

GILBERTO FREIRE

**ESTUDO COMPARATIVO DE MODELOS DE ESTOQUES NUM
AMBIENTE COM PREVISIBILIDADE VARIÁVEL DE DEMANDA**

São Paulo

2007

GILBERTO FREIRE

**ESTUDO COMPARATIVO DE MODELOS DE ESTOQUES NUM
AMBIENTE COM PREVISIBILIDADE VARIÁVEL DE DEMANDA**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de Mestre em
Engenharia

SÃO PAULO

2007

GILBERTO FREIRE

**ESTUDO COMPARATIVO DE MODELOS DE ESTOQUES NUM
AMBIENTE COM PREVISIBILIDADE VARIÁVEL DE DEMANDA**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de Mestre em
Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia de Produção

Orientador:
Prof. Associado Miguel Cezar Santoro

SÃO PAULO

2007

FICHA CATALOGRÁFICA

Freire, Gilberto

Estudo comparativo de modelos de estoques num ambiente com previsibilidade variável de demanda / G. Freire. -- São Paulo, 2007.

105 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Produção.

**1.Administração de estoques 2.Demanda
(Previsão;Variação)**

I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Produção II.t.

DEDICATÓRIA

À Zezé, Eliza, Guilherme, Marina e Felipe

AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas colaboraram com este trabalho. Tantas, com incentivos e ensinamentos, que certamente algumas serão esquecidas. Por isso, a elas agradeço em primeiro lugar, como forma de diminuir minha grande dívida.

Agradeço também ao professor Miguel Cezar Santoro, presente em todas as horas e motor deste trabalho. Mais que orientador, amigo de uma vida inteira.

Agradeço, enfim, aos muitos outros professores da Escola Politécnica, vários já falecidos, que me ensinaram a olhar o que desconheço com curiosidade, método, humildade e sem medo.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é comparar o desempenho de modelos de estoque em uma grande diversidade de situações de demanda e custos. Os modelos de estoque comparados são os tradicionais Reposição do Máximo, Reposição da Base e Lote Fixo, com políticas de revisões periódicas e contínuas, e um modelo derivado da lógica dos sistemas Material Requirements Planning (MRP), aqui denominado Cálculo de Necessidades, que utiliza previsões de demanda para o dimensionamento dos pedidos de reposição de estoque. As séries temporais de demanda, por seu lado, são geradas a partir de tendências e sazonalidades definidas, sobre as quais se acrescenta o componente irregular aleatório. Numa primeira etapa, simulação e busca em vizinhança são utilizadas na seleção do melhor modelo de previsão de demanda, a cada série temporal, para gerar as previsões do modelo Cálculo de Necessidades. Suavização Exponencial Simples, o Método Linear de Holt, Suavização Exponencial Simples com Sazonalidade e o Método de Tendência e Sazonalidade de Holt-Winters são os modelos de previsão utilizados nesta seleção. Numa segunda etapa, simulação e busca em vizinhança são também utilizadas para a otimização dos parâmetros dos sete modelos de estoque para cada série temporal. A soma dos custos médios de Pedido, de Armazenagem e de Falta é utilizada como variável de medição do desempenho dos modelos. Os resultados mostram um desempenho superior do modelo de Cálculo de Necessidades, em quase todos os ambientes testados, secundado pelo modelo contínuo de Reposição do Máximo. Mostram, ainda, um desempenho fraco do modelo contínuo de Reposição da Base, fundamento do conhecido modelo kanban, o que contraria sua forte recomendação como modelo robusto. Este trabalho tem como principal contribuição a evidência da superioridade do modelo de Cálculo de Necessidades sobre os modelos tradicionais nas condições da pesquisa efetuada.

Palavras-chave: estoque. previsão. simulação. busca.

ABSTRACT

The objective of this study is to compare the performance of inventory models in a large range of costs and demand environments. The compared models are the traditional periodic and continuous Up to Maximum Inventory Level, Base Stock and Fixed Lot Size, and another model, based on the Material Requirements Planning (MRP) logic and here referred to as Requirements Planning, which uses demand forecast to quantify the acquisition decisions. In the first step, simulation and neighborhood search are used to select the best of 4 forecasting models, which generates the forecasts to the Requirements Planning model. Single Exponential Smoothing, Holt's linear method, Single Exponential Smoothing with seasonality, and Holt-Winters' trend & seasonality method are these 4 models. In the second step, simulation and neighborhood search are used again to optimize the inventory models parameters. The items' demand time series are based on trends and seasonality defined arbitrarily plus the addition of a irregular random component. The period average Purchase, holding, shortage and total costs are calculated and the models are ranked, based on the total cost criterion. The results show the superior performance of the Requirements Planning model in practically all tested conditions, with the continuous Up to Maximum Inventory Level in a secondary position. The results show, too, the poor performance of the continuous Base Stock model, base of the Kanban system, in opposition to its actual hard recommendation as robust model. This study has, as major contribution, the evidence of the Requirements Planning model superior performance compared with the traditional inventory models.

Key words: inventory. forecasting. simulation. search.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Curvas de “tradeoff” para 4 modelos de previsão de demanda	27
Figura 2.2 – Padrões de curvas dos modelos de previsão adotados	30
Figura 2.3 – Esquema de utilização de dados históricos de demanda para otimização de parâmetros de projeção	32
Figura 2.4 – Esquema de Decisão do modelo Cálculo de Necessidades	40
Figura 3.1 – Modelo de pesquisa em Pesquisa Operacional	51
Figura 4.1 – Arranjo experimental utilizado	53
Figura 4.2 – Reta inicial para geração de série de demanda de 8 períodos	56
Figura 4.3 – Curva-base para geração de série de demanda de 8 períodos	56
Figura 4.4 – Geração dos históricos de Demanda de um item.....	57
Figura 4.5 – Exemplo de Busca para α e β	63
Figura 4.6 – Gráfico das classificações dos modelos de estoque para o Vetor de Custos e TEsp aplicado aos itens da Replicação 1	68
Figura 4.7 – Distribuição dos Tempos de Espera nos 400 itens utilizados para validação.	70
Figura 4.8 – Distribuição da proporção CtoPed/CtoArm dos 400 itens de validação .	71
Figura 4.9 – Distribuição da proporção CtoPed/CtoFal dos 400 itens de validação...	71
Figura 5.1 – Histogramas das diferenças entre os Custos de Operação resultantes de todos os vetores.....	72
Figura 5.2 – Histogramas das diferenças entre os Custos de Operação resultantes dos vetores 1 a 9 na faixa de 0 a 25%.....	73
Figura 5.3 – Distribuição do grau de confiança das diferenças entre os modelos de estoque classificados em 1 ^o . e 2 ^o .lugares nos vetores 1 a 9.....	75
Figura 5.4 – Distribuição do grau de confiança das diferenças entre os modelos de estoque classificados em 1 ^o . e 2 ^o .lugares nos vetores 10 a 18.....	75
Figura 5.5 - Ítens com nível de confiança abaixo de 95% nas diferenças entre os Custos de Operação dos 1 ^o . e 2 ^o . lugares nos vetores 1 a 9.	76
Figura 5.6 – Ítens com nível de confiança abaixo de 95% nas diferenças entre os Custos de Operação dos 1 ^o . e 2 ^o . lugares nos vetores 10 a 18.	77
Figura 5.7 – Distribuição dos 1 ^{os} lugares entre os modelos de estoque para os Vetores de Custo e TEsp 1 a 9 para todos os itens.	78

Figura 5.8 – Distribuição dos 1 ^{os} lugares entre os modelos de estoque nos Vetores de Custo e TEsp 1 a 9 dos itens com confiança igual ou maior que 95%.	78
Figura 5.9 – Distribuição dos 1 ^{os} lugares entre os modelos de estoque para os Vetores de Custo e TEsp 10 a 18 para todos os itens	79
Figura 5.10 – Distribuição dos 1 ^{os} lugares entre os modelos de estoque para Vetores de Custo e TEsp 10 a 18 para itens de confiança igual ou maior que 95%.	80
Figura 5.11 – Gráfico do desempenho dos modelos de estoque versus as proporções CtoPed/CtoArm e CtoPed/CtoFal para os vetores 1 a 9.....	80
Figura 5.12 – Gráfico do desempenho dos modelos de estoque versus as proporções CtoPed/CtoArm e CtoPed/CtoFal para os vetores 10 a 18.....	81
Figura 5.13 –Desempenho dos modelos de estoque nos 400 ítems reais de validação	82
Figura 5.14 – Distribuição dos 1 ^{os} . lugares entre os modelos de estoque para os 400 ítems de validação.....	83
Figura 5.15 – Distribuição dos 1 ^{os} . lugares entre os modelos de estoque para os 144 ítems de validação dentro das faixas utilizadas nos experimentos teóricos.....	84
Figura 5.16 – Distribuição dos 1 ^{os} . lugares entre os modelos de estoque para os 256 ítems de validação fora das faixas utilizadas nos experimentos teóricos..	84
Figura 5.17 – Histogramas das diferenças entre os Custos de Operação para os 144 ítems de validação dentro das faixas utilizadas nos experimentos teóricos.....	85
Figura 5.18 – Histogramas das diferenças entre os Custos de Operação para os 256 ítems de validação fora das faixas utilizadas nos experimentos teóricos..	85
Figura 5.19 – Detalhamento da faixa de 0 - 25% das diferenças entre Custos de Operação dos 144 ítems de validação dentro das faixas utilizadas no experimento teórico.	86
Figura 5.20 – Detalhamento da faixa de 0 - 25% das diferenças entre Custos de Operação dos 144 ítems de validação fora das faixas utilizadas no experimento teórico.	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Tipos e Funções do Estoque	16
Tabela 2.1 – Equações e Fórmulas dos modelos de previsão de demanda	31
Tabela 2.2 – Medidas de desvio de previsão de demanda	34
Tabela 2.3 – Modelos de Estoque e Parâmetros Utilizados	46
Tabela 3.1 – Métodos de pesquisa utilizados em Engenharia de Produção	48
Tabela 4.1 – Valores dos Parâmetros Utilizados na Geração das Séries de Demanda	58
Tabela 4.2 - Resumo das combinações dos valores dos parâmetros utilizados nos itens	59
Tabela 4.3 Parâmetros para o Módulo de Busca, Simulação e Comparação	60
Tabela 4.4 – Cálculo das sementes dos modelos de estoque	65
Tabela 4.5 – Valores de Custos e Tempo de Espera	66
Tabela 4.6 – Valores percentuais de contribuição dos Custos de Pedido, Armazenagem e de Falta na Soma dos Custos de Operações	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABREVIATURA	TERMO
CALNEC	Cálculo de necessidades
CobEst	Cobertura do Estoque
CtoArm	Custo de Armazenagem
CtoFal	Custo de Falta
CtoOper	Custo de Operação
CtoPed	Custo de Pedido
D_t	Demanda prevista no período t
EstARec	Estoque a Receber
EstDis	Estoque Disponível
EstDisCP	Estoque Disponível a Curto Prazo
EstFis	Estoque Físico
EstMax	Estoque Máximo
EstMed	Estoque Médio
EstSeg	Estoque de Segurança
Falta	Quantidade de Faltas
F_t	Fator de sazonalidade do período t
I	Inclinação
LimInf	Limite Inferior
LimSup	Limite Superior
LotEco	Lote Econômico
LotFix	Lote Fixo
LOTFIXC	Lote fixo contínuo
LOTFIXP	Lote fixo periódico
MAD	Desvio Absoluto Médio (Mean Absolute Deviation)
MAPE	Erro Percentual Absoluto Médio (Mean Absolute
ModEst	Código do Modelo de Estoque

MRD	Desvio Relativo Médio (ou BIAS, na lit. em inglês)
MSE	Erro Quadrático Médio (Mean Square Error)
NecLiqMin	NecLiqMin
NivAtd	Nível de Atendimento ou Serviço
NivEst	Nível de Estoque
NLiq	Necessidade líquida
NliqMin	Quantidade mínima de compra
OCompra	Quantidade a Pedir ou a Comprar
Par1	Valor do Parâmetro 1
Par2	Valor do Parâmetro 2
PerRev	Período de Revisão
PreDem	Previsão de Demanda
PtoPed	Ponto de Pedido
Q	Quantidade de itens do lote
REPBASC	Reposição da base contínuo
REPASP	Reposição da base periódico
Repl	Replicação
REPMAXC	Reposição do máximo contínuo
REPMAXP	Reposição do máximo periódico
t	Período
t ₀	Instante inicial
TxArm	Taxa de Armazenagem

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	5
AGRADECIMENTOS.....	6
RESUMO.....	7
ABSTRACT.....	8
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS.....	11
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	12
1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	16
1.1.1 ESTOQUES DEFINIÇÃO, CUSTOS E DECISÕES NA GESTÃO.....	16
1.1.2 DEMANDA E JUST IN TIME.....	18
1.1.3 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	20
1.1.4 IMPORTÂNCIA DO PROBLEMA	21
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 UTILIZAÇÃO DE MODELOS DE PREVISÃO EM SISTEMAS DE GESTÃO DE ESTOQUES.....	23
2.2 MODELOS DE PREVISÃO DE DEMANDA	28
2.2.1 MODELOS QUANTITATIVOS ESTATÍSTICOS DE PREVISÃO DE DEMANDA.....	29
2.2.2 MEDIDAS DE DESVIO DE PREVISÃO	33
2.3 SISTEMAS, POLÍTICAS E MODELOS DE ESTOQUES.....	35
2.3.1 SISTEMAS DE ESTOQUE	35
2.3.2 POLÍTICAS DE ESTOQUE.....	36
2.3.2.1 POLÍTICA DE REVISÃO PERIÓDICA (PERIODIC-REVIEW POLICY)	37
2.3.2.2 POLÍTICA DE REPOSIÇÃO DO MÁXIMO (ORDER UP TO MAXIMUM POLICY) ...	37
2.3.2.3 POLÍTICA DE REVISÃO CONTÍNUA (CONTINUOUS-REVIEW POLICY)	38
2.3.2.4 POLÍTICA DE QUANTIDADE FIXA DE REPOSIÇÃO (FIXED-REORDER QUANTITY POLICY).....	38
2.3.2.5 POLÍTICA DE ESTOQUE BASE (BASE STOCK POLICY)	38
2.3.3 MODELOS DE ESTOQUE.....	39
2.3.3.1 MODELO ATIVO – CÁLCULO DE NECESSIDADES (CALNEC).....	40
2.3.3.2 MODELO PERIÓDICO DE REPOSIÇÃO DO MÁXIMO	42
2.3.3.3 MODELO PERIÓDICO DE REPOSIÇÃO DA BASE	43
2.3.3.4 MODELO PERIÓDICO DO LOTE FIXO.....	43
2.3.3.5 MODELO CONTÍNUO DE REPOSIÇÃO DO MÁXIMO	44

2.3.3.6 MODELO CONTÍNUO DE REPOSIÇÃO DA BASE	44
2.3.3.7 MODELO CONTÍNUO DO LOTE FIXO.....	45
2.3.4 UTILIZAÇÃO DE NECESSIDADE LÍQUIDA MÍNIMA.....	45
2.3.5 CUSTOS E MEDIDAS DE COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS DE ESTOQUE	46
3 MÉTODO DE PESQUISA.....	48
3.1 DEFINIÇÃO DO MÉTODO DE PESQUISA.....	48
3.2 MÉTODO DE PESQUISA ADOTADO.....	49
4 DEFINIÇÃO DO MODELO EXPERIMENTAL	52
4.1 GENERALIDADES	52
4.2 ARRANJO EXPERIMENTAL	53
4.3 MÓDULO DE GERAÇÃO DAS SÉRIES DE DEMANDA.....	55
4.3.1 CONJUNTO DE VALORES DOS DADOS DE DEMANDA.....	57
4.3.2 CONJUNTO DE DADOS DE DEMANDA.....	59
4.4 MÓDULO DE BUSCA, SIMULAÇÃO E COMPARAÇÃO	60
4.4.1 PARAMETRIZAÇÃO DO MÓDULO.....	60
4.4.2 ROTINA DE BUSCA E SIMULAÇÃO PARA MODELOS DE PREVISÃO.....	61
4.4.3 ROTINA DE BUSCA E SIMULAÇÃO PARA MODELOS DE ESTOQUE.....	64
4.4.4 VETOR DE DADOS DE CUSTO E TEMPO DE ESPERA.....	65
4.5 RELATÓRIOS DOS RESULTADOS	67
4.6 JUSTIFICATIVA DA HIPÓTESE A TESTAR.....	69
4.7 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS COM DADOS REAIS.....	70
5 RESULTADOS.....	72
6 CONCLUSÕES.....	88
6.1 PRÓXIMOS PASSOS.....	90
REFERÊNCIAS.....	91
APÊNDICE A – EXEMPLOS DE RELATÓRIOS DE SAÍDA DO MÓDULO DE BUSCA E SIMULAÇÃO.....	93
APÊNDICE B – GRÁFICOS DE DESEMPENHO DOS MODELOS DE ESTOQUE	97

1 INTRODUÇÃO

1.1 Definição do Problema

1.1.1 Estoques Definição, custos e decisões na gestão.

A competição, em um mundo cada vez mais aberto comercialmente, tem levado os administradores a procurar sistemas mais eficientes de gestão, que guiem suas organizações no atendimento das demandas dos diversos interessados em suas atividades. Dentre as iniciativas mais comumente adotadas neste ambiente, destaca-se a busca por redução dos custos de estoques e de modelos de gestão que sejam eficientes nesta busca.

Diversos autores apresentam definições semelhantes para estoques, como a clássica definição de Love (1979) :

“Estoque é uma quantidade de bens ou materiais, sob controle da empresa, em um estado relativamente ocioso, esperando por seu uso ou venda.”

Tabela 1.1 – Tipos e Funções do Estoque

Tipo de estoque	Função
em trânsito	movimentação
	inevitável
	em processo
	criar independência entre fases
devido a lotes de reposição	economia de escala
	exigência tecnológica
sazonais	atender necessidades nos períodos de alta demanda (ou baixa produção)
de segurança	prevenção contra incertezas
	diminuição de custos de controle
especulativos	aproveitamento de situações de mercado

Fonte: Biasi (2002)

Os estoques possuem diversas funções, como as descritas por Biazzzi (2002) e apresentadas na Tabela 1.1.

Sua gestão implica, portanto, na tomada de decisões e ações que afetam a quantidade destes bens ou materiais ao longo do tempo, que acarretam benefícios e custos para a organização. O caráter dinâmico das quantidades no tempo tornam as decisões de **quanto** e **quando** abastecer os estoques de cada item as mais importantes dos modelos de gestão na busca dos objetivos de custos e atendimento da demanda.

Os custos associados à gestão de estoques podem ser assim resumidos:

Custo de Pedido - é a soma dos custos incorridos nos atos de compra ou abastecimento, e inclui os custos de emissão e execução das Ordens de Compra, transporte (quando cobrado por viagem), preparação da produção, etc; não estão inclusos nele os valores dos itens comprados;

Custo de Armazenagem - é a soma dos custos incorridos na manutenção dos itens em estoque através do tempo; inclui o custo de capital imobilizado em estoque;

Custo de Falta - é a soma dos custos gerados pela falta de um item no instante em que é demandado, incluindo lucro cessante ou adiado, custos de produção urgente, etc.

Custo dos itens comprados – é o valor dos materiais comprados/abastecidos, que pode incluir o custo de transporte (quando calculado no preço da unidade de material).

Os três primeiros custos são os mais importantes para as decisões de quando e quanto comprar. Em geral, os custos de armazenagem e de falta são expressos como custos unitários por item por período de tempo. Já o custo de pedido é considerado um custo fixo por compra ou abastecimento efetuado.

Os valores que estes custos podem assumir variam enormemente. A forma como os modelos de gestão decidem quanto e quando comprar/abastecer afeta diretamente o montante dos custos no tempo. Modelos de gestão eficientes em quantidade armazenada / nível de atendimento, por exemplo, podem ser ineficientes em custos, caso comprem muitas vezes e o custo de pedido seja muito alto em relação aos demais. Portanto, a escolha do modelo de gestão eficiente de estoques

deve ser precedida da definição dos objetivos da gestão (eficiência em quantidade armazenada / nível de atendimento, faltas ou custo).

Diversos modelos de gestão de estoques foram criados para estes objetivos. Utilizando a classificação sugerida por Santoro (2006), podemos dividi-los em dois grandes grupos:

Modelos reativos - modelos que permitem tomar as decisões de quando e quanto abastecer os estoques sem que seja necessário obter previsões sobre a demanda.

Modelos ativos - modelos que decidem com base em previsões de demanda futura.

A simplicidade que geralmente existe em suas operações tem levado ao uso intenso dos modelos reativos na gestão de estoques. Eventualmente, hipóteses sobre o comportamento da demanda são feitas durante a determinação dos parâmetros iniciais que operam os modelos. Uma vez fixados, o modelo atua reagindo à demanda quando esta ocorre. A sua eficiência em manter os níveis de estoque e faltas baixos depende de quanto a demanda se afasta de um comportamento **constante estacionário**.

Os modelos ativos, por outro lado, trabalham com previsões de demanda refeitas periodicamente. As variações da demanda, teoricamente, podem ser previstas e os estoques abastecidos nos momentos da ocorrência da demanda, e na quantidade necessária prevista. A sua eficiência depende, portanto, não da variação da demanda, mas de quanto a previsão se desvia do valor real da demanda

O desconhecimento da demanda, portanto, afeta todos os modelos de estoque, os reativos por suas variações no tempo e nas quantidades, e os ativos pelos desvios (erros) de previsão.

1.1.2 Demanda e Just in Time

A forma como os itens estocados são requisitados para uso, na quantidade e no tempo é denominada, neste trabalho, **demanda**. A demanda de um item estocado pode variar, portanto, na quantidade e ao longo do tempo. Como já visto, uma das funções do estoque é auxiliar o atendimento da demanda (estoques de

segurança, sazonal e em processo da Tabela 1.1). A quantidade estocada varia como resultado da variação conjunta do abastecimento e da demanda.

É fácil ver que níveis baixos de estoque podem acarretar baixos níveis de atendimento aos clientes, devido a faltas mais prováveis. Pode-se, contudo, imaginar um objetivo de atendimento da demanda sem faltas e com estoque médio nulo.

Para isto, seria preciso que o abastecimento do estoque ocorresse na quantidade e instante exatos da demanda dos itens. Tal situação nas palavras do criador do método Kanban e pioneiro na sua conceituação, Ohno, é conhecida como “Just in Time”:

Just-in-time significa que, em um processo de fluxo, as partes corretas necessárias à montagem alcançam a linha de montagem no momento em que são necessários e somente na quantidade necessária. Uma empresa que estabeleça esse fluxo integralmente pode chegar ao estoque zero.(Ohno, 1997)

Esta situação dificilmente é encontrada na realidade. O tempo necessário para abastecer o estoque geralmente não é desprezível e nem constante, e seria necessário decidir antecipadamente o abastecimento (quando) para atender a demanda. Problema semelhante ocorre com as quantidades (quanto).

Prever a demanda (em quantidade ao longo do tempo) é a única forma de se atender ao princípio do Just in Time quando a demanda varia e os tempos de reabastecimento não são desprezíveis.

A operação dos estoques conforme o princípio de Just in Time, contudo, não garante a eficiência em custos, como já comentado. Seu objetivo é reduzir as **quantidades** em estoque até zero, com atendimento pleno da demanda, podendo gerar muitas ordens de produção e compra. Onde o Custo de Pedido for alto em relação aos demais custos, isto pode gerar uma grande ineficiência em **custos**. Esta diferença de visão de eficiência é importante pois, dependendo do objetivo da gestão (eficiência em custos ou eficiência em níveis de estoque / níveis de atendimento), a escolha do modelo de estoque pode ser diferente.

1.1.3 Definição do problema

Os modelos tradicionais de estoque, reativos, tem sido largamente utilizados nas organizações, apesar de sua eficiência ser prejudicada quando a demanda varia, o que é freqüente no mundo real. Por sua concepção reativa a níveis e parâmetros do estoque no instante das decisões, estes modelos não fornecem uma forma simples de inclusão das perspectivas futuras, o que só pode ser feito através do recálculo dos parâmetros a cada alteração significativa de demanda.

Existe, porém, uma forma de se introduzir estas perspectivas futuras na gestão do estoque. Através dos modelos ativos, pode-se utilizar as previsões de demanda diretamente no cálculo da reposição de estoque, melhorando a eficiência em níveis de estoque e atendimento, por se aproximar do princípio de Just in Time.

