M.; GERBER, C. *A Simulation Approach based on Negotiation and Cooperation between Agentes: A Case Study. IEEE Transactions on Systems, Man e Cybernetics*, v. 29, n. Y, p. 100-130. 1999

40. FISHER, M.; HAMMOND, J.; OBERMEYER, J.; RAMAN, A. *Configuring a Supply Chain to Reduce the Cost of Demand Uncertainty. Production and Operations Management*, v. 6, n. 3, p. 211-225. 1997.
41. FLEISCHMANN, B. *The discret lot sizing and scheduling problem with sequence dependent setup costs. European Journal of operations Research*, v. 75, p. 395-404. 1994.
42. FLEISCHMANN, B.; MEYR, H. *The General Lotsizing and Scheduling Problem. OR Spektrum*, n.19, v. 1, p. 11-21. 1997
43. FORRESTER, J.W. *Industrial Dynamics. Productivity Press*, n. 464, p. 14. 1961.
44. FRANÇA, P.M.; ARMENTANO, V.A.; BERRETTA, R.E.; CLARK, A.R. *A heuristic for lot-sizing in Multi-stage Systems, Computers and operations research*, v. 24, n. 9, p. 861-874. 1997.
45. FURTADO, Pythagoras G.; CARVALHO F. Marcius. *Modelo de Otimização para Planejamento da cadeia de suprimento. FAPESP*. 2001.
46. GAVIRNENI, S. *Information Flows in capacitated supply chains with fixed ordering costs. Management Science*, n. 48, p. 664-651. 2002.
47. HALL, R. W. *Zero Inventories. Homewood, Illinois. Dow-Jones-Irwin*. 1983.
48. HARRIS, F. W. *How many parts to make at once. Operations Research*, v. 38, p. 947-950. 1990.
49. HELD, M.; WOLFE, P.; CROWEDER, H. *Validation of subgradient optimization. Mathematical Programming*, n. 6, p. 62-68. 1974.

50. HIEBER, R.; BRUTSCH, D.; FRIGOMOSCA, F. *How to manage your Supply Network to get better results*. IFIP Conference, Scotland, UK, p. 289-295. 1998.
51. HITOMI, K. *Strategic integrated manufacturing systems: concept and structures*. *International Journal of Production Economics*, n. 25, p. 5-12. 1991.
52. HOESEL, V.S.; ROMEIJN, H.E.; MORALES, D.R.; WAGELMANS, A.P.M. *Polynomial time algorithms for some multi-level lot-sizing problems with production capacities*. Erasmus Research Institute of Management. 2002
53. HOULIHAN, J.B. *International Supply Chain Management*. *International Journal of Physical Distribution e Materials Management*, n.15, p. 22-38. 1985.
54. KIMMS, A.A *Genetic Algorithm for Multi Level, Multi Machine lot sizing and Scheduling*, *Computers & Operations Research*, n. 26, p. 829-848. 1999.
55. KIMURA, O.; TERADA, H. *Design and Analysis of pull system, a method of multi-stage production control*. *International Journal of Production Research*, v. 19, p. 241-253. 1981.
56. KINGSMAN, B.; HENDRY, L.; MERCER, A.; SOUZA, A. *Responding to customer enquiries in MTO companies problems and solutions*. *International Journal of Production Economics*, n. 46, p. 219-231. 1996.
57. KIVIJARVI, H.; TUOMINEN, M. *Logisticis management: a method for evaluation of production-distribution investments*. *International journal of production economics*, n. 24, p. 115-128. 1991.

58. KOLISH, R. *Integrated scheduling, assembly area and part-assignment for large-scale, make-to-order assemblies*, *International Journal of Production Economics*, n. 64, p. 127-141. 2000.
59. LALSARE, P.; SEN, S. *Evaluating backward scheduling and sequencing rules for an assembly shop environment*. *Production and Inventory Management Journal*, v. 36, p. 71-77. 1995.
60. LAMBERT, D M.; STOCK, J. R. *Strategic Logistics Management*. Homewood, Illinois. Dow-Jones-Irwin. 1992.
61. LAMMING, R. *Squaring Lean Supply with Supply Chain Management*. *International Journal of Operations e Production Management*, v. 16, n.2, p. 183-196. 1996.
62. LEE, H.; PADMANABHAN, P.; WHANG, S. *Information Distortion in a Supply Chain: The Bullwhip Effect*, *Management Science*, n. 43, p. 546-558, 1997
63. LEE, H.; PADMANABHAN, P.; WHANG, S. *The Bullwhip Effect in Supply Chains*, *Sloan Management Review*, n. 38, n. 3, p. 93-102. 1997.
64. LEE, H.L.; BILLINGTON, C. *Material Management in Decentralized Supply Chains*. *Operations Research*, n.41, p. 40-53. 1993.
65. LOVEJOI, W.S.; *Myopic Policies for some Inventory Models with uncertain demand distributions*. *Management Science*, v. 36. 1990.
66. LUENBERGER, D. G. *Introduction to Dynamic System Theory: Theory Models and Application*. New York, Wiley. 1979.