A eficiência em custos, todavia, depende do equilíbrio entre os custos de Pedido, de Falta e de Armazenagem. Os custos de Falta e Armazenagem podem ser facilmente associados aos níveis de estoque e atendimento, com suas eficiências ligadas às eficiências destes níveis e gerando muitas reposições. Estas reposições, porém, elevam o custo total de Pedido, que para ser reduzido necessita de diminuição da quantidade de reabastecimentos, com conseqüente aumento do tamanho dos lotes e / ou faltas. Esta oposição sugere a existência de valores ótimos para os parâmetros de cada modelo em cada situação de demanda e custos, denominadas, daqui por diante, de **ambientes do sistema** de estoque. Sugere, ainda duas questões:

Caso os modelos estejam todos em situação de parâmetros ótimos, qual modelo possui o menor custo total de operação em cada ambiente?

Algum modelo de estoque tem sempre melhor desempenho que os demais em todos ou na maior parte dos ambientes? Em outras palavras, qual o modelo mais robusto dentre os atualmente utilizados?

Os modelos ativos são uma resposta possível a estas perguntas, devido a sua capacidade de incluir previsões, porém o desempenho relativo de modelos reativos pode ser superior em determinados ambientes.

O objetivo deste trabalho, portanto, é comparar diversos modelos de estoque, ativos e reativos, nos mais diversos ambientes de sistema, de forma a conhecer a robustez dos modelos em uso pelas organizações e confirmar o uso de previsões de demanda como importante auxiliar na melhoria do desempenho em custos dos sistemas de estoque.

1.1.4 Importância do problema

Toda organização possui estoques de algum tipo de bem ou material. Naquelas em que estes estoques possuem maior importância para sua operação, a criação ou seleção de um modelo de gestão se apresenta como um problema importante, a ser resolvido de forma eficiente e tendo, o responsável, poucas referências teóricas que o conduzam nesta tarefa.

Este trabalho pretende auxiliar o decisor na escolha entre os modelos ativos e reativos, fornecendo parâmetros e valores associados à eficiência dos modelos.

1.2 Estrutura do trabalho

Este trabalho apresenta, nos próximos capítulos, uma fundamentação teórica, tanto da área de estoques e previsão de demanda, como na de metodologia de pesquisa utilizada em Engenharia de Produção.

Inicialmente, é feita uma revisão bibliográfica sobre a área de estoques e previsão de demanda, discutindo as abordagens utilizadas e suas eventuais deficiências.

Em seguida, é apresentada uma breve discussão sobre a escolha do método de pesquisa e os critérios utilizados para isto.

O modelo experimental utilizado no estudo comparativo é detalhado a seguir, juntamente com as justificativas do uso da técnica de simulação para a parte experimental.

Hipóteses derivadas das deficiências notadas na revisão bibliográfica são então apresentadas, e o projeto dos experimentos completado. A análise dos dados,

a validação, utilizando dados reais, e a interpretação final dos resultados encerram o trabalho. Dados de estoque e informações sobre o “software” de simulação utilizados estão incorporados em meio eletrônico anexado ao final.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Utilização de Modelos de Previsão em Sistemas de Gestão de Estoques

Modelos de estoque e de previsão de demanda são encontrados na literatura há muito tempo. Porém, ao final da II Guerra Mundial é que o estudo destes temas realmente se intensificou e uma abordagem acadêmica foi utilizada. Porém são raras, até hoje, as pesquisas que tratam estoques e previsão de demanda em conjunto para a proposição de modelos ou solução de problemas de estoques.

Brown (1959) é a primeira referência à necessidade de se conhecer a demanda para uma gestão de estoques mais eficiente. Sua ênfase, contudo, era na utilização da demanda para o cálculo dos parâmetros de operação dos modelos reativos tradicionais, e não como um deles.

A demanda, na grande maioria dos trabalhos realizados, desde a década iniciada em 1970, foi tratada por um de dois modelos estatísticos clássicos:

Distribuição de Poisson, simples ou composta;

Distribuição Normal.

Estes modelos, utilizados com a hipótese de serem estáticos no tempo, permitem uma abordagem matemática conveniente para o estudo dos problemas de estoque. Em geral, para demandas pequenas ou com valores médios próximos de zero, é utilizado o modelo de Poisson Composto. Para demandas maiores, o modelo Normal é o mais usual, tendo os limites de uso destes modelos sido objeto de estudo de Browne e Zipkin (1991).

O desenvolvimento teórico a partir destes modelos de demanda permitiu que se identificasse os parâmetros importantes para a gestão de estoques e se aprofundasse o entendimento de suas relações. Algumas conclusões importantes derivadas deste desenvolvimento são, conforme Santoro (2006):

- Erros em custos afetam pouco o valor dos parâmetros;
- Valores ótimos de parâmetros são substancialmente diferentes, quando calculados em conjunto ou individualmente;

- Alguns modelos são freqüentemente superiores aos demais em ambientes teóricos normais (no caso, o modelo conhecido como Ponto de Pedido/ Estoque Máximo).

A realidade das empresas e o fenômeno japonês na gestão e qualidade após os choques do petróleo da década de 70 demandaram da área acadêmica uma abordagem dos problemas de estoques mais próxima desta realidade. Sistemas como o Material Requirements Planning (MRP) e técnicas como o Just in Time começaram a ser utilizados com o objetivo de redução dos estoques (mas com manutenção do nível de atendimento da demanda), e a distância entre a teoria e os problemas reais começou a ser objeto de análise. Zanakis (1980) analisa as razões para esta distância, McLaughlin (1994), Silver e Rahnama (1987) e Silver (1981) analisam vieses no cálculo de parâmetros teóricos em relação aos reais. Antes deles, somente Agarwall (1974) apresenta questionamento à abordagem tradicional, mostrando que a mudança de configuração do ambiente (demanda incluída) altera o tipo de modelo mais adequado à gestão, e que funções de custo de superfícies não-convexas deveriam ser, também, estudadas (através de métodos de busca) devido à sua importância para a realidade das empresas.

O uso de previsões de demanda nos problemas de estoques, além do artigo de Brown (1959) já citado, foi abordado novamente por Eilon et al. (1970). Neste trabalho, a previsão de demanda não é um dos parâmetros do modelo, mas é utilizada para a alteração deles. Os modelos continuam sendo reativos na sua operação, mas a **revisão dos parâmetros** passa a utilizar a previsão da demanda, melhorando seu desempenho em ambientes mais complexos e próximos da realidade.

Somente em Lee e Adam (1986), o impacto dos desvios de previsão de demanda volta a ser abordado. O foco do estudo é a forma como os desvios de previsão impactam o desempenho dos sistemas MRP com formação de lotes, medido por custo e faltas, variáveis de decisão típicas de gestão de estoques. Suas conclusões principais são de que o desvio de previsão da demanda do item independente (que faz parte do Plano-mestre) impacta fortemente o desempenho dos estoques dos seus itens dependentes, com tendência a maior impacto quanto maior a complexidade da estrutura do item. A regra de formação de lote também

impacta o desempenho do MRP, sendo sua escolha uma das decisões importantes que o gestor deve tomar. Nesse estudo, a regra “Period Order Quantity” (POQ) é apontada como a de melhor desempenho geral. Duas observações sobre esse estudo são importantes para este trabalho:

- O artigo estudou desvios de previsão gerados, para cada item, por distribuições normais estáticas de média constante pelo horizonte simulado do item;
- A simulação é utilizada como método experimental básico para o teste das hipóteses e medição das variáveis dependentes.
- O impacto dos desvios de previsão não foram estudados no item de demanda independente, mas sim nos componentes dependentes dele;

A primeira observação explica porque o impacto no custo total não foi proporcional ao tamanho do desvio de previsão. Para demandas constantes ou com tendência próximas a zero, as diversas regras de formação de lotes (que no artigo podem ser entendidas, grosso modo, como modelos de estoque) tem desempenho s semelhantes e independentes do desvio de previsão, como mostrado em Santoro e Freire (2004).

A observação seguinte destaca a simulação como ferramenta válida de pesquisa em experimentos teóricos na área de estoques e importante para exploração de problemas de difícil solução pela matemática tradicional.

Em Gardner (1990) um novo estudo unindo previsão de demanda e um sistema de gestão de estoques (que o autor denomina “inventory control system”) é apresentado. Seu objetivo principal é verificar se modelos de previsão de demanda mais precisos (com menor erro de previsão) podem melhorar o desempenho (em custos e atendimento) dos modelos de estoque.

Utilizando um único histórico de nove anos de movimentação real de estoque de 5661 itens, agrupados trimestralmente, o estudo simula o desempenho de um mesmo modelo de estoque de Lote Econômico, tendo seus dois parâmetros (Tamanho do Lote de ressuprimento e Ponto de Pedido) recalculados a cada trimestre pela demanda prevista por um modelo de previsão de demanda. A previsão de demanda é calculada para o horizonte definido pelo Tempo de Espera (lead time)

de cada item. Os dias de espera do cliente pelo atendimento de seu pedido e o valor total investido nos estoques (todos os itens) também é calculado ao final de cada trimestre, sendo as médias destes valores utilizadas para a construção das curvas de “Tradeoff” apresentadas na figura 2.1. Quatro modelos de previsão de demanda são testados e comparados dessa forma.

Os modelos de previsão tem seus parâmetros calculados por uma simulação prévia, utilizando todo o banco de dados, de forma a minimizar o número de dias de espera para os totais de investimento em estoque. Por razões de viabilidade de processamento de dados, o autor utiliza os mesmos valores dos parâmetros para todos os itens. Assim, os modelos de previsão não variam seus parâmetros durante a simulação do modelo de estoque.

Uma análise da Figura 2.1 mostra que os modelos de previsão de demanda melhoram o desempenho de atendimento à medida que se tornam mais completos. O de melhor desempenho, o “Damped-Trend” de Gardner e McKenzie (1985), além de considerar a tendência linear da demanda, inclui um “ajuste rápido” destas tendências sempre que uma demanda anormal ocorre, aumentando o grau de adaptação do modelo e reduzindo o desvio de previsão.

Algumas características desse trabalho são importantes para o presente estudo:

- O uso de simulação como método experimental, para otimização dos parâmetros dos modelos de previsão e cálculo das variáveis dependentes;
- O uso de dados históricos (reais) de demanda de itens independentes para a simulação;
- A avaliação conjunta do sistema de previsão de demanda e de estoque no desempenho e eficiência de um sistema de gestão de estoques.
- A união das três características anteriores no mesmo trabalho.

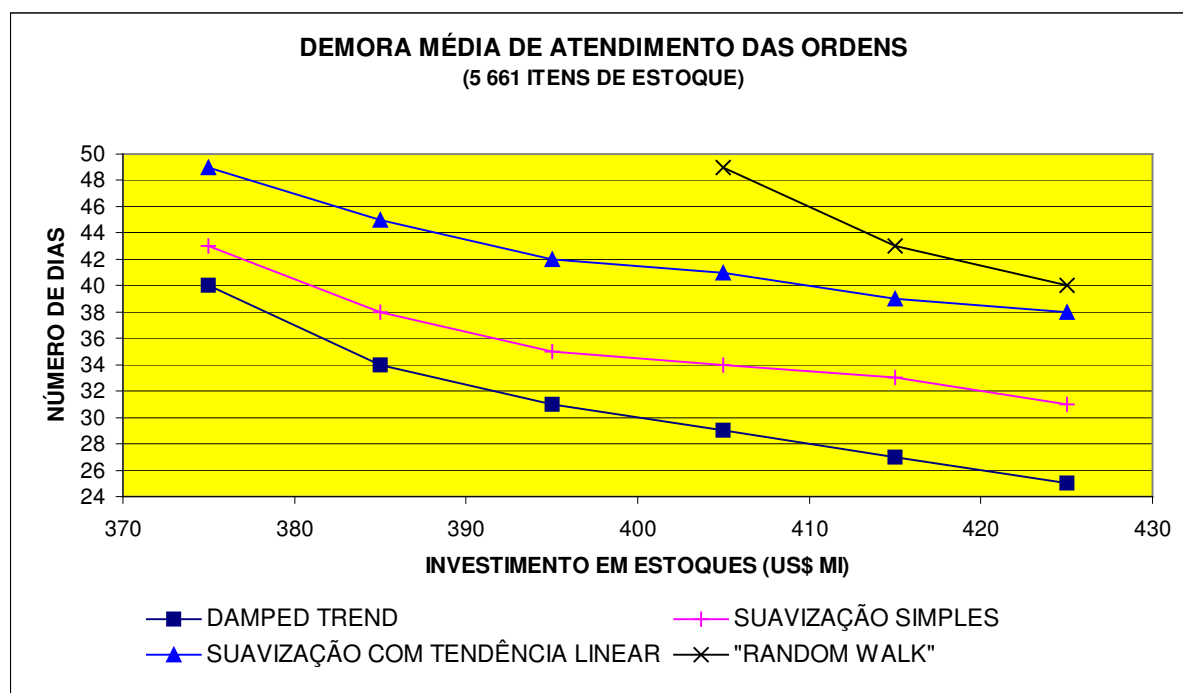


Figura 2.1 – Curvas de “tradeoff” para 4 modelos de previsão de demanda (Extraído de Gardner (1990))

Como o próprio autor salienta nas conclusões, não há garantia de que os resultados obtidos se repitam em outros sistemas de estoque. Os dados reais utilizados, embora amostrados de uma grande população (50 000 itens), não possuem a garantia estatística necessária para generalização dos resultados. Mas a conclusão de que os desvios (e o uso) de previsão da demanda podem impactar seriamente a eficiência dos sistemas de estoque é geral e importante.

Fildes e Beard (1992) analisam os sistemas de previsão de demanda dentro do que chamaram “controle de produção e estoques”. Sua motivação vem da observação da pouca atenção que a literatura de produção e estoques colocava, na época, na especificação de requisitos dos sistemas de previsão utilizados para apoio às atividades de produção e estoques.

Após examinarem as particularidades do problema de previsão e as características dos dados típicos de controle de estoques, avaliam, também, uma variedade de modelos de previsão. Suas conclusões, aqui reproduzidas, são:

A área de controle de produção e estoques tem sido negligenciada na literatura de OR e previsão, sendo Brown e Gardner exceções. Isto tem deixado para os engenheiros de “software” a especificação dos programas

de computador projetados para Controle de Produção e Estoques e as ligações com os diversos sistemas novos de manufatura. Esta orientação está refletida nos programas de referência considerados anteriormente, onde os manuais freqüentemente concentram-se nas complicações dos sistemas de processamento e de relatórios sem qualquer tentativa séria de justificar os fundamentos da abordagem de previsão e dos parâmetros de controle de estoque que deveriam estar no cerne do programa.

Como este artigo demonstrou, pesquisas em previsão recentes tem mostrado que novos métodos oferecem potencial para melhorias substanciais em precisão, que métodos devem ser escolhidos para se adequar às características dos dados, e que esta avaliação deve ser conduzida com considerável cuidado. Melhorias na precisão levam diretamente a economias vantajosas. Sistemas de previsão para Produção e estoques ainda não incluem estas novas idéias. Os usuários, portanto, estão experimentando os resultados de desvios de previsão desnecessariamente grandes – altos níveis de estoque ou atendimento do consumidor pobre. (Fildes e Beard, 1992)

2.2 Modelos de previsão de demanda

Como mostra Hanke e Reitsch (1998), os tipos de previsão disponíveis para uso nas organizações podem ser classificados de diversas formas, tomando-se como base alguma característica comum. Assim, eles podem ser de curto prazo / longo prazo, quando o tempo é a característica considerada, podem ser detalhados / gerais, dependendo do universo abrangido pela previsão (uma fábrica ou um país), ou podem ser classificados como qualitativos / quantitativos, dependendo do uso de dados e julgamento humano utilizados. Esta última classificação é particularmente útil para a análise dos métodos pois coincide com o uso de uma premissa básica em previsões.

Os métodos quantitativos manipulam dados históricos, informações do passado que são projetadas para o futuro, implicando na adoção da premissa de que o passado se repetirá no futuro pelos padrões detectados. Já os métodos qualitativos não obedecem necessariamente esta idéia, permitindo que eventos inexistentes no passado impactem as previsões e eventualmente, anulem os padrões históricos.

Os métodos quantitativos são geralmente subdivididos em dois grupos:

- métodos estatísticos, que conforme Hanke e Reitsch (1998) se preocupam com os padrões históricos e suas alterações cíclicas e aleatórias;

- métodos determinísticos, que procuram identificar as relações causais entre a variável que necessita previsão e outras consideradas influentes nesta; embora chamados de determinísticos, estes métodos também se utilizam de técnicas estatísticas para o estabelecimento das relações causais.

Como observa Santoro (2006), os métodos estatísticos, são função apenas do tempo e da hipótese de comportamento adotada, e costumam ser de aplicação mais simples que os determinísticos, que geralmente requererem desdobramentos sobre o comportamento futuro das outras variáveis influentes.

2.2.1 Modelos quantitativos estatísticos de previsão de demanda

Como mencionado anteriormente, os métodos estatísticos são função do tempo e da hipótese de comportamento adotada. Segundo Hanke e Reitsch (1998), a hipótese é geralmente derivada da configuração que os dados históricos utilizados sugerem quando observados como função do tempo. Embora uma abordagem estatística possa ser utilizada para representar a série, como os modelos de Box-Jenkins, a abordagem mais simples é decompor os dados nos seguintes componentes:

- Tendência (trend) – componente que representa o crescimento ou queda dos valores da série em um período longo de tempo; quando a tendência indica nem crescimento nem decréscimo, a série é denominada estacionária;
- Cíclico (cyclical) – componente que caracteriza a flutuação cíclica ou periódica dos valores em torno da tendência da série, geralmente de longo prazo;
- Sazonalidade (seasonal) – componente que identifica o padrão de variação que se repete regularmente no médio prazo, geralmente associado a ciclos anuais;

- Irregular (irregular) – componente que mede a variabilidade residual da série após a remoção das variações explicadas pelos componentes anteriores.

A figura 2.2 mostra a representação gráfica de séries temporais com algumas combinações destes componentes.

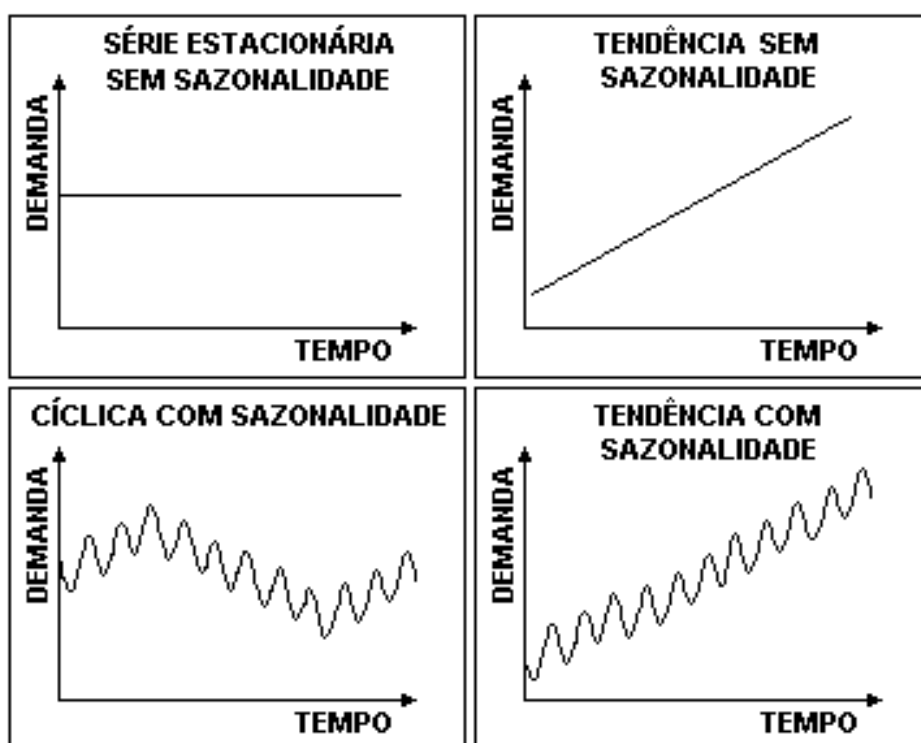


Figura 2.2 – Padrões de curvas dos modelos de previsão adotados

Diversos métodos são utilizados para a detecção e medição dos padrões de cada um destes componentes. Média simples, média móvel, e suavização exponencial são os mais comumente utilizados. Pela simplicidade de uso e pelo poder de ajuste constante que permitem, os modelos de suavização exponencial são de particular interesse para este trabalho.

A suavização exponencial é um procedimento recorrente de ajuste dos componentes incluídos em cada modelo, permitindo uma ponderação entre os dados mais antigos e os mais recentes da série, dependendo do valor do coeficiente utilizado, que varia entre zero e um. Esta ponderação é melhor entendida através das fórmulas apresentadas na Tabela 2.1.

É importante notar que a sazonalidade representa uma ciclicidade que pode abranger períodos de tempo bastante curtos, como semanas ou mesmo dias, dependendo de como o período é definido (o período pode ser um dia, por exemplo).

Makridakis (1998) e Hanke & Reitsch (1998) apresentam dezenas de modelos de suavização exponencial para as hipóteses que incluem os componentes de tendência e sazonalidade. Dentre eles, os apresentados na Tabela 2.1 foram selecionados por permitirem uma crescente complexidade da hipótese de padrão para as séries, necessária para a comparação e escolha de modelos de menores desvios de previsão.

Tabela 2.1 – Equações e Fórmulas dos modelos de previsão de demanda

Modelo	Hipótese	Parâmetros de suavização	Equação de Suavização	Equação de Projeção
Suavização Exponencial simples	Série estacionária	α	$\hat{Y}_{t+1} = \alpha Y_t + (1 - \alpha) Y_t$	$\hat{Y}_{t+p} = \hat{Y}_{t+1}$
Modelo de Holt	Série com tendência	α e β	$A_t = \alpha Y_t + (1 - \alpha) (A_{t-1} + T_{t-1})$ $T_t = \beta (A_t + A_{t-1}) + (1 - \beta) T_{t-1}$	$\hat{Y}_{t+p} = A_t + p T_t$
Modelo de Winters para série estacionária	Série estacionária com sazonalidade	α e γ	$A_t = \alpha \frac{Y_t}{S_{t-L}} + (1 - \alpha) (A_{t-1})$ $S_t = \gamma \frac{Y_t}{A_t} + (1 - \gamma) S_{t-L}$	$\hat{Y}_{t+p} = A_t S_{t-L+p}$
Modelo de Winters	Série com tendência e sazonalidade	α , β e γ	$A_t = \alpha \frac{Y_t}{S_{t-L}} + (1 - \alpha) (A_{t-1} + T_{t-1})$ $T_t = \beta (A_t + A_{t-1}) + (1 - \beta) T_{t-1}$ $S_t = \gamma \frac{Y_t}{A_t} + (1 - \gamma) S_{t-L}$	$\hat{Y}_{t+p} = (A_t + p T_t) S_{t-L+p}$

Notação:

A_t = Valor suavizado de Y_t no instante t

T_t = estimativa da tendência no instante t

S_t = estimativa da sazonalidade

Y_t = valor real da série no período t

\hat{Y}_{t+p} = previsão em t do período $t+p$

p = períodos adiante de t a serem previstos

L = tamanho do período de sazonalidade

α = constante de suavização para os dados da série

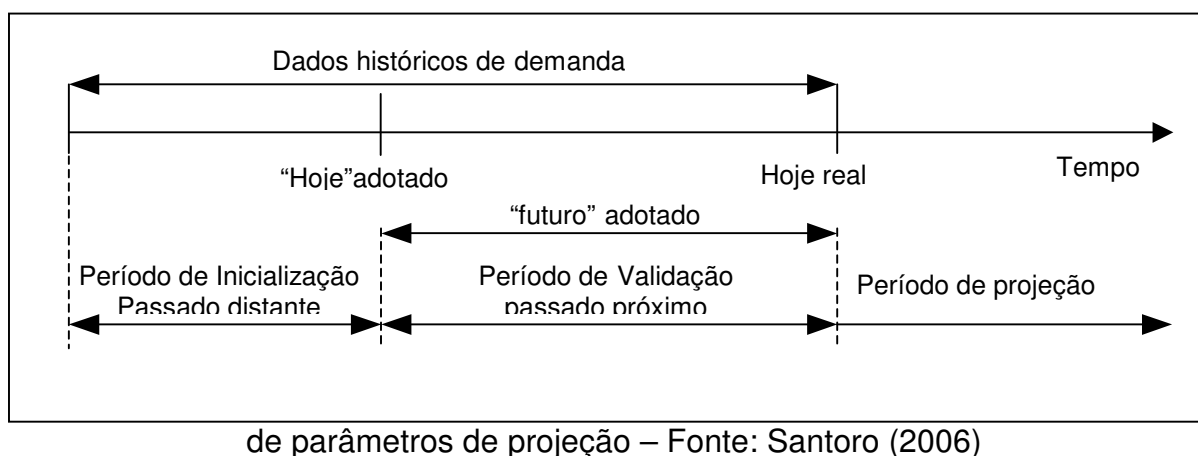
β = constante de suavização para a estimativa da tendência

γ = constante de suavização da estimativa de sazonalidade

Fonte: Hanke & Reitsch (1998)

Cada período futuro, representado pelo valor do parâmetro p (períodos adiante do período t) tem sua previsão calculada pelas fórmulas apresentadas na coluna Equação de Projeção. As demandas são assumidas como as ocorridas durante o respectivo período, acumuladas ao final deste.

Figura 2.3 – Esquema de utilização de dados históricos de demanda para otimização



O ajuste de cada modelo à demanda de cada item se resume à determinação dos valores de α , β e γ que minimizem os desvios entre os valores reais da demanda e os projetados pelas equações de cada modelo. Makridakis (1998) e Hanke e Reitsch (1998) fornecem, novamente, o método de otimização, mostrado na figura 2.3.

A série histórica é dividida em duas partes, sendo a primeira utilizada para os cálculos iniciais de A (constante), T (tendência) e S (índices de sazonalidade), no do período de inicialização. Esses cálculos geralmente utilizam métodos estatísticos simples, como o cálculo de média para a hipótese de série estacionária e regressão linear simples para A e T. Um conjunto de L períodos é necessário para o cálculo inicial dos valores de S.

Com os valores de A, T e S do final do período de inicialização (o “hoje” adotado), utiliza-se a segunda parte dos dados com as fórmulas apresentadas na tabela 2.1, arbitrando-se um valor inicial para os parâmetros α , β ou γ que se deseja otimizar. Compara-se, a cada período da série (“futuro” adotado), o valor real com o previsto pelas equações de previsão (ver Tabela 2.1, coluna Equação de Projeção), utilizando-se uma ou mais medidas de desvio.

Um método de busca é utilizado, então, para alterar os valores de α , β e γ de forma a se obter o conjunto de valores que minimizam o desvio de previsão do período de validação. Utilizando os valores de A, T e S do final do período de

validação, pode-se, então, projetar a demanda futura através das equações de projeção.

Cabe mencionar que estes três parâmetros podem ter valores ótimos diferentes para cada medida de desvio adotado, o que torna necessária uma análise destas medidas para a seleção da mais adequada para os objetivos da previsão.

2.2.2 Medidas de desvio de previsão

As medidas de desvios de previsão mais utilizadas e mencionadas na literatura são, utilizando a notação de Hanke & Reitsch (1998):

Desvio Absoluto Médio (Mean Absolute Deviation – MAD)

Erro Percentual Absoluto Médio (Mean Absolute Percentage Error - MAPE)

Erro Quadrático Médio (Mean Square Error - MSE)

Desvio Relativo Médio (MPE ou BIAS, na literatura em inglês)

Como mostram Fildes e Beard (1992), todas possuem problemas de utilização como medida dos desvios de previsão, resumidos na tabela 2.2.

Como o MAD estima a dispersão dos desvios, sua complementação natural é o MPE, que mede o desvio (bias) sistemático, que funciona como a média da distribuição dos desvios. Ambos tem a vantagem de estar na mesma grandeza da demanda, facilitando a compreensão das comparações para um mesmo item, e a desvantagem de não permitirem comparações entre itens de demanda muito diferentes em grandeza.

Tabela 2.2 – Medidas de desvio de previsão de demanda

MEDIDA	FÓRMULA GERAL	PROBLEMA NA UTILIZAÇÃO
MAD	$MAD = \frac{\sum_{t=1}^n Y_t - \hat{Y}_t }{n}$	O valor da medida não é independente da faixa de valores da série temporal, impedindo comparações entre diferentes séries
MAPE	$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{ Y_t - \hat{Y}_t }{Y_t}}{n}$	Sensível a séries temporais com valores de demanda próximos de zero (divisão por zero)
MSE	$MSE = \frac{\sum_{t=1}^n (Y_t - \hat{Y}_t)^2}{n}$	Sensível a demandas pontuais distantes da média.
MPE	$MPE = \frac{\sum_{t=1}^n (Y_t - \hat{Y}_t)}{n}$	Mede apenas o erro sistemático da série (viés)

onde:

\hat{Y}_t = previsão de Y_t

Y_t = valor real da série no período t

n = no. de períodos utilizados na medição do desvio (período de validação)

Fontes: Santoro (2006) e Hanke & Reitsch (1998)

Uma outra medida de desvio, proposta por Santoro (2006), possibilita a comparação entre modelos de previsão de diferentes itens, numa função idêntica à desempenhada pelo MAPE, porém sem os problemas de demanda zero. Esta medida, denominada pelo autor **Cobertura do Estoque de Segurança (CobEst)** é calculada da forma a seguir:

- Fixa-se um nível de atendimento qualquer (é adotado 95% neste trabalho);
- Adota-se um modelo de distribuição dos desvios (é adotado o modelo Normal neste trabalho) e estima-se os parâmetros desta distribuição utilizando os valores de desvios obtidos na simulação (média e desvio-padrão neste trabalho);

- Calcula-se o ponto da distribuição correspondente ao nível de atendimento desejado (em geral, 1,645 desvios-padrão a partir da média, correspondente a área de 95% da curva Normal). Este valor pode ser entendido como sendo o estoque de segurança necessário para cobrir o desvio de previsão e garantir o atendimento de 95% das demandas para o item em questão;
- Divide-se o valor deste estoque de segurança pela demanda média do item nos períodos considerados, obtendo-se os dias de *cobertura do estoque de segurança* -CobEst.

A CobEst permite comparações entre itens diferentes, além de incluir em seu valor uma combinação de dispersão do desvio e de viés, podendo substituir o MAD e o MPE.

O modelo Normal é adotado devido à boa aderência dele às distribuições de freqüência dos desvios de diversos itens simulados. A escolha do nível de atendimento de 95%, por outro lado, segue a prática da área de estoques, sabendo-se que sua escolha não interfere na comparação, desde que mantido constante.

2.3 Sistemas, Políticas e Modelos de Estoques

2.3.1 Sistemas de Estoque

Estoque é um dos temas mais antigos dentro da gestão da produção. O artigo considerado fundador do estudo de estoques, de Ford W. Harris data de 1913 (Harris F.W., 1913 apud Ballou 2001, p.259) e a antiguidade possivelmente ajudou-o a se tornar uma das áreas de Pesquisa Operacional de maior produção acadêmica. Devido a isto e à natureza deste trabalho, somente modelos de item único (single product ou single item) e de estoque em local único (single echelon) são analisados.

Outra consequência provável desta longevidade são as diferentes formas de referenciar os problemas e as soluções de estoque, com o uso de termos como sistemas, modelos, políticas, níveis, pontos, etc, com significados diferentes, embora próximos. Naddor (1966, p.2) já apontava o problema e propunha algumas definições, como a de sistema de estoque, adotada neste trabalho:

Um sistema de estoque é um sistema no qual somente os três tipos de custo são significativos, e no qual quaisquer dois ou os três estão sujeitos a controle:
 o custo de carregar estoque,
 o custo de faltas incorridas,
 o custo de repor estoque.(Naddor, 1966)

Portanto, a revisão a seguir se concentra nos sistemas de estoque para item único, de local único onde os custos relevantes são os de Armazenagem, de Falta e de Pedido, estruturados de acordo com a definição da citação do parágrafo anterior.

2.3.2 Políticas de Estoque

Para Elsayed E.A. (1985) **política** é o termo utilizado para distinguir a forma geral de decidir quando e quanto reabastecer. As mais comumente utilizadas são:

- Política de Revisão Periódica (Periodic-Review Policy)
- Política de Reposição do Máximo (Order Up to I_{max} Policy)
- Política de Revisão Contínua (Continuous-Review Policy)
- Política de Quantidade Fixa de Reposição (Fixed-Reorder Quantity Policy)
- Política de Estoque Base (Base Stock Policy)

Naddor(1966), de forma semelhante, define política de estoque como a forma de responder as duas perguntas básicas do problema de estoque, quando? e quanto?. Para a primeira questão duas respostas são apresentadas:

- O estoque deve ser repostado quando o nível de estoque é igual ou menor que uma determinada quantidade do item, denominado Ponto de Pedido (Reorder Point ou Reorder Level);
- O estoque deve ser repostado a intervalos de tempo iguais; este intervalo é denominado Período de Revisão (Review Period).

A segunda pergunta também possui duas respostas comuns:

- A quantidade a ser ordenada é uma quantidade fixa definida;
- A quantidade a ser ordenada deve ser tal que leve o nível de estoque a uma determinada quantidade fixa definida.

Naddor (1966) define, então, diferentes políticas a partir da combinação destas respostas e a consideração do Tempo de Espera (Lead Time) nulo ou não nulo. Embora anterior (1966) e mais consistente, sua forma de organizar as políticas não é a mais utilizada na bibliografia. Na seqüência, são revistas as políticas citadas em Elsayed E.A. (1985).

2.3.2.1 Política de Revisão Periódica (Periodic-Review Policy)

Nesta política, o nível de estoque do item (quantidade de itens) é revisado em intervalos de tempo iguais. Este intervalo de tempo é denominado Período de Revisão (Review Period). Ao final de cada Período de Revisão, o nível do estoque é comparado com um nível predeterminado de reposição, o Ponto ou Nível de Pedido (Reorder Point ou Reorder Level). Caso ele seja menor ou igual ao Ponto de Pedido, uma ordem de reposição é dada para **repor o estoque no nível máximo desejado**, denominado Estoque Máximo (Target Level ou Order Level). Caso contrário, nenhuma ação é tomada.

A rigor, como observa Santoro (2006), a denominação de Revisão Periódica para esta política se mostra inadequada, pois modelos derivados das outras políticas podem ser periódicos também. O que é único nela é a regra de cálculo da quantidade a ser ordenada, que permite lotes de tamanhos variados e estoque médio menor ou igual ao Estoque Máximo. Esta característica o torna adequado para implementar estratégias onde o capital investido no estoque é limitado a um valor máximo.

2.3.2.2 Política de Reposição do Máximo (Order Up to Maximum Policy)

Um caso especial da política anterior, esta política supõe revisão **periódica** onde o **Ponto de Pedido é igual ao Estoque Máximo**. Isto implica em reposição a cada Período de Revisão, o que não o recomenda para itens cujo Custo de Pedido é muito alto.

2.3.2.3 Política de Revisão Contínua (Continuous-Review Policy)

Nesta política, o estoque é monitorado de forma **contínua**, ordenando sua reposição assim que o nível do estoque se iguala ou cai abaixo do Ponto de Pedido. A quantidade do lote ordenado é, como nos casos anteriores, a diferença entre o nível do estoque e o Estoque Máximo determinado.

É semelhante à Política de Revisão Periódica (Periodic Review Policy), exceto pelo Período de Revisão, que é zero ou muito pequeno.

2.3.2.4 Política de Quantidade Fixa de Reposição (Fixed-Reorder Quantity Policy)

Similar à anterior, difere desta na forma como a demanda ocorre: os itens são **requisitados um a um**. Portanto, a ordem é colocada quando o nível do estoque atinge **exatamente** o Ponto de Pedido, sendo o lote de reposição de tamanho constante e igual à diferença entre o Estoque Máximo e o Ponto de Pedido. Elsayed (1985) a chama de Política (Q, r), na notação sugerida por Naddor (1966). A Política do Lote Econômico (Economic Order Quantity –EOQ) é deste tipo, quando a quantidade de itens do lote de compra Estoque Máximo – Ponto de Pedido é igual a Q e calculada pela conhecida equação de Harris (1913)

$$Q = \sqrt{\frac{2 \cdot \text{Custo de Pedido} \cdot \text{Demanda Média Anual}}{\text{Custo de Armazenagem}}}$$

2.3.2.5 Política de Estoque Base (Base Stock Policy)

Nesta política, como na de Reposição do Máximo, o Ponto de Pedido e o Estoque Máximo são iguais, sendo ordenada reposição a cada retirada de estoque. A quantidade repostada é calculada, também, pela diferença entre o nível de estoque e o Estoque Máximo. Como conseqüência, a soma do nível de estoque e das ordens de reposição são sempre iguais ao Estoque Máximo, que neste caso é denominado Estoque Base.

Esta política, como notam vários autores, é o fundamento do modelo Kanban de controle do fluxo de materiais idealizado por Taiichi Ohno para a montadora Toyota no Japão.

As semelhanças e diferenças entre as políticas apresentadas confirmam que ainda persiste o que Naddor (1966) dizia: "... ainda não existe uma terminologia aceita nesta área". Em seu livro ele propõe uma organização e definição dos termos, que, todavia, ainda não é plenamente utilizada.

Como anteriormente, adota-se neste trabalho sua definição de **modelo**:

"Modelo é a representação de um sistema sob estudo." Naddor (1966 p.13).

Esta definição permite que as políticas de estoque sejam representadas de forma a obter-se "soluções para os sistemas de estoque": regras ótimas de decisão e minimização dos custos.

Santoro(2006) apresenta uma forma de organização dos modelos de estoque particularmente adequada para a comparação das políticas de estoque. Elas são apresentadas a seguir.

2.3.3 Modelos de Estoque

Os modelos estão organizados por Santoro (2006) primeiramente em modelos periódicos e contínuos. A denominação **contínuo** é utilizada para os modelos cujo Período de Revisão é igual a um, ou seja, igual à menor unidade de tempo adotada na análise do sistema de estoque. Modelos **periódicos** são aqueles cujo Período de Revisão é superior a um.

A rigor, modelos contínuos podem decidir reposições a qualquer instante. Contudo, grande parte da aplicação prática de modelos de estoque é feita com a revisão dos parâmetros ao final de cada período, adotando-se a nomenclatura "contínuo" para o Período de Revisão unitário, que simplifica a simulação do modelo e é adotado pelo autor citado e por este trabalho.

2.3.3.1 Modelo ativo – Cálculo de Necessidades (CALNEC)

O Cálculo de Necessidades é um modelo ativo proposto por Santoro (2006) com base no sistema Material Requirements Planning (MRP). Seu procedimento, embora simples, requer que previsões estejam disponíveis. Seu principal parâmetro é o estoque de segurança (EstSeg), necessário para cobrir os desvios de previsão.

A operação do modelo (a decisão de quanto e quando comprar) é apresentada a seguir, utilizando o exemplo de Santoro (2006) mostrado na Figura 2.4.

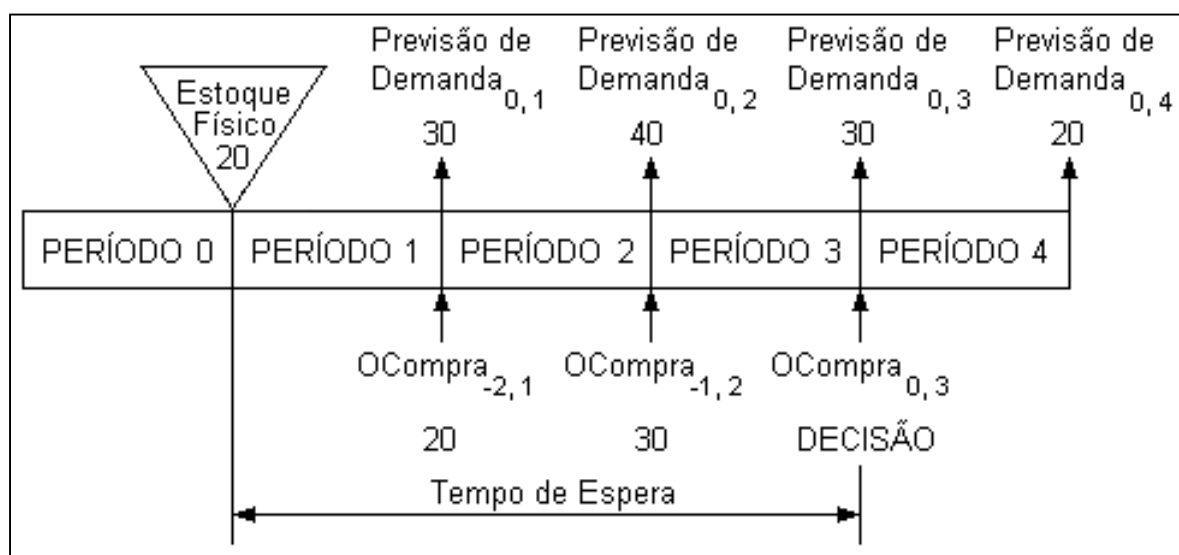


Figura 2.4 – Esquema de Decisão do modelo Cálculo de Necessidades – Extraído de Santoro (2006)

Além dos dados apresentados na figura, o exemplo requer ainda os seguintes:

Tempo de espera do itemTEsp = 3 períodos

Período de Revisão dos Estoques.....PerRev = 1 período

Estoque de Segurança do itemEstSeg = 10 itens

Os eventos, como anteriormente explicado, ocorrem ao final dos períodos. As ordens de reposição de estoque são supostas como sendo de compras de itens, contudo, podem ser entendidas como ordens de produção ou qualquer outro processo de reposição de estoque.

A decisão de compra necessária em $t = 0$ (zero) se refere à ordem de compra que deve chegar no final do período 3 (OCompra_{0,3} : Decisão), já que o Tempo de Espera do item é de 3 períodos. Decisões dos períodos anteriores, com outras previsões, geraram as ordens OCompra_{-2,1} e OCompra_{-1,2} já colocadas, mas ainda não efetivadas por estarem dentro de seu Tempo de Espera.

Para se obter a quantidade da OCompra_{0,3}, calcula-se a necessidade líquida de itens (NLiq) de forma que as demandas previstas sejam atendidas, e tenha-se o estoque de segurança no Estoque Físico ao final do período afetado pela decisão que está sendo tomada na data zero. Isto implica que a previsão do período 4 também esteja disponível, pois ele é o primeiro período afetado pela decisão. O número de previsões necessárias, conhecido como Tempo de Reação e expresso em quantidade de períodos, é, portanto

Tempo de Reação = Tempo de Espera + Período de Revisão do Estoque

No nosso exemplo:

Tempo de Reação = 3 + 1 = 4 Períodos

A necessidade líquida no instante $t = 0$ para a compra no final do período 3 é:

$$NLiq_{0,3} = (30 + 40 + 30 + 20) - (20 + 30) - 20 + 10 = 60$$

Genericamente, o cálculo da necessidade líquida é dado pela fórmula

$$NLiq_{t,t+TEsp} = \sum_{i=1}^{Tre} (PreDem_{t,t+i}) - \sum_{i=1}^{TEsp-1} (OCompra_{t+i-TEsp,t+i}) + EstFis_t + EstSeg$$

onde

$Nliq_{t,t+TEsp}$ = Necessidades Líquidas para o período $t + TEsp$ calculadas em t

$PreDem_{t,t+i}$ = Previsão de Demanda feita em t para o período $t + i$

$Ocompra_{t+i-TEsp,t+i}$ = Ordens de Compra emitidas em $t + i - TEsp$ com chegada prevista em $t + i$

$EstFis_t$ = estoque fisicamente presente na empresa no instante t

$EstSeg$ = Estoque de Segurança

$TEsp$ = Tempo de Espera do item ("Lead Time")

Tre = Tempo de Reação = $TEsp +$ Período de Revisão

Deve-se notar que a previsão indica falta de 10 unidades ao final do período 1, fruto de decisões e previsões anteriores. Porém, nada pode ser feito dentro do funcionamento normal do sistema, pois o tempo de espera impede que decisões tomadas em zero mudem o estado do sistema em tempo menor que o Tempo de Reação (daí seu nome).

A decisão de compra do modelo pode, então, ser tomada pela regra

$O_{Compra\ 0,3} = N_{Liq\ 0,3}$ se $N_{Liq\ 0,3} > 0$ (zero)

$O_{Compra\ 0,3} = 0$ (zero) se $N_{Liq\ 0,3} \leq 0$ (zero)

No exemplo

$N_{Liq\ 0,3} = 60$, portanto deve-se emitir a Ordem de Compra de 60 unidades no instante atual $t = 0$, com chegada prevista para $t = 3$. Caso não existam desvios de previsão, o período 4 se encerrará com 10 unidades em estoque, que é o Estoque de Segurança.

2.3.3.2 Modelo Periódico de Reposição do Máximo

O modelo de Reposição do Máximo é idêntico ao apresentado como Política de Revisão Periódica (ver 2.3.2.1). Sua regra de decisão, utilizando a notação de Santoro (2006) é:

$O_{Compra} = (EstMáx - EstDisCP)$ se $EstDisCP \leq PtoPed$

$O_{Compra} = 0$ (zero) se $EstDis > PtoPed$

onde:

$EstMáx$ = estoque máximo permitido (em quantidade) para o item

$EstDisCP$ = estoque disponível a curto prazo no momento da decisão

$PtoPed$ = parâmetro de quantidade em estoque que determina a decisão de compra

Portanto, ao final do período de revisão do estoque, verifica-se a quantidade de produtos disponível a curto prazo (aquilo que já está no estoque mais o que chegará dentro do tempo de espera do item), e, caso este valor seja inferior ou igual ao ponto de pedido, emite-se uma ordem de compra com a quantidade de itens

necessária para que o estoque atinja a quantidade máxima determinada (EstMáx). Caso contrário, nada é comprado.

O estoque físico somente atinge o EstMáx quando a demanda é nula no período de revisão do estoque, devido à dinâmica do sistema. EstMáx e PtoPed são, portanto, os dois parâmetros do modelo que determinam seu funcionamento e a sua eficiência.

2.3.3.3 Modelo Periódico de Reposição da Base

O modelo periódico de reposição da base decide, ao final do PerRev, pela regra (notação de Santoro, 2006):

$$OCompra = EstMáx - EstDisCP$$

É, portanto, igual à Política de Reposição do Máximo (ver 2.3.2.2), sendo ordenada a reposição do estoque a **todo** Período de Revisão, o que torna o modelo extremamente sensível ao Custo de Pedido.

Neste modelo, o EstMáx faz a função de base para o cálculo da quantidade a repor. Deve-se notar, novamente, que é um caso particular do modelo periódico de Reposição pelo Máximo, quando o PtoPed é igual ao EstMáx. Se as regras de decisão forem seguidas precisamente, não pode ocorrer o caso do EstDisCP ser maior que EstMáx (ou seja, um valor negativo para a Ocompra). Caso isto ocorra na prática, a Ocompra deve ser zerada.

2.3.3.4 Modelo periódico do lote fixo

A regra de decisão deste modelo, ao final de PerRev, é apresentada a seguir:

$$OCompra = n \cdot LotFix \text{ se } EstDisCP \leq PtoPed$$

$$OCompra = 0 \text{ (zero) se } EstDisCP > PtoPed$$

onde:

LotFix = quantidade fixa de itens que formam um lote fixo por algum critério

n = quantidade de lotes fixos que garanta $EstDisCP \geq PtoPed$ após compra

Este modelo é também conhecido como modelo do Lote Econômico, já comentado na Política da Quantidade Fixa de Reposição (ver 2.3.2.4), embora isto só seja correto quando LotFix é calculado de forma a otimizar uma função de custo, que pode variar conforme o objetivo considerado. O modelo de Lote Fixo, contudo, pode existir independentemente da forma de determinação de LotFix.

2.3.3.5 Modelo contínuo de Reposição do máximo

Idêntico ao modelo periódico, o Contínuo de Reposição do Máximo difere apenas quanto ao momento de decisão: enquanto o modelo periódico aguarda o final do PerRev, o modelo contínuo decide no final do período em que o EstDisCP fica menor que o PtoPed.

Este modelo é igual à Política de Revisão Contínua (ver 2.3.2.3), exceto pelo fato, já comentado, de que os eventos no modelo ocorrem ao final do período, enquanto a Política não possui esta restrição. Neste estudo, o modelo contínuo equivale a Período de Revisão igual a 1 , ou seja, a cada final de período.

2.3.3.6 Modelo contínuo de Reposição da Base

Pode-se considerar este modelo idêntico à Política de Estoque Base (ver 2.3.3.5), exceto pelos eventos se concentrarem no final do período. Quando isto é adotado, a semelhança com o modelo de Reposição da Base Periódico fica evidente, o que leva Santoro (2006) a utilizar o mesmo nome para os modelos, diferentes apenas no Período de Revisão. De forma semelhante, também, é um modelo que ordena a reposição do estoque a cada período, sendo mais sensível ainda ao valor do Custo de Pedido

Como dito anteriormente, este modelo é a base do sistema Kanban, utilizado para controle do fluxo de materiais em processo..

2.3.3.7 Modelo Contínuo do Lote Fixo

Da mesma forma que os anteriores, o modelo contínuo do Lote Fixo difere do modelo periódico apenas pelo Período de Revisão, que aqui é um. Semelhante à Política de Quantidade Fixa de Reposição ((Fixed-Reorder Quantity Policy), difere desta por supor os eventos no final do período.