67. MAES, J.; McCLAIN, J.O.; VAN WASSENHOVE, L.N. *Multilevel Capacitated Lot Sizing Complexity and LP Based Heuristic*. *European Journal of Operational Research*, v. 53, p. 131-148. 1991.
68. MAGEE, J.F. ; COPACINO, W.C.; ROSENFELD, D.B. *Modern Logistic Management*. New York, Wiley. 1985.
69. MEYR, H. *Simultaneous Lot Sizing and Scheduling on Parallel Machines*. *European Journal of Operational Research*, v. 139, p. 277-292. 2002.
70. NASH, J.F. *Tariffs and Retaliation*. *Review of Economic Studies* n. 21, p.142-53. 1954.
71. O'GRADY, P.L.; BONNEY, M. C. *The application of Discrete Linear Control Theory to analysis and simulation of multi-product, multi-level Production Control Systems*. *International Journal of Production research*, v. 25, p. 45-56. 1987,
72. PACHECO, R.F.; CÂNDIDO, M.A.B. *Metodologia de avaliação da viabilidade de mudança de estratégia de gestão da demanda de MTO para ATO*. Não publicado. PUCPR, 2001.
73. POPPLEWELL, K.; BONNEY, M.C. *The application of discrete linear control theory to the analysis and simulation of multi-product, multi-level production control systems*, *International Journal Res.*, v. 25, n. 1, p. 45-56. 1987.
74. RIDDALLS, C.E. *The stability of supply chains*. *International Journal of Production Economics*, n. 40, p. 459-475. 2002.

75. ROGERS, J. *A computacional approach to the economic lot scheduling problem. Management Science*, v. 4, p. 264-291. 1958.
76. RONEN, B.; COMAN, A.; SCHRAGENHEIM, E. *Peak management. International Journal of Production Economics*, n. 39, p. 3183-3193. 2001.
77. RUSSEL, R.S.; TAYLOR III, B.W. *An evaluation of sequencing rules for an assembly shop. Decision Sciences*, n. 16, p. 196-212. 1985.
78. SALOMON, M.; KUIK, R.; VAN WASSENHOVE, L.N. *Statistical Search Methods for Lotsizing Problems. Annals of Operational Research*, v. 41, p. 453-468. 1993.
79. SCONBERGER, R.J. KNOD, E.M. *Operations Management: Improving Customer Service. Bostn, MA, Irwin*. 1991.
80. SHAPIRO, B.P. *Can Marketing and Manufacturing Coexist? Harward Business Review*. 1977.
81. SIMON, H.A. *On the application of Servomechaminsm Theory in the Study of Production Control. Econometrica*, v. 20, p. 247-268. 1952.
82. STAGGEMEIER, A.T.; CLARK, A. *A survey of lot-sizing and scheduling models. Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Campos do Jordão, São Paulo*. 2001.
83. STALK, J.H.; HOUT, T.M. *Competing against Time: how time based competition is reshaping global markets. New York. Free Press*. 1990.