2.3.4 Utilização de Necessidade Líquida Mínima

Devido a suas regras e instantes de decisão, os modelos Cálculo de Necessidades, Periódico de Reposição da Base, e Contínuo de Reposição da Base apresentam ordens de reposição do estoque mais freqüentes que os outros modelos, que trabalham com Ponto de Pedido. Simulações preliminares mostraram que estes modelos perdiam muito de sua eficiência em custo nos ambientes onde o Custo de Pedido é alto em relação aos demais custos. Para aumentar sua competitividade, introduziu-se nestes modelos um outro parâmetro, a Necessidade Líquida Mínima (NecLiqMin) que implica, a cada compra não nula decidida, que uma quantidade mínima seja adquirida, evitando-se que a soma dos custos de pedido altos incidam sobre compras de pequenas quantidades.

A introdução deste parâmetro modifica as regras de decisão dos modelos, como mostrado a seguir:

Modelo de Cálculo de Necessidades com Necessidade Líquida Mínima

$O_{Compra_{t,k}} = N_{Liq_{t,k}}$ se $N_{Liq_{t,k}} > NecLiqMin$

$O_{Compra_{t,k}} = NecLiqMin$ se $0 < N_{Liq_{t,k}} < NecLiqMin$

$O_{Compra_{t,k}} = 0$ (zero) se $N_{Liq_{t,k}} < 0$

onde

k = período futuro no qual o recebimento do lote da ordem será recebido no estoque

Modelos Periódico e Contínuo de Reposição da Base

$O_{Compra} = (EstMáx - EstDisCP)$ se $(EstMáx - EstDisCP) \leq NecLiqMin$

$O_{Compra} = 0$ (zero) se $(EstMáx - EstDisCP) > NecLiqMin$

Com a introdução da $NecLiqMin$, estes modelos passam a ter dois parâmetros como os demais. Além disso, ganham uma forma de equilibrar a eficiência em custos com a eficiência em quantidade estocada.

A tabela 2.3, a seguir, resume os modelos apresentados e respectivos parâmetros, conforme a nomenclatura e notação de Santoro(2006):

Tabela 2.3 – Modelos de Estoque e Parâmetros Utilizados

	REATIVOS						ATIVO
	PERIÓDICOS			CONTÍNUOS			PERIÓDICO
	REPMAXP	REPBASP	LOTFIXP	REPMAXC	REPBASC	LOTFIXC	CALNEC
PtoPed	o		o	o		o	
EstMax	o	o		o	o		
LotFix			o			o	
EstSeg							o
NecLiqMin		o			o		o

PtoPed = Ponto de Pedido **LotFix = Lote Fixo**
EstMax = Estoque Máximo **EstSeg = Estoque de Segurança**
NecLiqMin = Necessidade Líquida Mínima **o = Parâmetro do Modelo**

Fonte: Santoro (2006)

2.3.5 Custos e Medidas de comparação entre modelos de estoque

A comparação entre os modelos de estoque tem se utilizado intensamente de custos como medida de desempenho :

- Gardner (1990), por exemplo, utiliza curvas de investimento associadas ao tempo de atendimento da demanda,
- Lee e Adam (1986) utiliza o total dos custos de armazenagem, preparação e de falta incorridos do período de tempo simulado;
- Jacobs (1985), igualmente, utiliza a soma dos custos lineares de compra, falta, armazenagem custo fixo de preparação na comparação

entre sistemas de previsão utilizados no cálculo de um modelo Periódico de Reposição do Máximo;

A utilização de custos na comparação entre os modelos é a que permite maior generalização, através da ponderação de custos linearmente associados aos parâmetros que influem nos sistemas de estoque.

Como apresentado na introdução deste trabalho, e de acordo com o conceito de Naddor sobre sistemas de estoque, os custos envolvidos na comparação de estoques são:

- Custo de Pedido é a soma dos custos fixos (custo fixo por compra, produção, etc) incorridos no ato de reposição do estoque, e inclui os custos de emissão e execução das Ordens de Compra, transporte, preparação da produção, etc; não estão inclusos nele os valores dos itens comprados;
- Custo de Armazenagem – é a soma dos custos incorridos na manutenção de uma unidade do item em estoque durante um período; pode ser expresso indiretamente como uma taxa (porcentagem) do valor unitário do item;
- Custo de Falta – é a soma dos custos gerados pela falta de um item para atendimento da demanda durante um período; as faltas podem se transformar em atrasos ou perdas de venda, sendo importante a determinação desta transformação para a correta estimativa do custo e cálculo dos lotes de reposição.

As quantidades atrasadas ao final de cada período são valorizadas através de um custo unitário de falta.

As relações entre o Custo de Pedido (por compra), a Taxa de Armazenagem (por unidade de item estocado), e o Custo de Falta (também unitário e por período) são fundamentais na definição dos ambientes que devem ser simulados, como é evidenciado na descrição do simulador utilizado.

3 MÉTODO DE PESQUISA

3.1 Definição do Método de Pesquisa

Atualmente, diversos métodos de pesquisa são utilizados em Engenharia de Produção. Um bom resumo destes métodos se encontra na classificação apresentada por Nakano e Fleury (1996, p.7), na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 – Métodos de pesquisa utilizados em Engenharia de Produção

Método de Pesquisa	Abordagem principal	Instrumentos
Experimental	Quantitativo	Experimentos
Survey	Quantitativo	Questionários
Estudo de caso	Qualitativo	Entrevistas e outras fontes
Pesquisa participante	Qualitativo	Observação direta
Pesquisa-ação	Qualitativo	Observação e participação direta

Fonte: Nakano e Fleury (1996))

Diante destas opções, uma questão se coloca: qual método utilizar, de modo a se atingir os objetivos propostos de forma mais eficaz e, se possível, eficiente ?

Uma leitura dos objetivos mostra que, embora respostas **qualitativas** sejam esperadas, estas respostas estão ligadas a medidas de desvios e desempenho, que são, essencialmente, **quantitativas**.

Uma coleção de dados reais, vinda de empresas com ambientes de estoque diferentes e utilizando diversos modelos de estoque em cada ambiente seria ideal para a realização das comparações. Isto conduziria à escolha do método “Survey”, particularmente apropriado para coleta de dados empíricos estatisticamente válidos. Porém, o conhecimento prévio do pouco ou nenhum uso de modelos ativos nas empresas indica que dificilmente se conseguiria no mundo real a diversidade de modelos necessária para comparações.

O estudo de caso, onde a profundidade e detalhamento de um ou poucos casos são privilegiados em detrimento de uma amostragem mais representativa, também não é adequado para a obtenção da diversidade desejada.

Como explicado anteriormente, fatores humanos não são considerados nesta pesquisa. Por coerência, a influência do pesquisador nos resultados deve, também, ser evitada, o que torna os métodos de pesquisa-ação e pesquisa participativa também inadequados. Resta analisar o método experimental.

Experimentação pura, utilizando empresas como um laboratório para execução de experimentos seria um arranjo ideal para a aplicação do método mais tradicional da ciência.. Porém, empresas dificilmente concordam com este uso de seus recursos e estruturas, por ele geralmente não estar de acordo com seus objetivos e por causa dos riscos associados. Outra forma de experimentação é necessária para a viabilização do trabalho.

O uso da simulação como ferramenta de pesquisa não é nova na pesquisa operacional.

Como observam Chwif e Medina (2006):

No passado, a simulação era considerada uma técnica de último recurso, que deveria ser utilizada quando “todas as técnicas possíveis falhassem”. Atualmente, no entanto, a simulação é uma das técnicas mais utilizadas na Pesquisa Operacional ... (Chwif e Medina, 2006)

A utilização de simulação, assim, pode substituir a experimentação no mundo real, dentro das restrições que a sua concepção deve seguir para manter a validade de seus resultados.

3.2 Método de pesquisa adotado

A pesquisa teórica, baseada em um modelo conceitual que é traduzido em um modelo que é simulado para comprovação de hipóteses é aquela que Bertrand e Fransoo (2002) denominam **pesquisa axiomática normativa**, onde o foco da pesquisa é a solução do(s) modelo(s). Estes autores sugerem o seguinte roteiro para este tipo de pesquisa, utilizando simulação:

- Definição do modelo conceitual do problema – descrição das características do processo ou problema a ser estudado, baseada, geralmente, nos conceitos e divisões aceitos da área;
- Justificativa do uso da simulação
- Definição do modelo científico do processo e do problema – formalização do problema nos termos e conceitos da área;
- Justificativa da hipótese a testar – apresentação das hipóteses e dos fundamentos de sua escolha
- Definição do projeto de experimentos - descrição dos parâmetros, suas combinações, variáveis de decisão, dos modelos e da simulação utilizados;
- Análise dos resultados
- Interpretação dos resultados

Este procedimento tem o objetivo de prevenir alguns dos problemas metodológicos observados na Pesquisa Operacional.

Referindo-se a Mitroff et al. (1974) apud Bertrand e Fransoo (2002), cujo modelo de pesquisa é apresentado na figura 3.1, os autores alertam para a principal falha metodológica encontrada nas pesquisas deste tipo, que é analisar os **resultados** obtidos contra o **modelo conceitual** utilizado e considerá-lo como sendo o “feedback” da **aplicação real**, que é a validação científica dos resultados. Isto é ilustrado, na figura, pela ligação central entre a Solução e o Modelo Conceitual, que não deve ser confundida com a ligação entre a solução e a realidade (Implementação).

Para evitar este problema, as conclusões desta pesquisa deveriam ser validadas em ambientes reais para serem consideradas conhecimento científico (Implementação, na figura 3.1). Isto traz, novamente, a dificuldade já comentada de experimentação em empresas, que leva ao uso da simulação. Porém, um teste das conclusões pode ser feito pela utilização, em outro experimento por simulação, de dados de demandas e custos obtidos no mundo real. O comportamento observado

dos modelos, nestas condições, estariam mais próximos da realidade das empresas, permitindo uma validação parcial dos resultados.

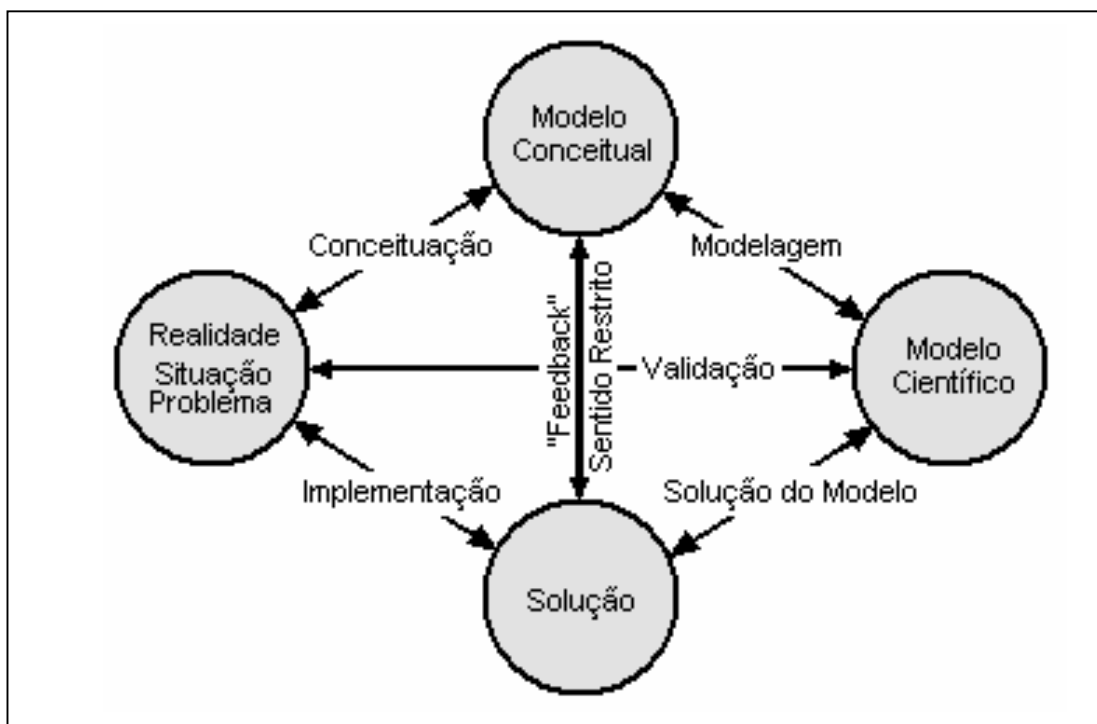


Figura 3.1 – Modelo de pesquisa em Pesquisa Operacional (Extraído de Mitroff et al (1974) apud Bertrand e Fransoo (2002))

Pelo exposto, este trabalho utiliza o método experimental por simulação, com validação parcial dos resultados com outra simulação, esta última utilizando dados de demanda e custos reais de empresas (Pesquisa Quantitativa Axiomática com uso de simulação, na nomenclatura de Bertrand e Fransoo (2002)).

4 DEFINIÇÃO DO MODELO EXPERIMENTAL

4.1 Generalidades

Grande número de parâmetros atuam sobre os sistemas de estoque. As tabelas 4.1, 4.2, 4.3 e 4.5 apresentadas nas próximas seções mostram os mais comumente encontrados nos ambientes destes sistemas. A fixação de alguns deles é necessária para a viabilização da comparação dos modelos desejada, procurando, contudo, obter o menor impacto possível nas conclusões e suas generalizações.

Embora decisões de gestão impliquem sempre na existência de recursos humanos nos sistemas, a pesquisa não abrange as variáveis sociais e humanas que influem nestas decisões. Como não se pretende analisar o mecanismo de decisão em si, mas sim comparar desempenhos de modelos com base no tipo de decisão característica de gestão de estoques, as variáveis humanas serão consideradas como iguais em todos os ambientes, e não influentes nos resultados. Esta restrição permite que a pesquisa seja realizada com parâmetros quantificáveis e as relações entre eles possa ser descrita por lógica matemática, melhorando a qualidade quantitativa das respostas, embora distancie os modelos da realidade. Facilidade de entendimento pelos usuários do funcionamento de cada modelo, custos de implantação, conveniência política da utilização de cada modelo, etc., são exemplos de parâmetros que não estão considerados nas comparações.

As decisões envolvidas neste trabalho são as de gestão de estoques (quando e quanto comprar), com a comparação de desempenho dos modelos de estoque medida pelos custos totais incorridos dentro de um mesmo horizonte de tempo, medido em períodos.

Na seqüência, são detalhados o arranjo experimental utilizado para a comparação, discutidas as parametrizações definidas para geração dos dados, mecanismo de busca e simulação, bem como a forma de saída dos resultados e a condução da simulação com os dados reais de uma empresa.

4.2 Arranjo Experimental

A figura 4.1 apresenta o arranjo experimental utilizado neste trabalho.

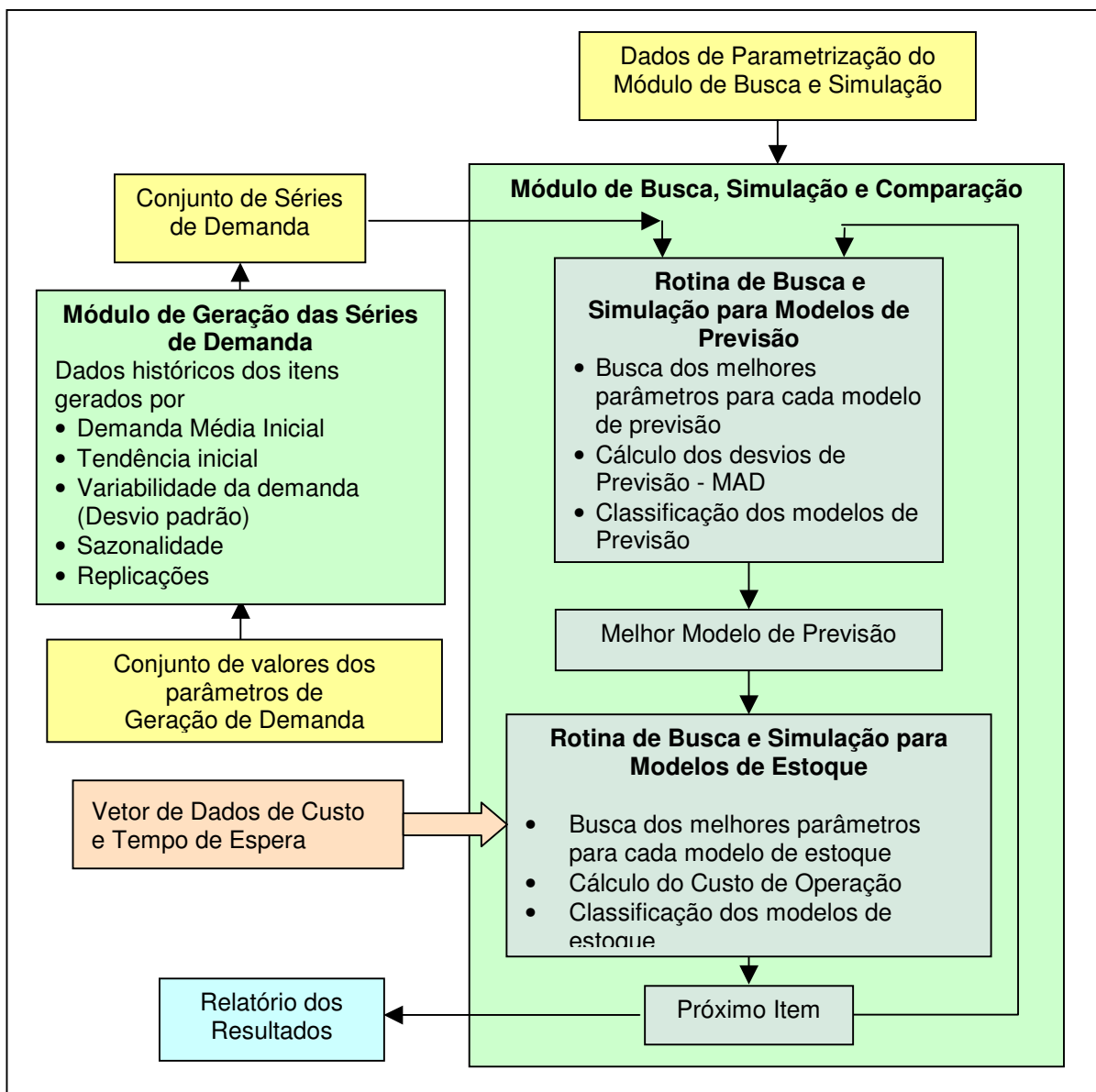


Figura 4.1 – Arranjo experimental utilizado

Ele é formado basicamente por dois “softwares” criados em planilhas Excel e utilizando Visual Basic for Applications – VBA como linguagem de programação, recursos estes que fazem parte do MSOffice 2000. O computador utilizado é um PC Pentium III de 512 RAM. A entrada e saída dos dados é feita pelas planilhas Excel, que também foram utilizadas nas análises dos resultados obtidos.

A parte experimental se inicia pela geração das séries de dados de demanda, utilizando o Módulo de Geração das Séries de Demanda a partir de um conjunto de

parâmetros de entrada definidores da demanda. A saída deste Módulo é um conjunto de séries de demanda que é utilizado em todas as simulações de modelos seguinte.

O Módulo de Busca, Simulação e Comparação é um “software” utilizado em diversos trabalhos acadêmicos, aceitando uma grande quantidade de parâmetros definidores do ambiente de sistema de estoque. Precisa, portanto, ser parametrizado para poder executar a busca, simulação e comparação desejados. O conjunto de valores para estes parâmetros de sistema formam os dados de parametrização do módulo mostrado na Figura 4.1

Uma vez carregado com o conjunto de dados de demanda e com os parâmetros de sistema, o Módulo está pronto para os experimentos de comparação. Dezoito diferentes vetores de dados, que são combinações de valores de Custo de Pedido, Taxa de Armazenagem, Custo de Falta e Tempo de Espera são utilizados, um a cada rodada do módulo, para comparação do desempenho dos modelos de estoques. A comparação é feita após otimização dos parâmetros de cada modelo para cada item (série de demanda), utilizando o **Custo de Operação** médio por período simulado (soma dos custos de Pedido, Falta e Armazenagem incorridos) como medida de desempenho. Os modelos são, então, classificados, item a item, de acordo com seu desempenho otimizado.

A utilização do modelo ativo de Cálculo de Necessidades na comparação requer a disponibilidade de previsões de demanda. Portanto, o módulo calcula estas previsões a partir do melhor modelo de previsão selecionado na Rotina de Busca e Simulação para Modelos de Previsão, que é transferido para a rotina de estoques.

Os valores ótimos dos parâmetros de cada modelo de simulação e estoque, para cada item, bem como os resultados dos custos totalizados e a classificação de cada modelo formam o Relatório principal de saídas de cada um dos 18 vetores testados. Estes relatórios posteriormente são analisados para a verificação e quantificação das hipóteses testadas.

4.3 Módulo de Geração das Séries de Demanda

A geração das séries de demanda é feita com base nos seguintes parâmetros:

- Variabilidade da demanda – utilizado no cálculo do componente irregular da demanda (ver 2.2.1), é o desvio-padrão da distribuição Normal do procedimento adiante descrito;
- Incremento de demanda por período – medida do componente de tendência da série;
- Sazonalidade – vetor de valores S para introdução do componente sazonal na série;
- Demanda Média – parâmetro que posiciona a série em relação à demanda zero, importante se controlar valores nulos para períodos da série;
- Replicações – utilizado para definir a quantidade de séries que são geradas com a mesma combinação de parâmetros, mas com valores do componente irregular diferentes devido à sua aleatoriedade.
- Quantidade de períodos – é o tamanho das séries geradas. O Módulo está preparado para a geração de séries de 60 períodos.

A geração se inicia com o cálculo dos valores de uma reta de inclinação igual ao Incremento e ponto médio igual à Demanda Média, como mostra a Figura 4.2.

A geração se inicia com o cálculo dos valores de uma reta de inclinação igual ao Incremento e ponto médio igual à Demanda Média, como mostra a Figura 4.2.

Em seguida, multiplica-se cada valor S do vetor de sazonalidade pelo respectivo valor de final de período da reta, gerando a curva-base da série. A figura 4.3 ilustra esta operação.

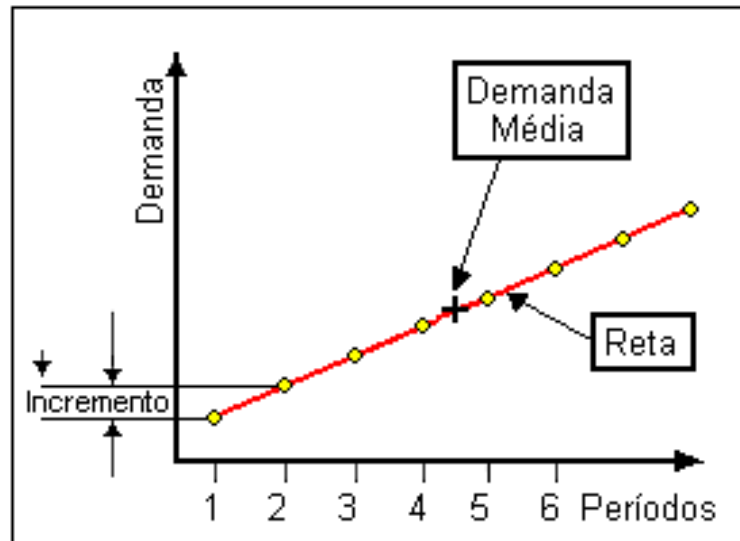


Figura 4.2 – Reta inicial para geração de série de demanda de 8 períodos

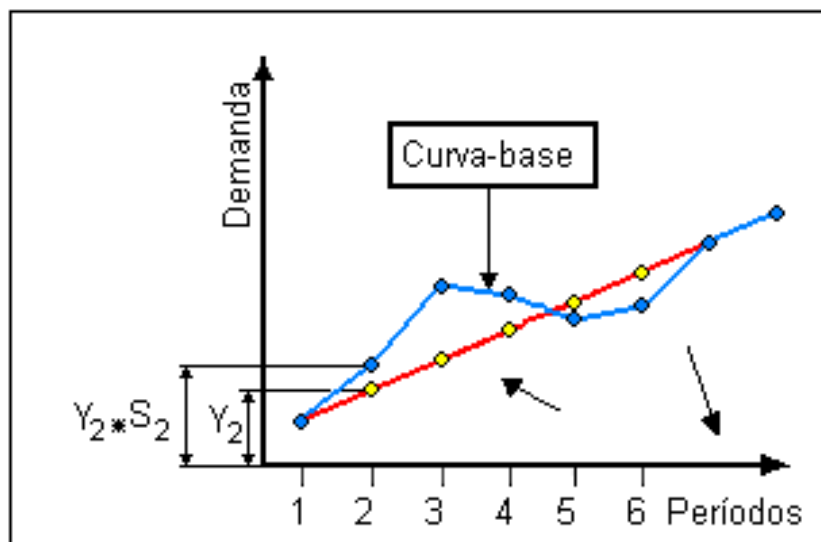


Figura 4.3 – Curva-base para geração de série de demanda de 8 períodos

O componente irregular é, então, acrescentado da seguinte forma:

Cada ponto de final de período da curva-base é considerado centro de uma distribuição Normal cujo desvio-padrão é o desvio-padrão da demanda fornecido;

Uma função geradora de números aleatórios entre 0 (zero) e 1 é utilizada para gerar um valor que será utilizado como probabilidade na função seguinte;

Utilizando-se a função inversa da Distribuição Normal descrita em a), calcula-se o valor da abcissa que corresponda à probabilidade gerada em b): esta abcissa é adotada como o valor da série para o período correspondente.

A figura 4.4 mostra esquematicamente este procedimento.

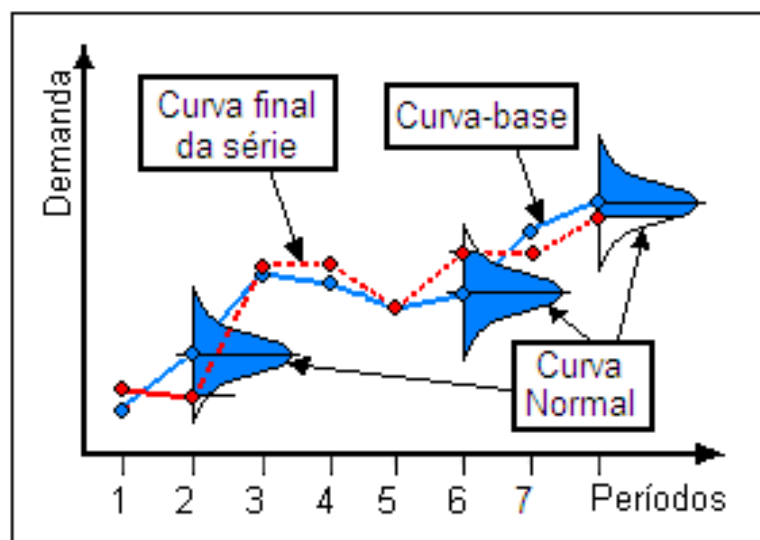


Figura 4.4 – Geração dos históricos de Demanda de um item

As replicações são as séries geradas pela mesma curva-base mas com o processo de cálculo do componente irregular repetido para cada uma delas, gerando curvas finais diferentes devido aos números aleatórios serem diferentes.

4.3.1 Conjunto de Valores dos Dados de Demanda

A Tabela 4.1 apresenta os valores que são utilizados na geração das séries de demanda dos experimentos. Todas as combinações dos valores dos parâmetros foram utilizadas, resultando em 60 tipos de série de demandas, que replicadas 3 vezes, geraram as 180 séries formadoras do conjunto de dados de demanda.

O vetor de sazonalidade de 12 períodos foi definido de forma a introduzir variações consideráveis acima e abaixo dos valores da reta inicial, mas sem alterações violentas (Lumpy Demand) de um período a outro.

Os incrementos definidores da tendência foram escolhidos para distinguir com clareza as séries estacionárias das demais. Um incremento grande demais, contudo, poderia tirar muito da competitividade dos modelos reativos, que tem como premissa a série estacionária, o que levou aos 3 valores escolhidos: 0 (zero) para as séries estacionárias, +2 para as séries crescentes e -2 para as séries decrescentes.

Tabela 4.1 – Valores dos Parâmetros Utilizados na Geração das Séries de Demanda

PARÂMETRO	NÍVEL DO PARÂMETRO	VALORES UTILIZADOS
SAZONALIDADE	COM SAZONALIDADE	ÍNDICES DE 12 PERÍODOS: 0,8; 1,1; 1,3; 1,2; 1,0; 0,9; 0,9; 1,0; 1,2; 1,3; 1,1; 0,8
	SEM SAZONALIDADE	12 ÍNDICES IGUAIS A 1,0
TENDÊNCIA	CRESCENTE	INCREMENTO = 2
	CONSTANTE	INCREMENTO = 0 (ZERO)
	DECRESCENTE	INCREMENTO = -2
VARIABILIDADE	PEQUENA	3; 7
	GRANDE	12; 18; 25
DEMANDA MÉDIA	PEQUENA	150
	GRANDE	300
QTDE. DE PERÍODOS	--	60 PERÍODOS
REPLICAÇÕES	--	3

A variabilidade foi selecionada de forma a gerar diversas grandezas de desvio de previsão e, conseqüentemente, tamanhos de Estoques de Segurança variados no modelo ativo de Cálculo de Necessidades, único que utiliza previsões. Isto é interessante para a comparação com os modelos reativos, pois pode indicar como a imprecisão crescente das previsões afeta a competitividade do modelo ativo.

O valor de 150 escolhido para a Demanda Média teve a finalidade de impedir a ocorrência de valores nulos nas séries, ocorrência possível em algumas combinações de índices de sazonalidade abaixo de 1 com variabilidade alta e tendências não nulas. Este tipo de demanda introduz um “ruído” difícil de se quantificar e analisar, motivo de sua eliminação neste trabalho. O outro valor, 300, foi selecionado para se obter séries onde a proporção entre o componente irregular e a Demanda Média fosse bastante reduzida, mas os desvios de previsão mantivessem seu valor absoluto. O comportamento do modelo ativo pode ser, então,

comparado com os demais modelos em uma condição diferente de Necessidades Líquidas Mínimas, mas semelhante de Estoque de Segurança.

O grande número de períodos para as séries, 60, tem como objetivo permitir um bom ajuste dos modelos de previsão com hipótese de sazonalidade. Estes modelos, para o cálculo dos valores de S (índices de sazonalidade), podem utilizar, desta forma, dois conjuntos de 12 períodos para cálculo inicial (2 valores para cada S) e 3 conjuntos de 12 períodos para um bom ajuste.

Finalmente, as replicações em número de 3 tem a finalidade de permitir a análise do componente irregular percebido pelos modelos de previsão e de estoques. Um número maior, embora desejável, aumenta substancialmente o tempo de processamento, limitante importante comentado adiante.

4.3.2 Conjunto de Dados de Demanda

Um total de 180 séries e respectivos vetores de sazonalidade formam o conjunto de dados de demanda, utilizados nas comparações entre os modelos. Cada série é identificada como um item, numerado de 1 a 60, separados em 3 blocos, um para cada replicação, montados em planilhas. A tabela 4.2 apresenta um resumo das combinações formadoras deste conjunto.

Tabela 4.2 - Resumo das combinações dos valores dos parâmetros utilizados nos itens

Item	Sazonalidade	Tendência	Demanda Média	Variabilidade
1 a 5	sem	0 (zero)	150	3, 7, 12, 18 e 25, nesta ordem
6 a 10	sem	0 (zero)	300	3, 7, 12, 18 e 25, nesta ordem
11 a 15	sem	+ 2	150	3, 7, 12, 18 e 25, nesta ordem
16 a 20	sem	+ 2	300	3, 7, 12, 18 e 25, nesta ordem
21 a 25	sem	- 2	150	3, 7, 12, 18 e 25, nesta ordem
26 a 30	sem	- 2	300	3, 7, 12, 18 e 25, nesta ordem
31 a 35	com	0 (zero)	150	3, 7, 12, 18 e 25, nesta ordem
36 a 40	com	0 (zero)	300	3, 7, 12, 18 e 25, nesta ordem
41 a 45	com	+ 2	150	3, 7, 12, 18 e 25, nesta ordem
46 a 50	com	+ 2	300	3, 7, 12, 18 e 25, nesta ordem
51 a 55	com	- 2	150	3, 7, 12, 18 e 25, nesta ordem
55 a 60	com	- 2	300	3, 7, 12, 18 e 25, nesta ordem

4.4 Módulo de Busca, Simulação e Comparação

4.4.1 Parametrização do Módulo

O Módulo de Busca, Simulação e Comparação permite a comparação de modelos ativos e reativos de estoque, de diversas formas e com imposição de restrições e limitantes que envolvem mais de 170 parâmetros de entrada. Vários necessitam definição para que o software execute corretamente as comparações.

A tabela 4.3 mostra os parâmetros relevantes para a definição do ambiente de sistema de estoque a ser simulado.

Tabela 4.3 Parâmetros para o Módulo de Busca, Simulação e Comparação

Parâmetro	Valor / Estado do parâmetro
Fração Defeituosa	0 (zero)
Capacidade de reposição de itens	Capacidade infinita
Tempo de espera	Constante
Período de revisão para modelos contínuos	1
Período de revisão para modelos periódicos	3
Faltas	Faltas convertidas em atrasos
Funções de Custo	Lineares
Nível de atendimento	60% mínimo
Preço Unitário do item	10

O tempo de espera constante, a fração defeituosa nula e a capacidade de oferta de itens infinita eliminam a variação dos níveis de estoque provocada por reposição de estoque. Os efeitos destas variações se confundem com as de demanda. Esta simplificação ajuda a analisar o desempenho dos modelos baseado nas suas regras de funcionamento, sem a interferência destas variações nos custos de faltas e armazenamento.

A conversão das faltas em atrasos é importante para se evitar descontinuidade no atendimento da demanda.

Um Nível de Atendimento mínimo de 60% é imposto aos modelos. Testes realizados com níveis menores que 50% mostraram inconsistência nos resultados da otimização, devido a valores negativos para as sementes dos parâmetros utilizadas na busca, levando-a para regiões de parâmetros incomuns na realidade. Sendo 60% um Nível de Atendimento relativamente baixo, a busca passa a ser orientada pelo menor Custo de Operação sem provavelmente ser afetada pela limitação do Nível de Atendimento.

O preço unitário do item necessita ser informado pelo fato do módulo calcular o Custo de Armazenagem como uma porcentagem deste preço, a **Taxa de Armazenagem**. O preço é mantido inalterado durante todo o processo de simulação, sendo a taxa uma das entradas do Vetor de Dados de Custo e Tempo de Espera, discutido em 4.4.4.

4.4.2 Rotina de Busca e Simulação para Modelos de Previsão

A Rotina de Busca e Simulação se baseia no método de otimização de α , β e γ discutido em 2.2.1 e mostrado na Figura 2.3. A seqüência a seguir mostra a lógica utilizada.

1. Para cada item e cada modelo de projeção, são calculados os valores iniciais de A e T das fórmulas de suavização utilizando os primeiros 24 períodos da série como o período de inicialização. Para isso, funções disponíveis no VBA do Excel são usadas de acordo com cada modelo :
 - a. Suavização Exponencial simples – Média Aritmética dos períodos 1 a 24
 - b. Modelo de Holt para Tendência – Regressão Linear simples dos períodos 1 a 24
 - c. Modelo de Winters - estacionária com sazonalidade – Média Aritmética dos períodos 1 a 24
 - d. Modelo de Winters - tendência e sazonalidade – Regressão Linear simples dos períodos 1 a 24

O valor da reta da regressão no final do período 24 é utilizado como o valor inicial de A_{24} . O valor de A_0 (valor da reta no instante zero ou **início** do período 1) também é calculado para utilização na rotina de modelos de estoque. A inclinação da mesma reta é o valor inicial adotado para o Incremento T_{24} . Para os modelos de Suavização Exponencial Simples e Winters (séries estacionárias) o valor adotado de A_{24} é a Média Aritmética. Nestes modelos, como visto anteriormente, não existe o parâmetro T . O vetor de sazonalidade da série, fornecido no Conjunto de Dados de Demanda, é adotado como o vetor inicial da Sazonalidade.

2. Na fase de validação, os valores iniciais de α , β e γ são 0,5, centro das faixas de valores informada na parametrização do Módulo (0 a 1 neste trabalho).
3. Os valores de A , T ou S do primeiro modelo são calculados, período a período, pelos 36 restantes, utilizando as fórmulas correspondentes da tabela 2.1. Os desvios de projeção também são calculados período a período, e o MAD ao final da validação é adotado como medida de desempenho do modelo para os valores correntes de α , β ou γ .
4. Novos valores de α , β ou γ são calculados pela subrotina de busca, repetindo-se a seqüência de 2 a 4 até que a parada das iterações ocorra, devido a um dos critérios de parada. Os valores de α , β ou γ correspondentes ao **menor MAD** obtido para o modelo são adotados como os valores ótimos de cada modelo.
5. O próximo modelo de previsão é carregado, e a seqüência de 2 a 4 repetida até a nova parada, e até o que o último modelo de previsão seja otimizado.
6. Ao final do processo, são comparados os valores de MAD correspondentes aos ótimos de α , β ou γ de cada modelo. O **modelo de menor MAD** é selecionado para uso com o modelo ativo de estoque, e os valores de A_0 , T_0 , α , β e γ correspondentes transferidos para a rotina dos modelos de estoque.

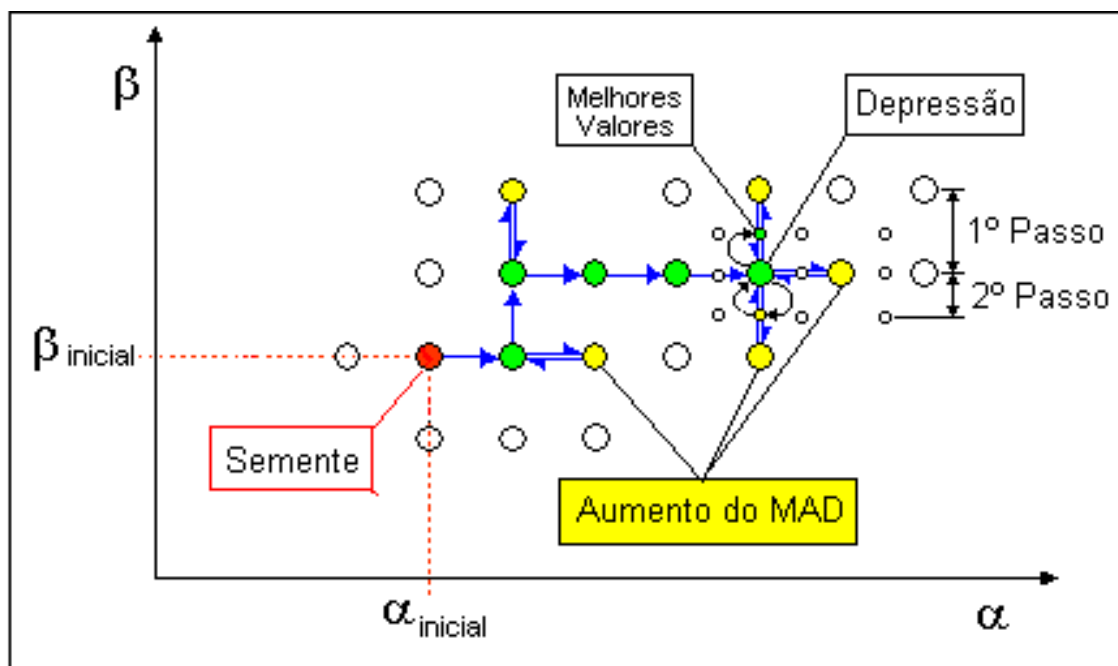


Figura 4.5 – Exemplo de Busca para α e β

Um exemplo de busca para dois parâmetros está mostrado na Figura 4.5. Iniciando o processo para α , calcula-se o MAD para α_{inicial} (e β_{inicial}) utilizando a rotina principal, adiciona-se um passo (Passo 1) a α_{inicial} e recalcula-se o MAD para o novo α (a seta indica o “caminho” até este novo valor). Os dois MAD são comparados e, caso o novo seja menor (como no exemplo), o novo α é adotado como melhor valor e nova adição é feita a α . O processo segue dessa forma até que um valor de MAD maior que o anterior seja encontrado. O valor de α é mantido e troca-se o parâmetro corrente para β . Adiciona-se o passo a β e calcula-se o novo MAD: caso seja maior que o anterior, inverte-se a direção da busca, subtraindo o passo de β e prossegue-se como antes, até um MAD maior que o anterior seja encontrado, retornando-se a α , e assim por diante. Quando a vizinhança é formada por parâmetros de MAD maiores que o do ponto corrente (anotado como Depressão no exemplo), o passo da busca é alterado para um menor (para melhora da precisão dos valores) e a busca é retomada.

O caminho percorrido (indicado pelas setas, no exemplo) e a vizinhança testada são guardados para evitar-se “loops”. Vários critérios de parada são utilizados para o encerramento da subrotina. Os principais são:

Quantidade máxima de iterações – 800

Quantidade máxima de iterações seguidas sem redução do MAD - 70

Tempo máximo de busca – 20 s

Depressão encontrada com o menor passo adotado

Os passos utilizados são 0,05%, 0,02% e 0,01% do valor da semente do parâmetro, iniciando-se pelo maior e mudando para o menor seguinte da forma já explicada.

No modelo de previsão de Winters com hipótese de tendência e sazonalidade, onde os 3 parâmetros precisam ser otimizados em conjunto, a seqüência de mudança de parâmetro é α , depois β , em seguida γ , novamente α , e assim por diante.

4.4.3 Rotina de Busca e Simulação para Modelos de Estoque

Nesta segunda rotina, os modelos de estoque são simulados de forma a se estabelecer, para cada modelo, os valores dos seus parâmetros que minimizam o Custo de Operação.

A rotina calcula, inicialmente, as previsões de demanda para o modelo de CALNEC. Para isto utiliza as equações do modelo de previsão selecionado na rotina anterior, os parâmetros α , β ou γ ótimos encontrados. As equações são aplicadas a partir do primeiro período da série do item, o que torna necessário o conhecimento de A_0 , T_0 e do vetor S para o cálculo.

Em seguida, são calculados os valores iniciais dos parâmetros de cada modelo, que serão utilizados como as sementes da busca. São utilizados cálculos tradicionais indicados na Tabela 4.4:

A simulação é, então efetuada, para cada um dos sete modelos de estoque. Ao final de cada período, é calculado o estoque após a respectiva demanda e executa-se a regra de decisão de reposição de estoque.

Ao final do último período de simulação, a quantidade média de Pedidos, a média das faltas e o estoque médio por período são calculados. Períodos iniciais ou finais que não são afetados pelas decisões do modelo são desprezados no cálculo

dos custos, para eliminar o impacto da entrada em regime. Os custos médios por período de Pedido, Armazenagem e Falta são calculados, aplicando-se os custos unitários fornecidos pelo Vetor de Dados de Custo e Tempo de Espera, detalhado na seção 4.4.4 a seguir. O Custo de Operação final de cada modelo, correspondente à soma destes três custos médios, é utilizado como medida de desempenho.

Tabela 4.4 – Cálculo das sementes dos modelos de estoque

Parâmetro	Referência de Cálculo
Ponto de Pedido	Demanda média no Tempo de Espera somada ao Estoque de Segurança
Estoque Máximo / Estoque Base	valor correspondente ao nível de atendimento (60%) na distribuição Normal formada a partir das demandas da série
Lote Fixo	Lote Econômico (LEC)
Estoque de Segurança	Modelos reativos: diferença entre Estoque Máximo e a Demanda Média real da série Modelo Ativo: valor correspondente ao nível de atendimento (60%) na distribuição Normal formada a partir dos desvios de previsão da série
Necessidade Líquida Mínima	Lote Econômico (LEC)

A mecanismo de busca dos valores ótimos é semelhante ao utilizado na rotina anterior, ilustrada na Figura 4.5, com os modelos de estoque no lugar dos modelos de previsão, α e β substituídos pelos respectivos parâmetros de cada modelo e a medida de desempenho Custo de Operação substituindo o MAD.

Após a simulação de todos os itens do conjunto de Dados de Demanda e a definição dos valores ótimos, é feita a classificação dos modelos de estoque, item a item, segundo a ordem crescente de seus Custos de Operação.

4.4.4 Vetor de Dados de Custo e Tempo de Espera

Os últimos parâmetros necessários para a comparação entre os modelos são as informações de custos e Tempo de Espera. Eles compõem o Vetor de Dados de

Custo e Tempo de Espera, que é diferente a cada execução do Módulo de Busca, Simulação e Comparação.

Tabela 4.5 – Valores de Custos e Tempo de Espera

Vetor de Custos e Tempo de Espera					Custo de Pedido / Custo de Armazenagem *	Custo de Pedido / Custo de Falta
Vetor N°	Custo unitário de Pedido	Taxa de Armazenagem	Custo unitário de Falta	Tempo de Espera		
1	4	0,010	0,4000	1	40	10
2	4	0,010	0,0550	1	40	72,7272
3	4	0,010	0,0400	1	40	100
4	8	0,010	0,8000	1	80	10
5	8	0,010	0,1100	1	80	72,7272
6	8	0,010	0,0800	1	80	100
7	60	0,010	6,0000	1	600	10
8	60	0,010	0,8250	1	600	72,7272
9	60	0,010	0,6000	1	600	100
10	4	0,010	0,4000	3	40	10
11	4	0,010	0,0550	3	40	72,7272
12	4	0,010	0,0400	3	40	100
13	8	0,010	0,8000	3	80	10
14	8	0,010	0,1100	3	80	72,7272
15	8	0,010	0,0800	3	80	100
16	60	0,010	6,0000	3	600	10
17	60	0,010	0,8250	3	600	72,7272
18	60	0,010	0,6000	3	600	100

* Custo de Armazenagem = Taxa de Armazenagem x Preço do item = 0,010 x 10 = 0,10

A Tabela 4.5 mostra os vetores utilizados. A escolha dos valores de cada parâmetro de custo é baseada nas seguintes observações:

- A classificação dos modelos é função da **proporção** dos custos unitários e não de seus valores absolutos. Testes preliminares mostraram que a classificação não se altera com a mudança dos valores dos custos unitários, desde que sejam mantidas as proporções entre eles, indicadas nas colunas à direita da Tabela 4.5;
- Houve a procura das proporções em que as contribuições de cada tipo de custo fossem aproximadamente iguais, em torno de 33% da soma dos

Custos de Operação de todos os modelos de todas as séries; o melhor par de valores encontrados foi o utilizado no vetor 5, com as respectivas porcentagens mostradas na Tabela 4.6:

Tabela 4.6 – Valores percentuais de contribuição dos Custos de Pedido, Armazenagem e de Falta na Soma dos Custos de Operações

Proporções utilizadas: Custo de Pedido / Custo de Armazenagem = 80 e Custo de Pedido / Custo de Falta = 72,7272			
Σ Custo de Pedido *	Σ Custo de Armazenagem *	Σ Custo de Falta *	Σ Custo de Operação *
7378,42	6696,81	6559,83	20635,1
35,76%	32,45%	31,79%	100,00%

* Somas dos custos de todos os 7 modelos de estoque para os 180 itens simulados

Partindo-se destas proporções, as demais foram definidas levando-se em conta a forma como elas se distribuem nos 400 itens utilizados na validação, como mostrado em 4.7. Os parâmetros de custo foram, assim, definidos a partir do valor de Custo de Pedido igual a 8 (como o utilizado na empresa fornecedora dos itens de validação) e mantendo-se fixo o Custo de Armazenagem em 0,10, como mostra a tabela 4.5.

4.5 Relatórios dos Resultados

As saídas do experimento teórico podem ser melhor entendidas a partir do pseudo código do processamento realizado, apresentado a seguir:

Para cada um dos 18 vetores de Custos e Tempo de Espera

Para cada uma das 3 replicações das séries de demanda

Para cada um das 60 séries de demanda de cada replicação

Para cada um dos 4 modelos de previsão de demanda

-Escolhe o modelo de previsão com suavização exponencial parametrizado ótimo, utilizando busca com simulação

Para cada um dos 7 modelos de estoque

- Calcula os parâmetros ótimos utilizando busca com simulação

- Calcula o Custo de Operação médio por período

Ordena os modelos de estoque pelo Custo de Operação e grava resultados

Ciclo das séries de demanda

Ciclo das replicações

Ciclo dos vetores de Custos e Tempo de Espera

Um exemplo do relatório de saída de cada processamento referente a cada Vetor de Custos e Tempo de Espera é apresentado no Apêndice A. Dentre muitas informações apresentadas, destacam-se as referentes aos parâmetros ótimos dos modelos de previsão e de estoques, a classificação dos modelos de estoques para cada item simulado, os custos médios por período de Pedido, Armazenagem e Falta, e o custo de Operação. Outras informações resultantes da simulação, como Nível de Atendimento, estoques médios, os desvios de previsão MAD e Cobertura de Estoque também fazem parte do relatório principal de saída.