84. STERMAN, J.D. *The Beer Distribution Game: An Annotated Bibliography Covering its History and Use in Education and Research*. <http://www.solonline.org/pratool/bibl.html>. 1992
85. STEVENS, G.C. *Integrating the Supply Chain*. *International Journal of Physical Distribution e Materials Management*, n. 19, p. 3-8. 1989.
86. STOCK, G.N.; NOEL, P.G.; KASARDA, J.D. *Logistics, Strategy and Structure. A Conceptual Framework*. *International Journal of Operations and Production Management*, v. 18, n. 1, p. 37-52. 1998.
87. STRADER T.J., LIN F., SHAW M.J. *Simulation of order fulfillment in divergent assembly supply chains*. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, v. 1, p. 2. 1998
88. TEMPELMEIER, H.; DERSTROFF, M. *A Lagrangean-Based Heuristic for Dynamic Multilevel Multiitem Constrained Lotsizing with Setup Time*. *Management Science*, v. 5, n. 42, p. 738-757. 1996.
89. TOBIN, N.; MERCER, A.; KINGSMANN, B.G. *A study of small subcontracting and MTO firms in relation to quotation for orders*. *International Journal of Operations e Production Management*, v. 8, n.6, p. 46-59. 1988.
90. TOLEDO, C.; FRANÇA, P.M.; MORABITO, R. *Proposta de um modelo conjunto de programação da produção e dimensionamento de lotes à uma indústria de bebidas*. Não publicado. Unicamp. 2002.

91. TOWILL, D.R. *Supply chain dynamics the cahange engineering challenge of the mind 1990s. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, v. 206, p. 233-245. 1992.
92. TOWILL, D.R. *Dynamics analysis of an inventory and order based production control system. International Journal of Production Research*, v. 20, p. 671-687. 1982.
93. TOWILL, D.R. *Industrial Dynamics Simulation models in the design of supply Chains. International Journal of Physical Distribution an Logistics Management*, n. 22, p. 3-13. 1992.
94. TOWILL, D.R. *Supply Chain Dynamics. International Journal of Computer Integrated Manufacturing* n. 4, p. 197-208. 1991.
95. TOWILL, D.R. *The Seamless Suplly Chain – the Predators Strategic Advantage. International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, n.13, p. 37-56. 1997.
96. TRIGEIRO, W.W.; THOMAS L. J.; MCCLAIN, J. O. *Capacitated Lot-Sizing with Set-up Times. Management Science*, n. 35, v. 3, p. 353-366, 1989.
97. VASSIAN, H.J. *Application of discrete variable servo theory to inventory control. Operations Research*, v. 3, p. 272. 1955.
98. VERGANTI, R. *Order overplanning with uncertain lumpy demand: a simplified theory. International Journal of Production research*, v. 35, p. 3329-3248. 1997.
99. VOLLMANN, T.E.; BERRY, W.L.; WHYBARK, D.C. *Integrated Production and inventory Management* . ed. Business One Irwin. 1993.



100. WACKER, J.G. *A Theory of Material requirements planning (MRP) : an empirical methodology to reduce uncertainty in MRP systems. International journal of Production research*, v. 23, p. 807-824. 1985.
101. WAGNER, H.M.; WHITIN, T.M. *Dynamic Version of the Economic Lot Size model. Management Science*, n. 5, p. 89-96. 1958.
102. WALKER, J. *The single-period Inventory Problem with Uniform Demand. International Journal of Operations and Production Management*, v. 12, p. 79-84. 1992.
103. WHANG, S.; PADMANABHAN, V.P.; LEE, H.L. *The Paralyzing Curse of the Bullwhip Effect in a Supply Chain. Stanford University*. <http://www.gsb.stanford.edu/community/bmag/june95/whang.html>. 1995
104. WIGHT, O.W.; LANDWATER, D. *The standard System. Manufacturing Software Inc*. 1983.
105. WIKNER, J.; TOWILL, D.R.; NAIM, M.M. *Industrial Dynamics Simulation Models in the Design of Supply Chains. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, v. 22, n.5, p. 3-13.1992.
106. WIKNER, J.; TOWILL, D.R.; NAIM, M.M. *The System Simplification Approach in Understanding the Dynamic Behavior of a Manufacturing Supply Chain. Journal of Systems Engineering*, v. 2, p. 164-178. 1992.
107. WOUTERS, M. J. F. *Economic evaluation of lead time reduction. International Journal of Production Economics*, n. 22, p. 111-120. 1991.

108. YOUNG, R.E.; MAYER, R. *The information dilemma: to conceptualize manufacturing as information process. Industrial Engeneering*, n. 16, p. 28-34. 1984.

## GLOSSÁRIO

**Estágio** - é cada *tier* (camada) de fabricação, montagem e armazenamento, onde se efetuam todos os passos necessários à produção completa de um item final, ou a produção de um item componente.