A figura 4.6 ilustra a saída gráfica da classificação dos modelos de estoque para a rodada do Vetor 1 de Custos e Tempo de Espera para os 60 itens da Replicação 1. Nele pode-se observar o desempenho de cada modelo para a combinação de custos e Tempo de Espera utilizada, desempenho este expresso na porcentagem de vezes em que cada modelo obteve determinada classificação nos 60 itens da replicação utilizada.

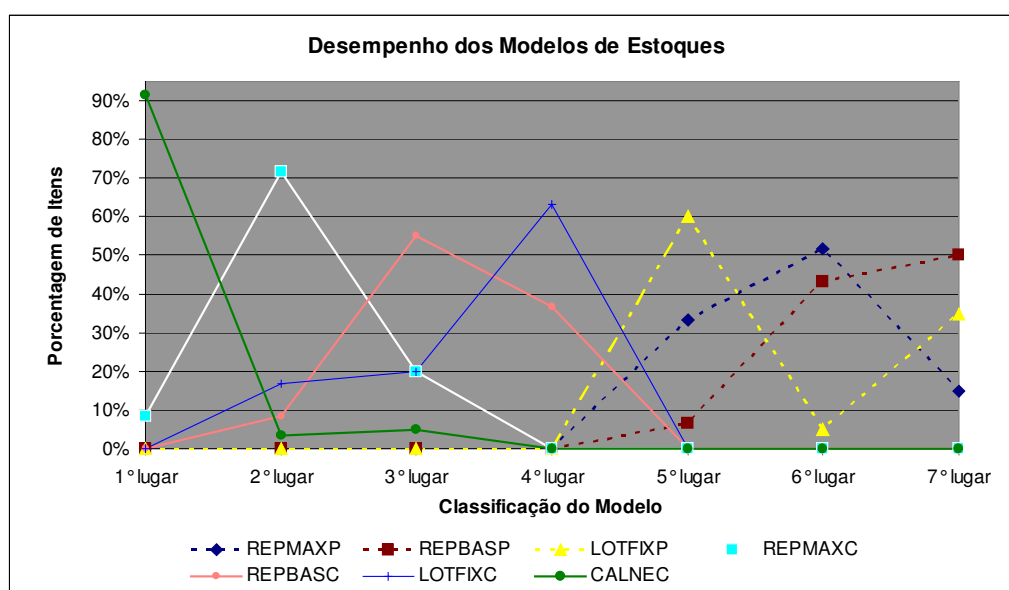


Figura 4.6 – Gráfico das classificações dos modelos de estoque para o Vetor de Custos e TEsp aplicado aos itens da Replicação 1

Os 54 gráficos resultantes dos experimentos referentes aos itens das Replicações 1, 2 e 3 são apresentados no Apêndice B, como ilustração. As análises das informações dos relatórios de saída, visando a confirmação ou rejeição das hipóteses propostas, estão apresentadas em 5..

4.6 Justificativa da hipótese a testar

A hipótese que deve ser testada pode ser resumida como segue:

O modelo de gestão de estoque ativo Cálculo de Necessidades com Necessidade Líquida Mínima é mais eficiente, em Custo de Operação, que os modelos reativos em todos os ambientes, sendo sua eficiência relativa crescente com o aumento dos Tempos de Espera.

Tal hipótese se baseia na forma em que a eficiência depende da Demanda e dos Tempos de Espera nos dois tipos de modelos.

Nos modelos ativos, a quantidade em estoque depende diretamente do desvio de previsão da demanda. Em outras palavras, ela depende do quanto os componentes de tendência, ciclicidade e sazonalidade conseguem explicar da variação da demanda, sendo o desvio uma medida da parte aleatória restante (o componente irregular), não previsível pelo modelo de projeção adotado e, por isso, requerendo um estoque de segurança..

Nos modelos reativos, porém, toda variação de demanda é vista como sendo aleatória. Até a parte da variação eventualmente explicável pela tendência histórica é tratada como aleatória.

Nas demandas estacionárias, a tendência é uma reta constante, e a parte aleatória da previsão de demanda é, teoricamente, igual à variação total da demanda. Nestes casos, as eficiências dos modelos devem se aproximar muito, podendo o modelo mais eficiente variar muito e de forma aleatória. Trabalho anterior realizado por Santoro e Freire (2004), mostra evidências claras deste comportamento. O modelo CALNEC com NecLiqMin é tão competitivo quanto os demais modelos contínuos nestas condições de demanda, podendo ser ligeiramente melhor caso a demanda apresente alguma pequena tendência. Esse comportamento deve ser melhor verificado.

Quanto aos Tempos de Espera, estes definem os horizontes de previsão para os modelos ativos. Os modelos reativos, por “enxergarem” apenas o status corrente do sistema, reagem mais lentamente à variação da demanda do que o modelo

reativo, que considera todo o Período de Reação. Também este fato deve ser melhor verificado.

4.7 Validação dos resultados dos experimentos com dados reais

Históricos de demanda de quatrocentos itens, obtidos de banco de dados de empresa do ramo metalúrgico, são utilizados em simulações semelhantes às das demandas geradas para a validação dos resultados. Nestas simulações, o Custo de Pedido, igual a 8 para todos os itens, é igual ao adotado pela empresa. Os custos de Armazenagem e Falta, bem como os Tempo de Espera também são os praticados pela empresa, específicos para cada ítem.

As figuras 4.7, 4.8 e 4.9 mostram a distribuição dos principais parâmetros desta massa de dados, auxiliando na definição dos valores dos parâmetros utilizados no experimento teórico.

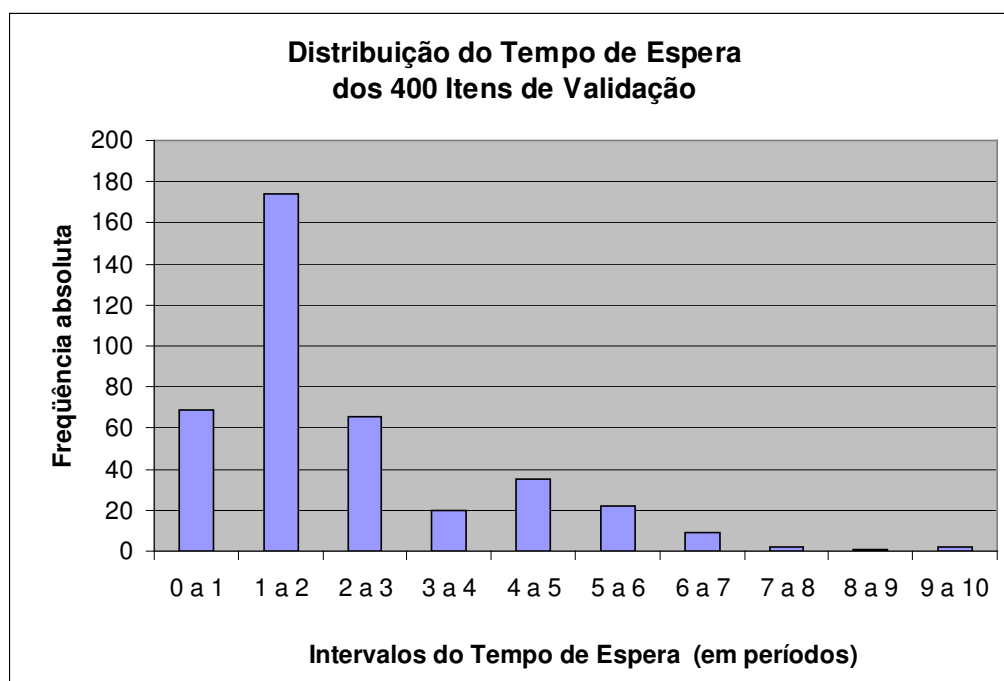


Figura 4.7 – Distribuição dos Tempos de Espera nos 400 itens utilizados para validação.

Devido ao baixo custo unitário de vários itens, que implica em Custos de Armazenagem ainda menores, algumas das proporções CtoPed/CtoArm são extremamente grandes, como se vê na figura 4.8. A escolha de um valor alto para

esta relação (valor 600 na tabela 4.5) no experimento teórico teve como finalidade aproximar uma parte dele com as condições reais observadas.

Da mesma forma, a proporção CtoPed/CtoFal teve seu valor 10 derivado do gráfico da figura 4.9, para se situar na região onde a maior parte dos 400 itens se posiciona.

Espera-se que a comparação dos 7 modelos de estoque utilizando estes itens custos e Tempo de Espera reais tenha resultados semelhantes aos obtidos pelas demandas teóricas, de forma a permitir a generalização de suas conclusões.

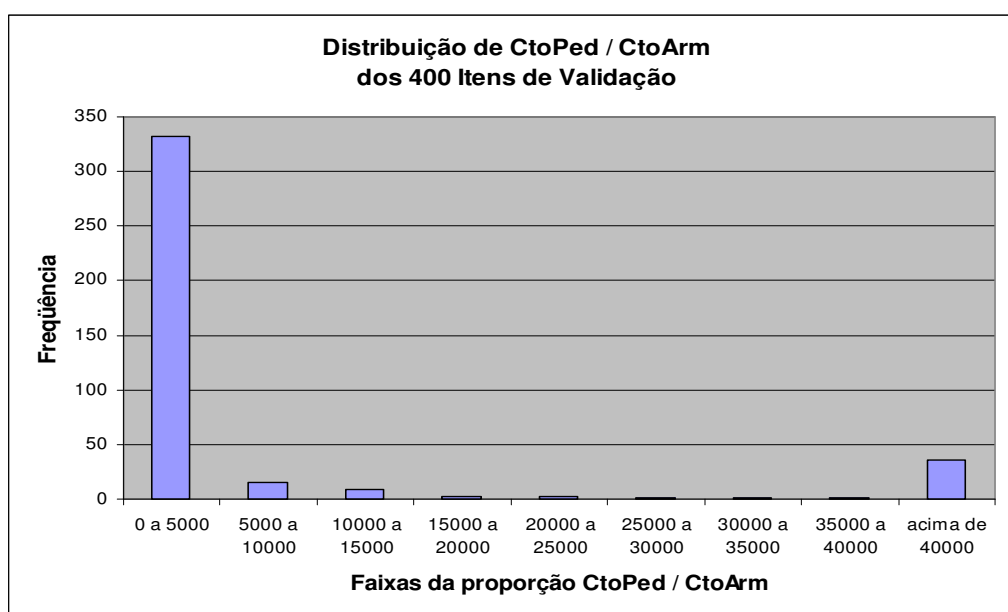


Figura 4.8 – Distribuição da proporção CtoPed/CtoArm dos 400 itens de validação

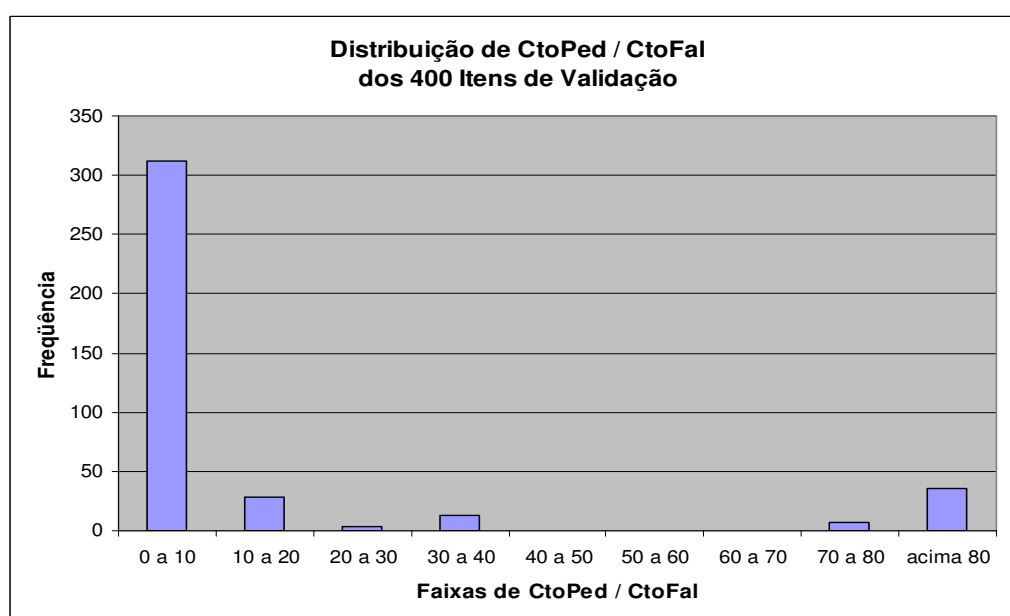


Figura 4.9 – Distribuição da proporção CtoPed/CtoFal dos 400 itens de validação

5 RESULTADOS

Um total de 54 relatórios de saída foram gerados pelas 3 replicações submetidas aos 18 Vetores de Custos e Tempo de Espera. Devido à grande quantidade de dados envolvida, alguns aspectos dos resultados foram resumidos em gráficos para facilitar as análises.

Inicialmente, calculou-se, em termos percentuais, quanto o Custo de Operação dos modelos classificados do 2º ao 7º lugares é maior que o Custo de Operação do 1º classificado (o de menor custo) como segue:

$$\text{Aumento do CusOper}_{\text{enésimo lugar}} = \frac{\text{CusOper}_{\text{enésimo.lugar}} - \text{CusOper}_{1^{\circ}.\text{lugar}}}{\text{CusOper}_{1^{\circ}.\text{lugar}}}$$

Estes percentuais medem a melhoria obtida, para cada item, pela adoção do modelo de estoque classificado em primeiro lugar em relação aos demais modelos. A figura 5.1 apresenta as freqüências obtidas para todos os 3240 resultados de cada comparação (18 vetores aplicados às 3 replicações de 60 itens cada).

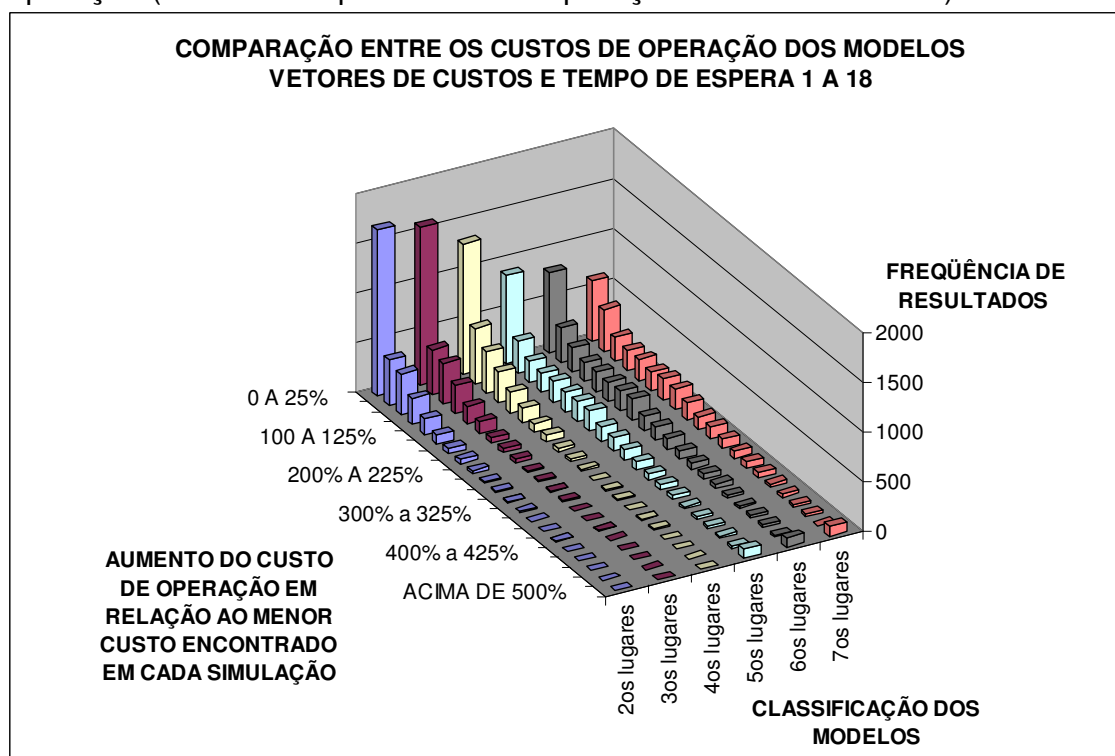


Figura 5.1 – Histogramas das diferenças entre os Custos de Operação resultantes de todos os vetores.

Nota-se que as diferenças de desempenho dos modelos pode ultrapassar 5 vezes o menor Custo de Operação encontrado para cada item, mostrando a importância da escolha do modelo de estoque para cada ambiente. Nota-se, também, que a maior parte das diferenças entre os desempenhos está na faixa entre 0 e 25%, podendo existir diferenças não significativas entre os modelos.

A figura 5.2 detalha esta faixa do gráfico anterior.

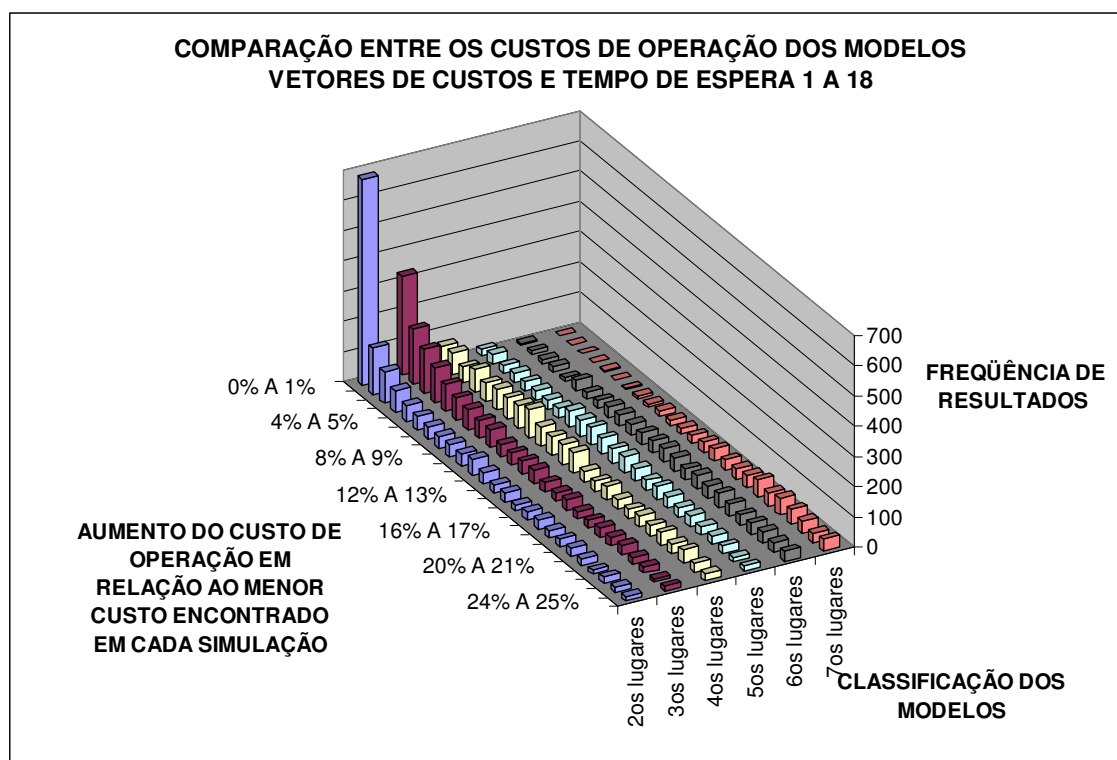


Figura 5.2 – Histogramas das diferenças entre os Custos de Operação resultantes dos vetores 1 a 9 na faixa de 0 a 25%.

Como esperado, as diferenças entre o 1º. e 4º., 5º., 6º. e 7º. colocados se distribuem em percentuais maiores que as diferenças entre o 1º. e 2º. colocados e entre o 1º. e 3º. colocados, que possuem grande quantidade de itens com diferenças abaixo de 1%.

Para verificar a significância destas diferenças, foram efetuados testes de hipóteses para cada diferença entre os 1º. e 2º. colocados de cada item, em cada vetor testado: Supondo-se que a diferença entre eles seja significativa, as demais, relativas aos 3º., 4º., 5º., 6º. e 7º. também o serão. O teste supõe que são comparadas 2 médias de populações distintas;

- população dos Custos de Operação do modelo classificado em 1º. lugar, com 3 amostras de valores, provenientes de cada uma das replicações, e
- população dos Custos de Operação do modelo classificado em 2º. lugar, com 3 amostras, também provenientes das replicações.

Utilizando o teste proposto por Costa Neto (1977) para comparação de duas médias com dados emparelhados, temos as hipóteses

H_0 : a média das diferenças do Custo de Operação dos modelos é nula, e

H_1 : a média das diferenças dos Custos de Operação dos modelos é maior que zero.

O procedimento utilizado está resumido como segue:

- Identifica-se quais modelos foram classificados em 1º. e 2º. lugares na simulação do item de uma das replicações, e calcula-se a diferença entre seus Custos de Operação;
- Calculam-se as diferenças entre os mesmos modelos, independente das suas classificações, no mesmo item nas outras duas replicações;
- Calculam-se a média \bar{d} e desvio padrão s_d das 3 diferenças;
- Calcula-se o valor da distribuição t de Student para 2 graus de liberdade (n-1 graus) pela fórmula

$$t = \frac{\bar{d} - \Delta}{s_d / \sqrt{n}}$$

onde Δ é igual a zero e n igual a 3.

- Calcula-se o valor da probabilidade associada ao valor de t calculado, utilizando-se a função TDIST da planilha Excel.

Este procedimento, repetido para todos os itens em todas as replicações gerou 3240 valores de probabilidade (60 itens de 3 replicações em 18 vetores), que podem ser entendidos como a confiança de que a diferença entre os Custos de Operação dos modelos é significativa. Estes valores geraram os histogramas das figuras 5.3 e 5.4, para TEsp igual a 1 e 3, respectivamente.

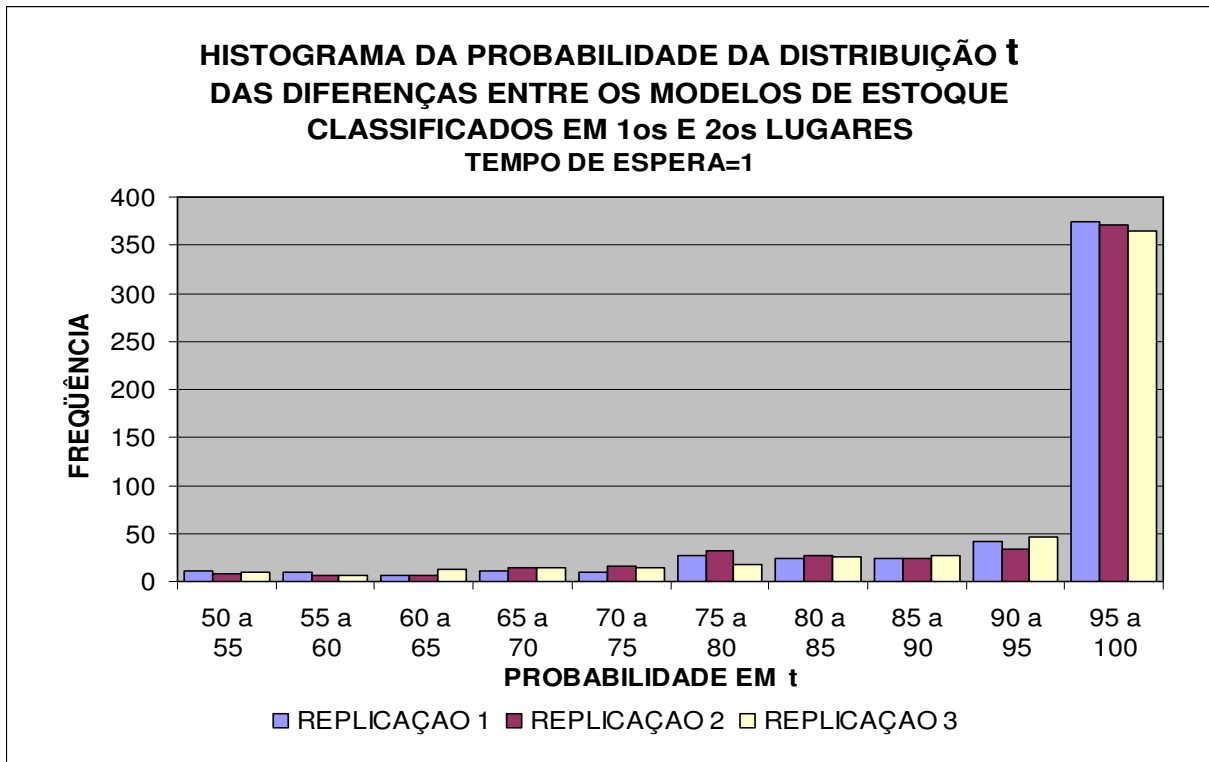


Figura 5.3 – Distribuição do grau de confiança das diferenças entre os modelos de estoque classificados em 1º. e 2º.lugares nos vetores 1 a 9.

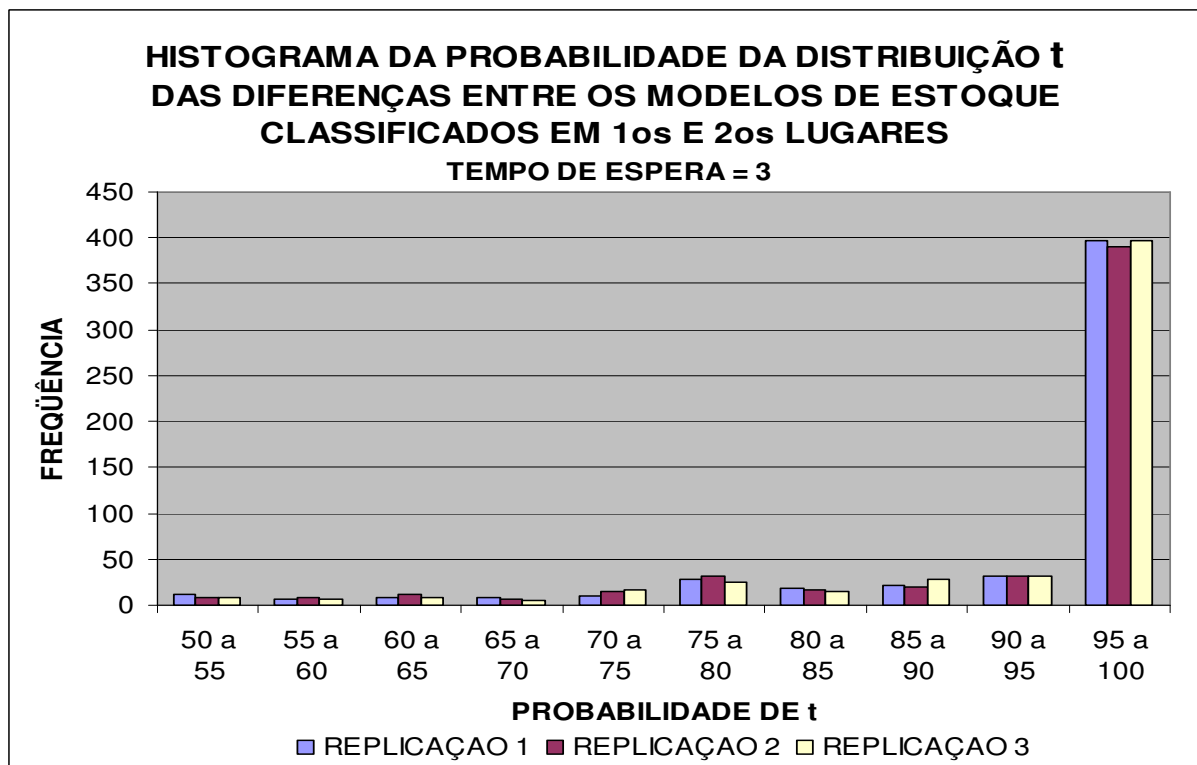


Figura 5.4 – Distribuição do grau de confiança das diferenças entre os modelos de estoque classificados em 1º. e 2º.lugares nos vetores 10 a 18.

Os gráficos mostram que a maior parte das diferenças são significativas (H_0 seria rejeitada) com 95% de confiança, havendo, contudo, 945 dentre os 3240 resultados somente significativos em níveis mais baixos de confiança.

As figuras 5.5 e 5.6 apresentam como essa baixa confiança se distribui entre os itens. Pode-se notar que os itens 1 a 10 apresentam diferenças com nível de confiança baixo em praticamente todos os vetores e replicações. Pela tabela 4.2, nota-se como característica comum a estes itens a ausência de sazonalidade com tendência nula, típicas das demandas estacionárias.

Já os vetores 7, 8, 9, 16, 17 e 18 apresentam a maior parte dos itens com as diferenças entre os 2 primeiros colocados em níveis de confiança abaixo de 95%. A proporção CtoPed/CtoArm em seu valor máximo 600 é a principal característica comum a estes vetores, como mostra a tabela 4.5.

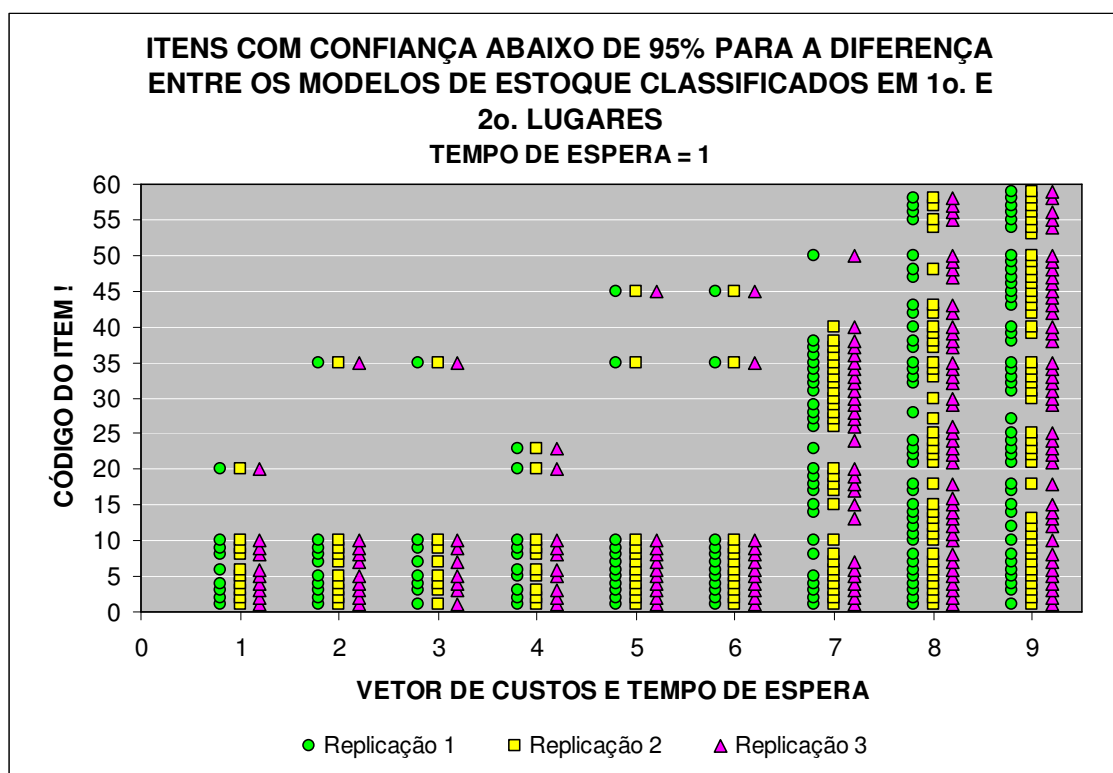


Figura 5.5 - Itens com nível de confiança abaixo de 95% nas diferenças entre os Custos de Operação dos 1º. e 2º. lugares nos vetores 1 a 9.

Um maior equilíbrio entre o desempenho dos modelos era esperado nos casos de demanda estacionária sem sazonalidade, que é o caso dos itens 1 a 10. Não possuindo o componente de tendência, a variação da demanda é toda devida ao componente irregular, que não pode ser previsto. O modelo CALNEC perde,

assim, a maior parte de sua vantagem em relação aos reativos contínuos, gerando pequenas diferenças de desempenho.

O caso dos vetores 7, 8, 9, 16, 17 e 18, por outro lado, pode ser entendido como consequência do desequilíbrio da proporção CtoPed/CtoArm. Torna-se tão caro o ato de compra que os modelos se igualam no número de compras efetuadas e se estocam muito e de forma aproximadamente igual. O relativamente baixo Custo de Falta não valoriza muito os modelos de melhores níveis de atendimento, mostrando diferença pequena entre os modelos mais bem classificados.

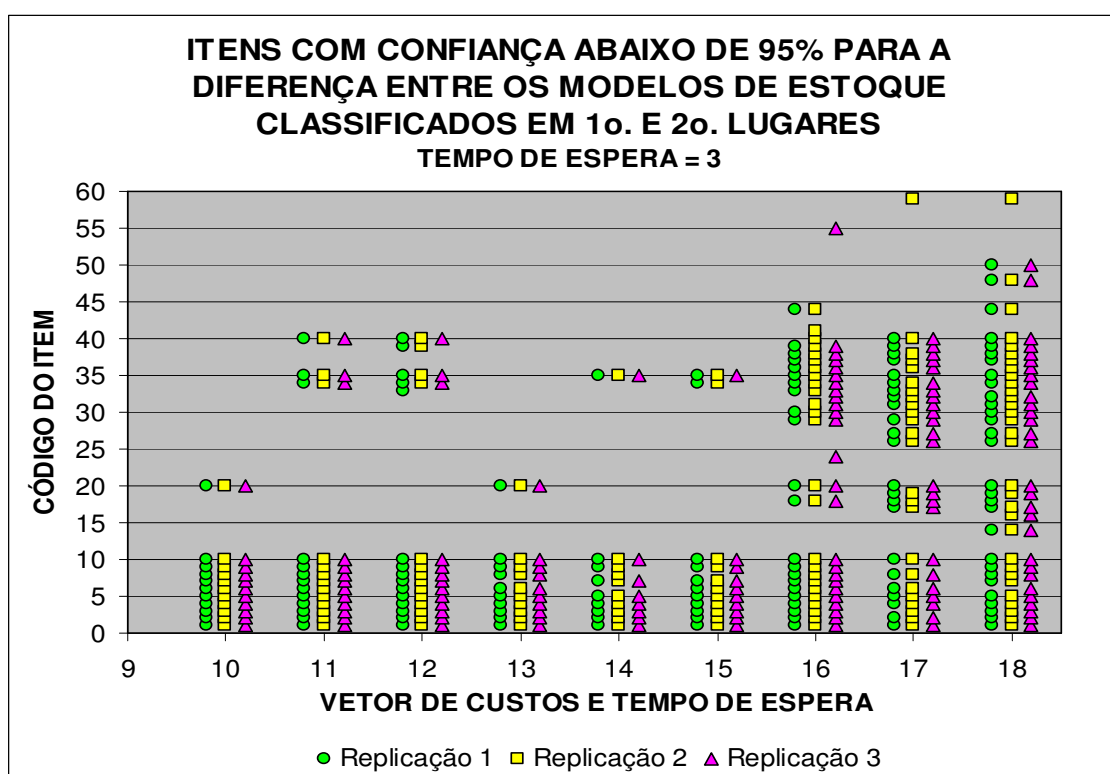


Figura 5.6 – Itens com nível de confiança abaixo de 95% nas diferenças entre os Custos de Operação dos 1º. e 2º. lugares nos vetores 10 a 18.

De qualquer forma, os itens com confiança menor que 95% são, em sua maioria, aqueles onde o modelo CALNEC não estava entre as 2 primeiras colocações. Uma comparação entre as figuras 5.7 e 5.8 procura mostrar este fato.

O gráfico 5.7 apresenta o percentual dos itens em que cada modelo de estoque foi o de menor Custo de Operação, classificando-se em primeiro lugar, sem a exclusão dos itens de Menor confiança. O modelo de Cálculo de Necessidades, por exemplo, foi o 1º em 172 dos 180 itens no processamento do vetor 1, resultando na porcentagem $172/180 = 95,556\%$ apresentada no gráfico

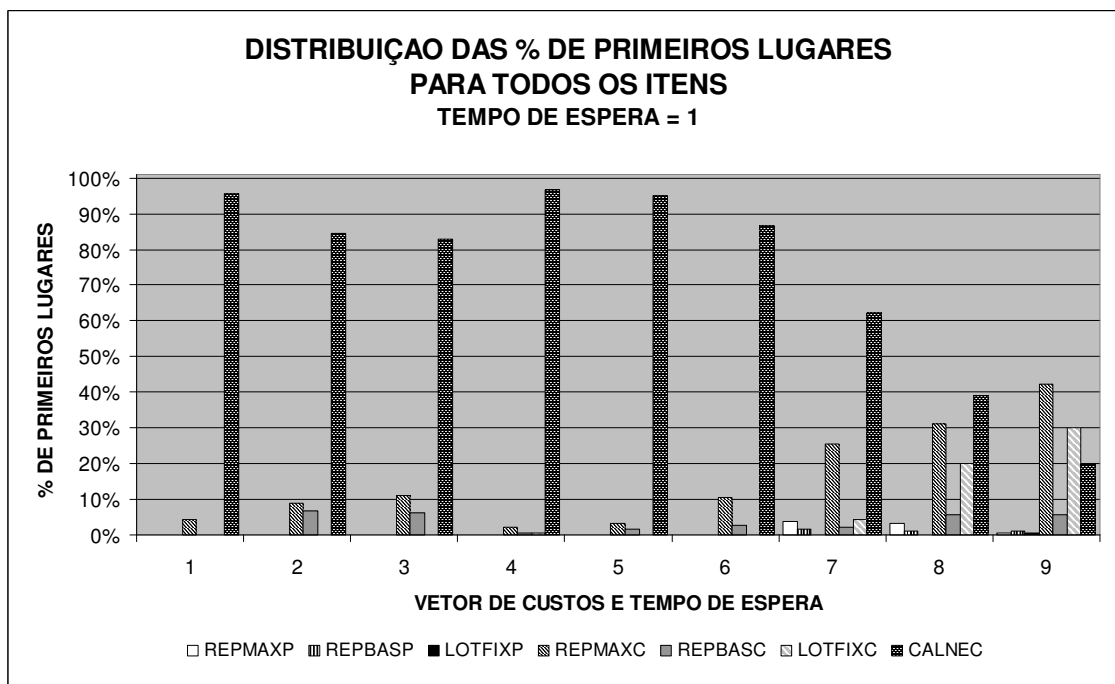


Figura 5.7 – Distribuição dos 1^{os} lugares entre os modelos de estoque para os Vetores de Custo e TEsp 1 a 9 para todos os itens.

Pode-se observar a supremacia do modelo de Cálculo de Necessidades em todos os ambientes, exceto no vetor 9, onde este modelo é superado pelos modelos reativos de Reposição do Máximo Contínuo e de Lote Fixo Contínuo. É notável o declínio mais acentuado da porcentagem do CALNEC nos vetores 7, 8 e 9.

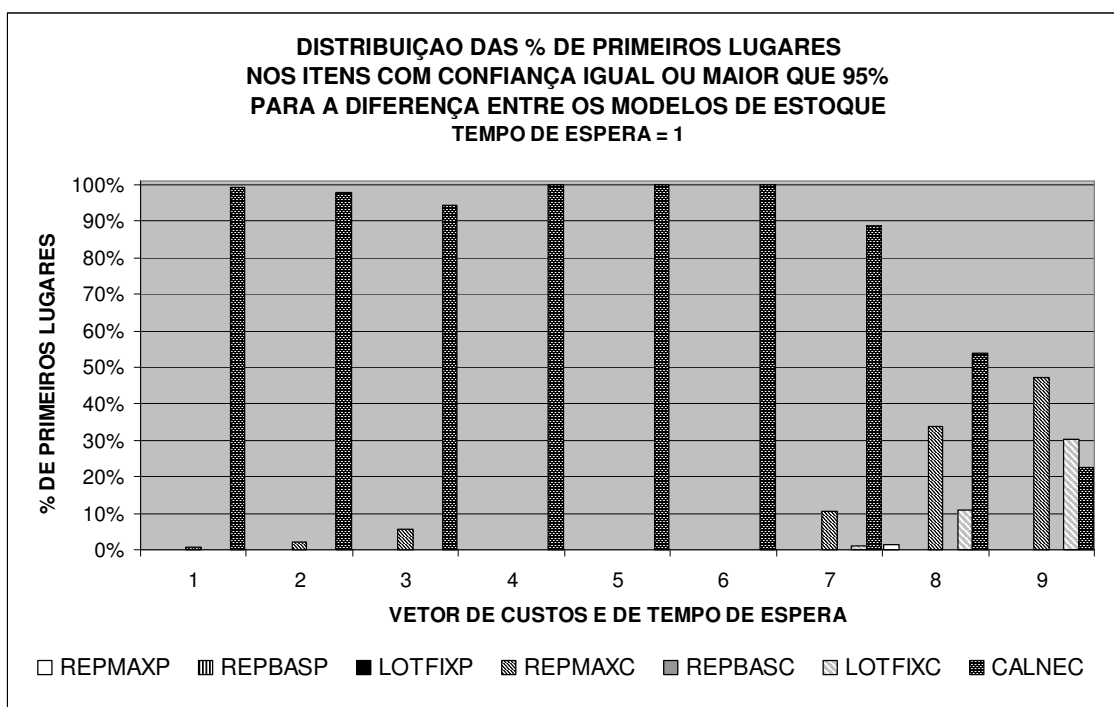


Figura 5.8 – Distribuição dos 1^{os} lugares entre os modelos de estoque nos Vetores de Custo e TEsp 1 a 9 dos itens com confiança igual ou maior que 95%.

A vantagem do modelo CALNEC aumenta com a retirada dos itens de menor confiança. a figura 5.8 mostra uma melhoria nas porcentagens deste modelo em todos os vetores, mantendo, contudo, a supremacia dos modelos reativos no vetor 9.

Resultado semelhante ocorre para os vetores 10 a 18, correspondentes ao Tempo de Espera de 3 períodos, como mostram as figuras 5.9 e 5.10.

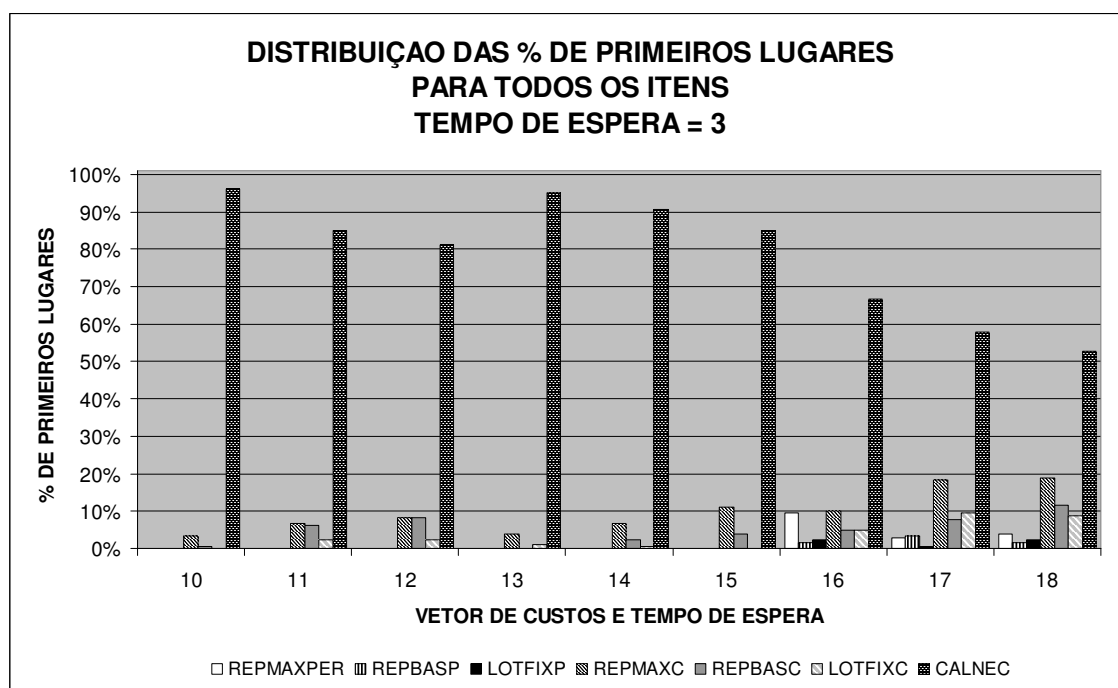


Figura 5.9 – Distribuição dos 1^{os} lugares entre os modelos de estoque para os Vetores de Custo e TEsp 10 a 18 para todos os itens

Embora não seja superado por nenhum outro modelo em todos os vetores, o CALNEC apresenta um declínio maior nos vetores 16, 17 e 18. Quando são retirados os itens com menor confiança, os percentuais do CALNEC aumentam também em todos os vetores enquanto os referentes aos modelos reativos diminuem.

Os gráficos permitem, também, verificar a baixa competitividade dos modelos periódicos. Eles conseguem alguns primeiros lugares nos vetores de proporção CtoPed/CtoArm alta, pois sua periodicidade implica diretamente em menor quantidade de aquisições. Mas a vantagem não é grande o bastante para garantir a confiança de 95%, sendo praticamente eliminados nos gráficos 5.8 e 5.10.

Além do modelo ativo CALNEC, os modelos Contínuo Reposição do Máximo e Contínuo de Lote Fixo se destacam nos primeiros lugares, mostrando uma boa

competitividade dentre os modelos reativos. Estes três modelos são analisados em maior detalhe nos gráficos 5.11 e 5.12.

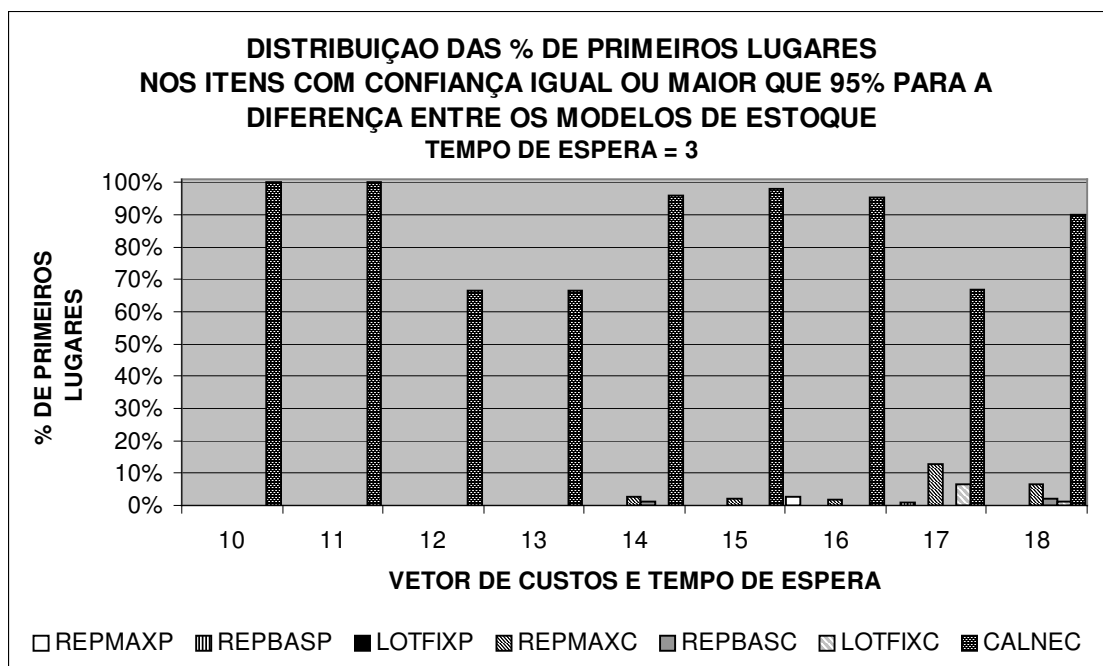


Figura 5.10 – Distribuição dos 1^{os} lugares entre os modelos de estoque para Vetores de Custo e TEsp 10 a 18 para itens de confiança igual ou maior que 95%.