**Estoque de escalão** – Em um sistema multiestágios classifica-se um estoque de escalão como o estoque convencional do item acrescido da quantidade desse item contida no estoque de seus sucessores. É a quantidade total do item presente no sistema. O conceito foi criado por Clark e Scarf (1960) e implementado por Afentakis et al. (1986; 1987).

**Estrutura** – é a seqüência de composição de um item final e a interdependência de seus componentes. A estrutura do processo de fabricação de um item final em um sistema multiestágio pode ser representada por um grafo orientado, onde os nós representam operações e os arcos representam as relações de precedência. Representando o número de operações por  $J$  e associando um único número para cada operação, tem-se  $j = U[1..J]$ . Numerando seqüencialmente as operações, cada operação  $h$  *upstream* (ou sucessora) da operação  $j$  deverá ser numerada de tal forma que  $h > j$ . Entre cada operação  $h$  e sua imediata operação *downstream* (predecessora)  $j$ , representa-se um arco que as interliga. As estruturas podem ser classificadas de acordo com o número de predecessores e sucessores, como: serial, de montagem e geral. Neste trabalho propõe-se também a representação da estrutura por meio de matriz.

**Estrutura serial** - quando todos os itens possuem um único sucessor e um único predecessor, exceto o primeiro item, que não possui sucessor, e o último item, que não possui predecessor (Figura G1).

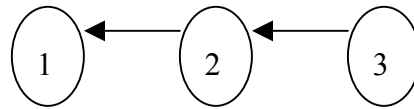


Figura G.1. Exemplo de uma estrutura de produção serial.

**Estrutura de montagem** - quando todos os itens possuem um único sucessor, mas não há limites quanto ao número de predecessores. (Figura G2).

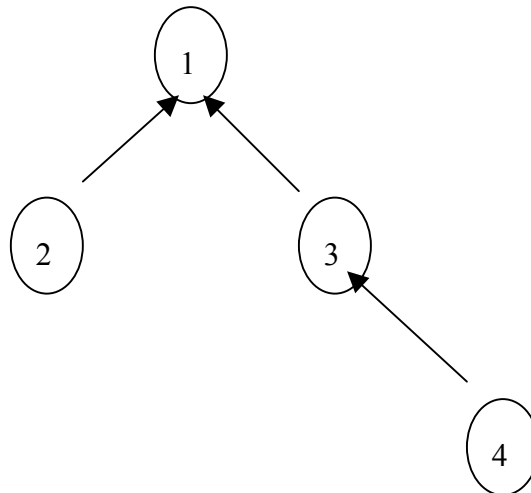


Figura G.2. Exemplo de uma estrutura de produção de montagem.

**Estrutura geral** - não há restrições quanto ao número de predecessores e de sucessores (Figura G3).

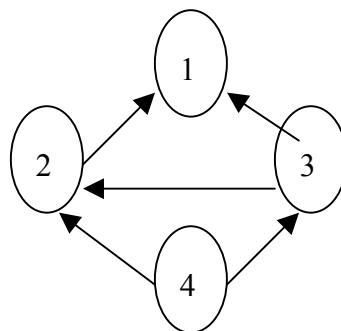


Figura G.3. Exemplo de uma estrutura de produção geral.

**Item predecessor** em uma linha de produção - classifica-se um item como predecessor de outro quando a produção desse item depende do outro necessariamente produzido anteriormente a ele. O conjunto de itens predecessores imediatos do item  $i$ , é representado por  $P(i)$ .

**Item sucessor** em uma linha de produção - classifica-se um item como sucessor de outro quando o item  $o$  utiliza para ser produzido. O conjunto de itens sucessores imediatos do item  $i$  é representado por  $S(i)$ .

**Item final** – classifica-se um item como final quando ele não possui nenhum item sucessor.

**Sistema monoestágio** – Classifica-se um sistema de produção, segundo o ambiente, como monoestágio, quando todos os itens a serem produzidos não dependem de outros, ou seja, são independentes.

**Sistema multiestágios** – Classifica-se um sistema de produção, segundo o ambiente, como multiestágios, quando existem itens componentes, para os quais também deverá ser feito um planejamento de produção ou de compra.

**Tier, estado ou fase** – é cada camada bem definida da fabricação, montagem, armazenamento de um item.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)