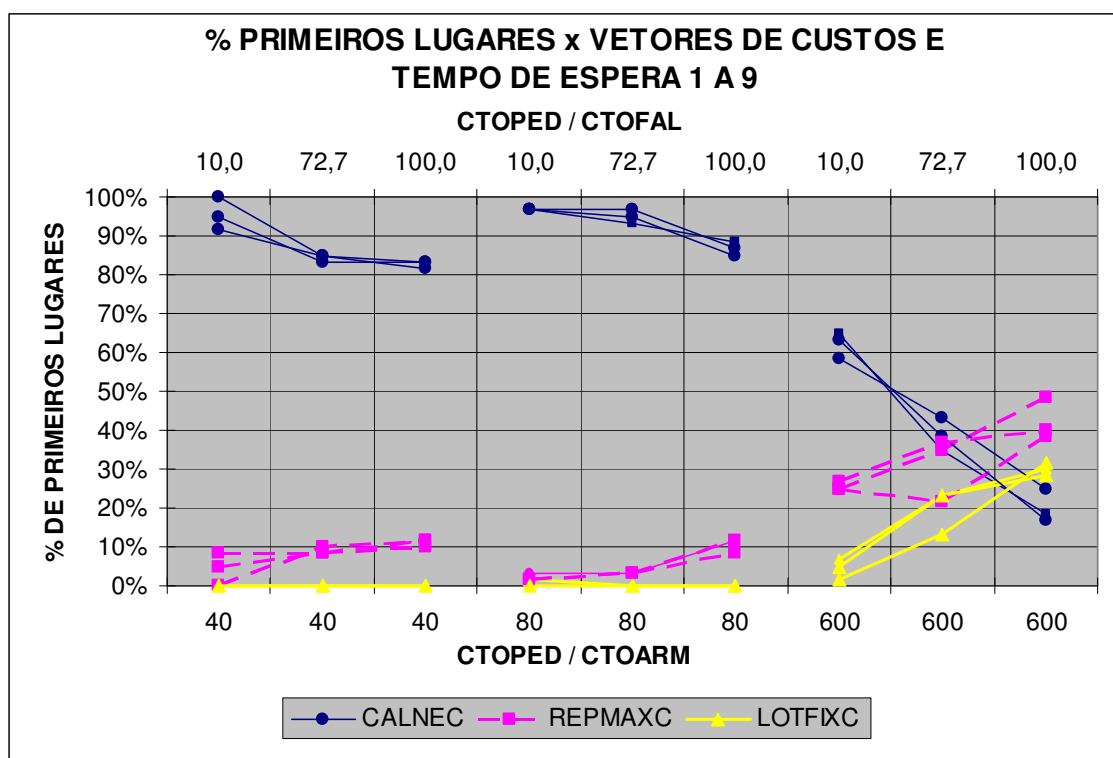


Figura 5.11 – Gráfico do desempenho dos modelos de estoque versus as proporções CtoPed/CtoArm e CtoPed/CtoFal para os vetores 1 a 9

As porcentagens de primeiros lugares destes três modelos estão agora plotadas contra as proporções CtoPed/CtoArm (eixo horizontal inferior) e CtoPed/CtoFal (eixo horizontal superior) para cada uma das três replicações.

É fácil notar na primeira figura que, para os dois primeiros níveis de CtoPed/CtoArm, a competitividade entre os modelos se mantém em um mesmo patamar, caindo suavemente com o aumento da outra proporção. No último nível testado, os modelos reativos ganham competitividade e todos os três ficam mais sensíveis ao aumento da proporção CtoPed/CtoFal. No vetor 8, correspondente às proporções 600 e 72,7, existe um equilíbrio entre os modelos CALNEC e REPMAXC ao redor de 35%.

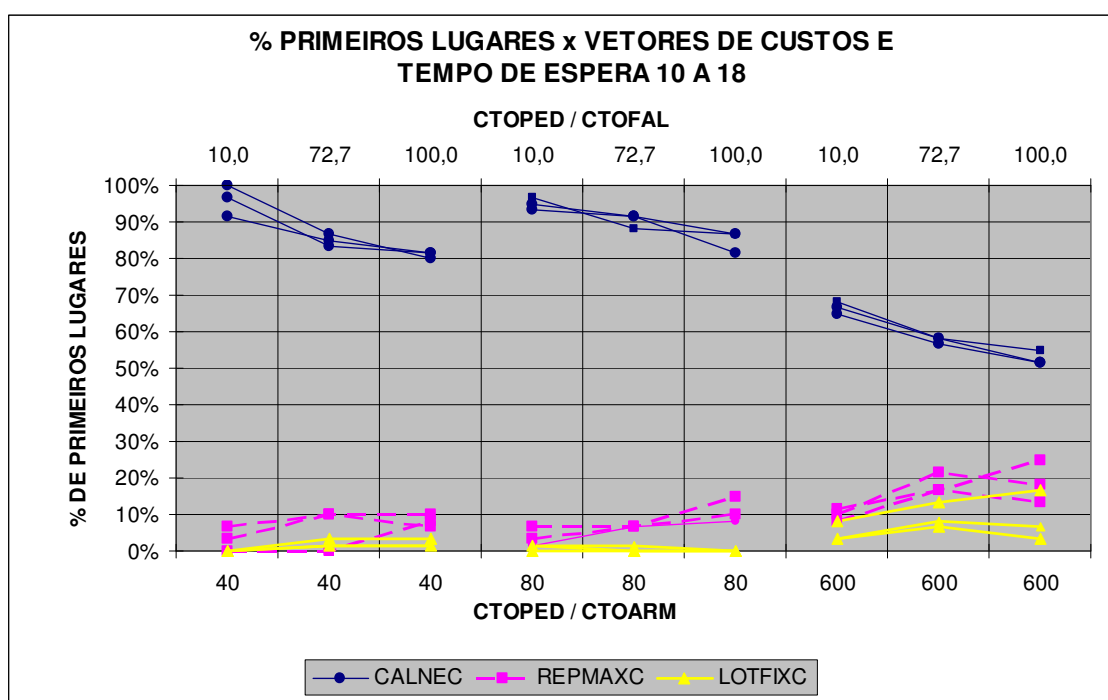


Figura 5.12 – Gráfico do desempenho dos modelos de estoque versus as proporções CtoPed/CtoArm e CtoPed/CtoFal para os vetores 10 a 18.

Esses efeitos também estão presentes nos vetores com Tempo de Espera igual a 3. Porém ocorrem de maneira mais suave, o modelo de CALNEC não sendo superado pelos outros dois. Aparentemente, proporções maiores são necessárias para se obter o equilíbrio entre os modelos de CALNEC e REPMAXC para Tempos de Espera maiores.

Como resultado geral, pode-se afirmar que o modelo de CALNEC mostra desempenho muito superior aos dos demais modelos em todos os ambientes, até

níveis altos da proporção CtoPed/CtoArm e CtoPed/CtoFal, ao redor de 600 e 72,7, respectivamente.

Resultados das simulações dos 400 itens de validação

Os gráficos das figuras 5.13 e 5.14 resumem os resultados obtidos com a simulação dos 400 itens reais.

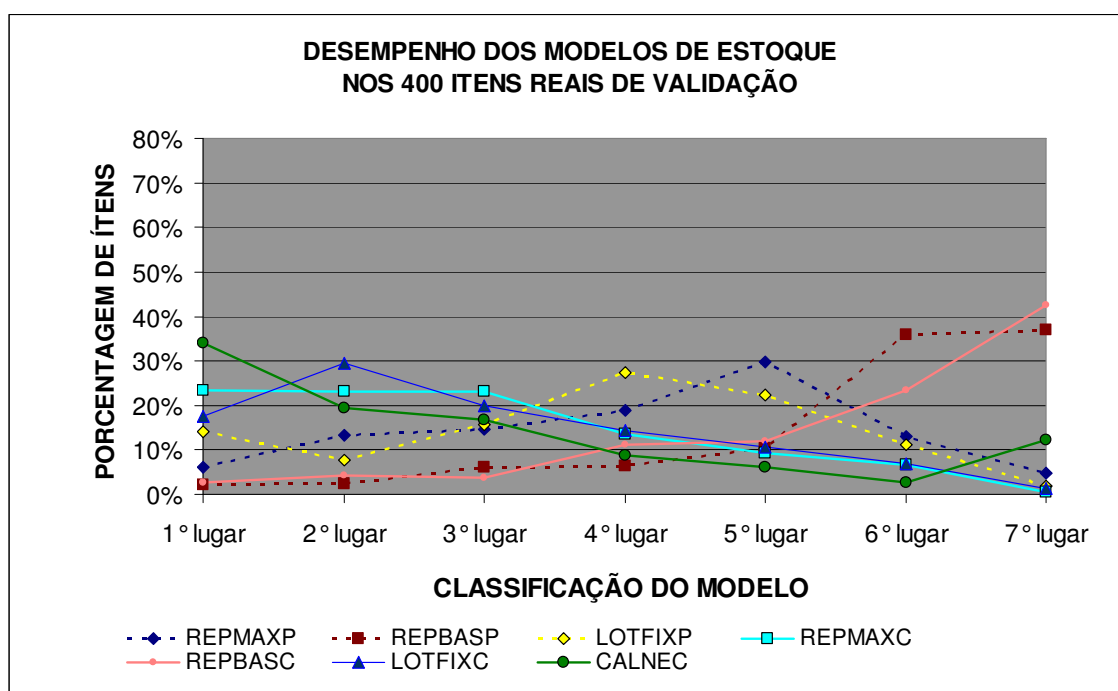


Figura 5.13 –Desempenho dos modelos de estoque nos 400 itens reais de validação

Pode-se observar um desempenho superior do modelo CALNEC, com 34% dos 1^{os}. lugares, seguido dos modelos REPMAXC e LOTFIXC, com 24% e 18%. O modelo Periódico de Lote Fixo, com 14% dos 1^{os}. lugares é o destaque dos resultados.

Como visto nas figuras 4.7 a 4.9, os 400 itens possuem valores dos parâmetros Tempo de Espera, Proporção CtoPed/CtoArm e CtoPed/CtoFal que estão fora das faixas testadas no experimento teórico. Os 400 itens foram, portanto, divididos em dois grupos para análise:

- 144 itens cujos parâmetros se encontram dentro das faixas testadas , cujos limites considerados são os valores dos parâmetros utilizados no vetor 18 (600, 100 e 3),;
- 256 itens cujos parâmetros se encontram fora das faixas testadas.

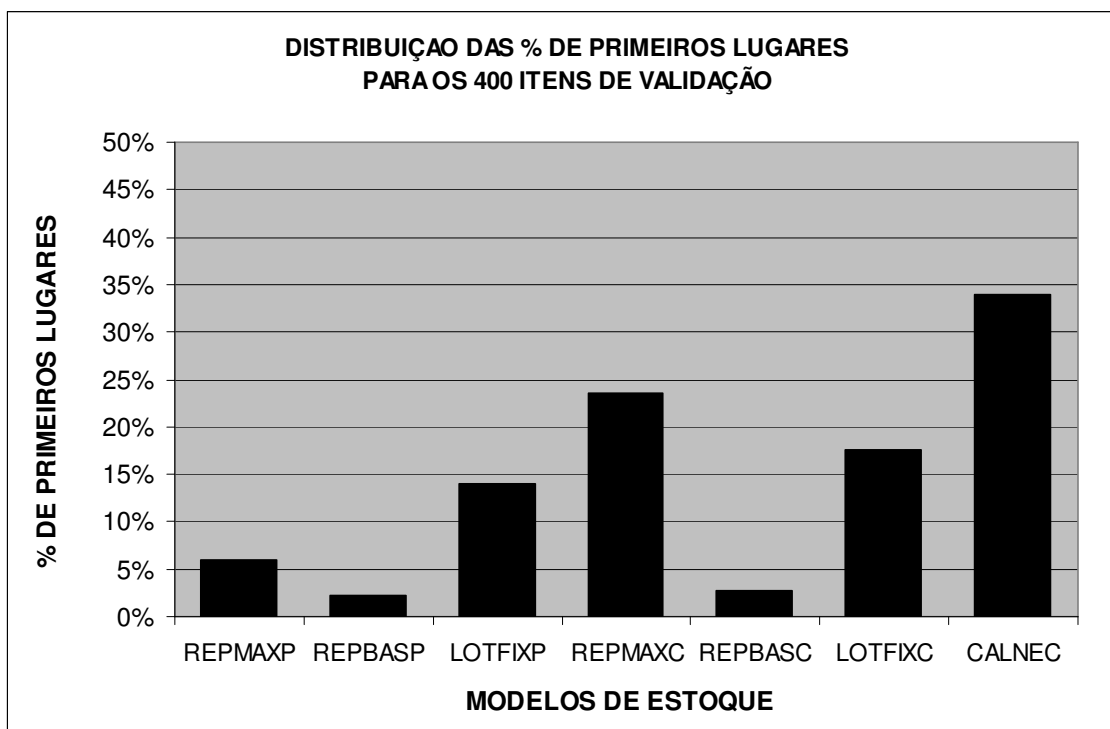


Figura 5.14 – Distribuição dos 1^{os}. lugares entre os modelos de estoque para os 400 ítems de validação.

A figura 5.15 mostra a distribuição dos 1^{os}. lugares entre os modelos para primeiro grupo. Pode-se ver um comportamento próximo ao apresentado pelos vetores 1 a 18 testados, onde o modelo CALNEC é o melhor desempenho geral, seguido pelos modelos contínuos REPMAXC e LOTFIXC. O modelo periódico LOTFIXP tem sua participação reduzida neste grupo, embora ela ainda seja maior que a observada no experimento teórico.

Já a figura 5.16 mostra uma participação maior de todos os modelo reativos nos 1^{os}. lugares, com o modelo periódico LOTFIXP chegando a superar o contínuo LOTFIXC, mantendo-se, contudo, abaixo do CALNEC.

As diferenças entre os Custos de Operação dos modelos se apresentam numa faixa geral menor que a do experimento teórico, não superando 278%. São, contudo, grandes o bastante para justificar a busca do modelo mais adequado de gestão para cada ítem. As figuras 5. 17 e 5.18 mostram o perfil de cada grupo. Por elas pode-se ver uma maior concentração das diferenças nas menores faixas, à semelhança do que ocorre no experimento teórico. Também é significativa a diferença entre os diferentes perfis dos dois grupos, detalhado nas figuras 5.19 e

5.20. Embora não se possa fazer um teste de hipóteses para estes resultados, a concentração das diferenças nas faixas menores para o grupo de 256 itens fora da faixa vai na mesma direção do ocorrido no experimento teórico para os vetores 7,8,9,16,17 e 18 onde as proporções são altas, onde as diferenças de desempenho entre os 1^{os}. e 2^{os}.lugares foram na maior parte de baixa confiança.

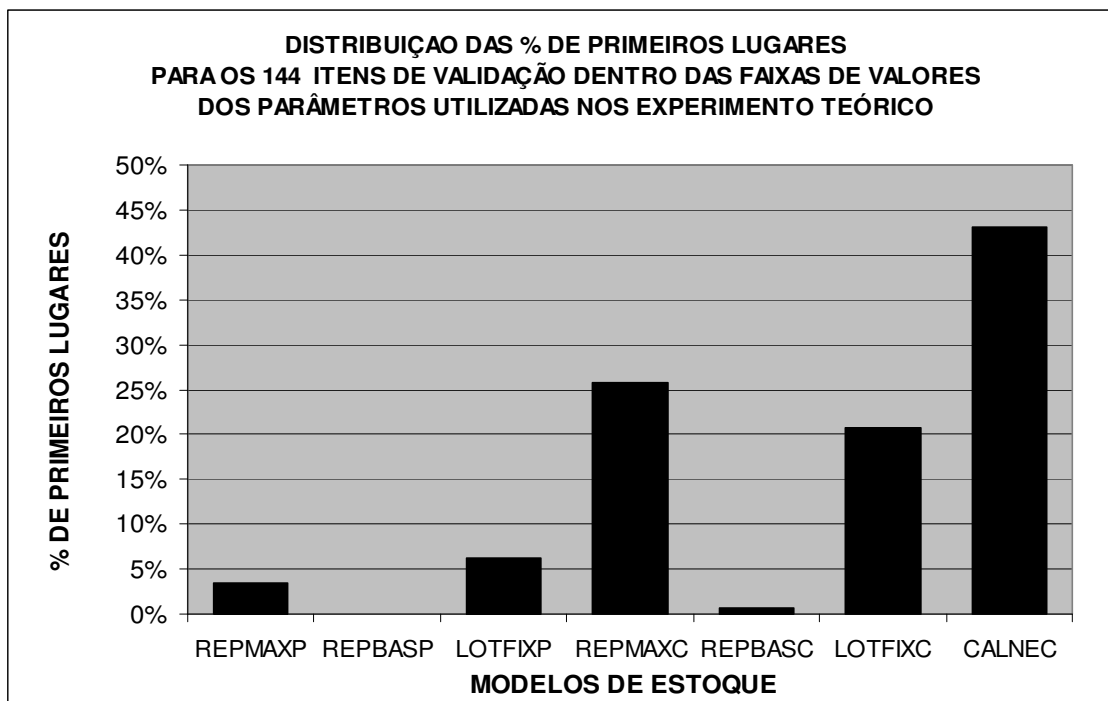


Figura 5.15 – Distribuição dos 1^{os}. lugares entre os modelos de estoque para os 144 itens de validação dentro das faixas utilizadas nos experimentos teóricos.

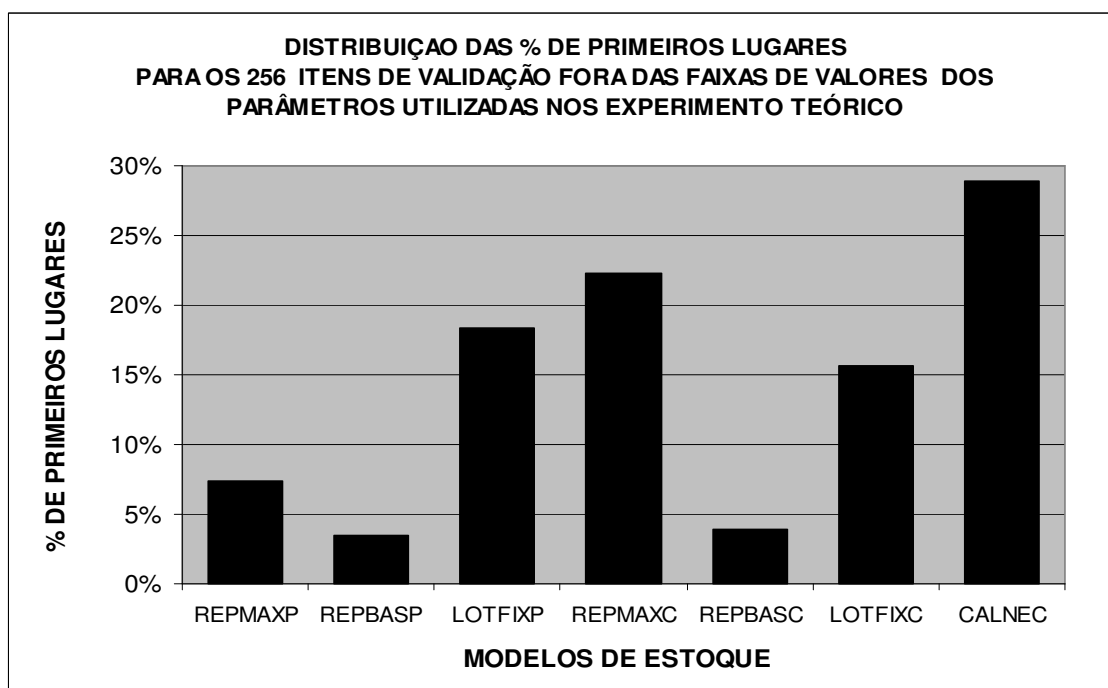


Figura 5.16 – Distribuição dos 1^{os}. lugares entre os modelos de estoque para os 256 itens de validação fora das faixas utilizadas nos experimentos teóricos.

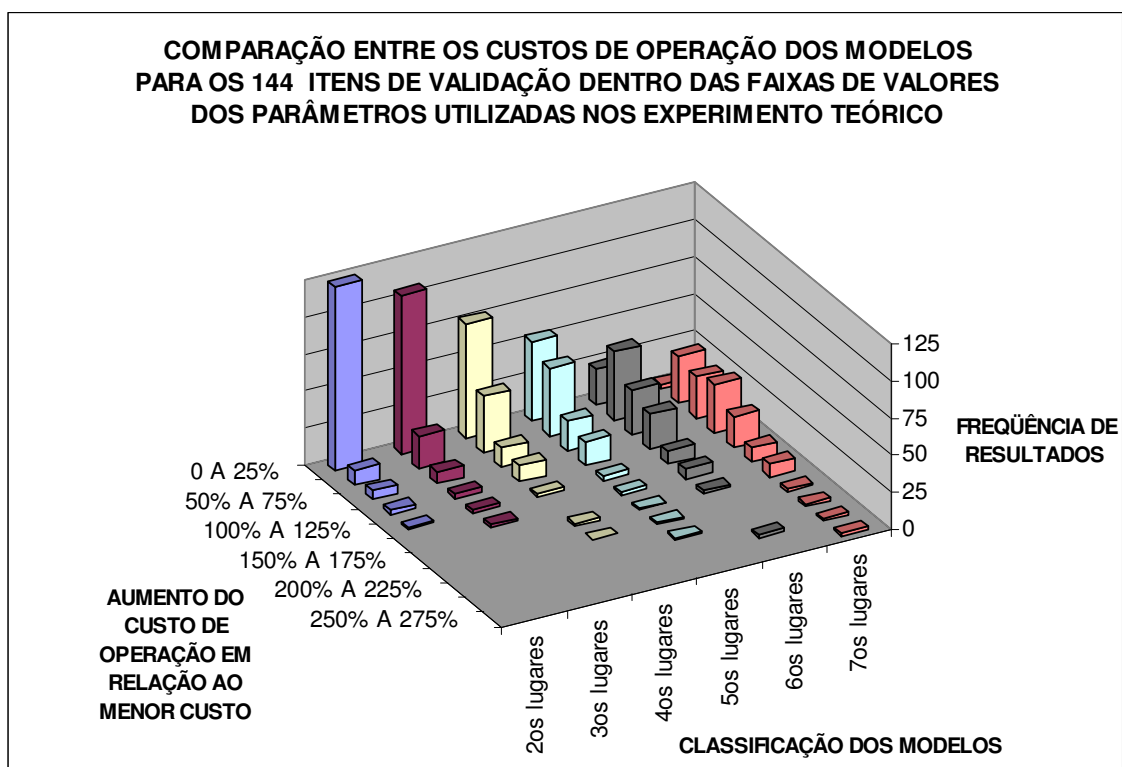


Figura 5.17 – Histogramas das diferenças entre os Custos de Operação para os 144 itens de validação dentro das faixas utilizadas nos experimentos teóricos.

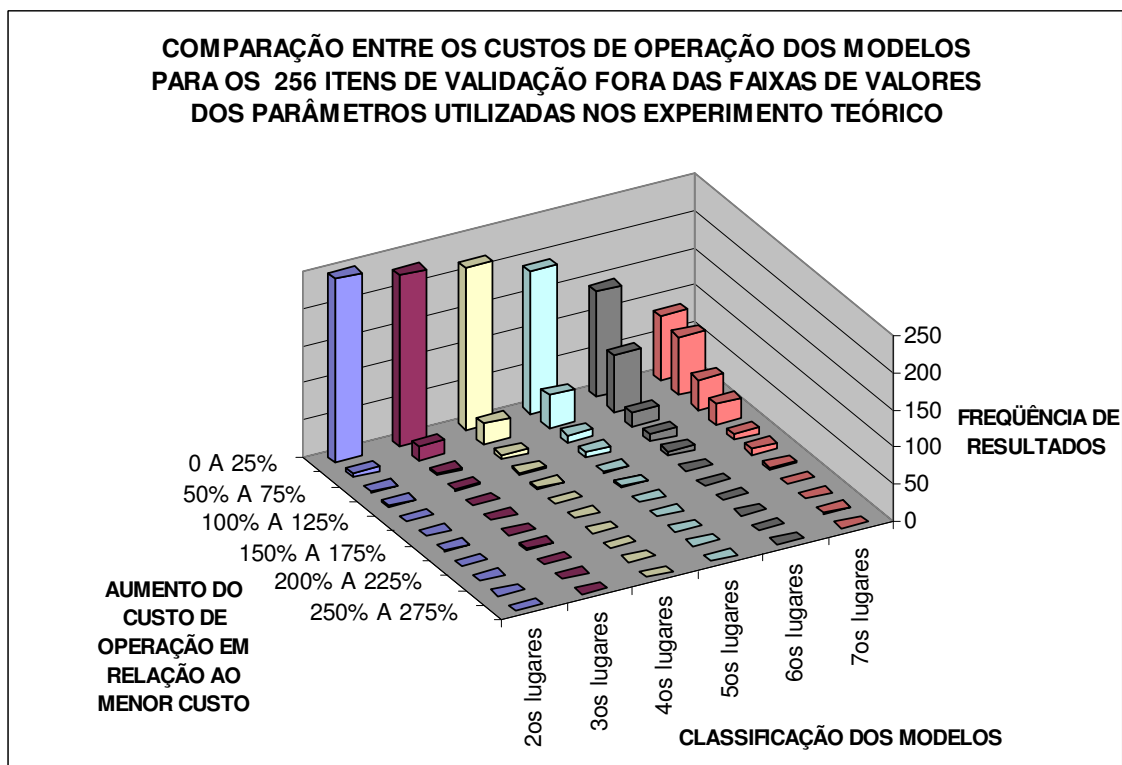


Figura 5.18 – Histogramas das diferenças entre os Custos de Operação para os 256 itens de validação fora das faixas utilizadas nos experimentos teóricos.

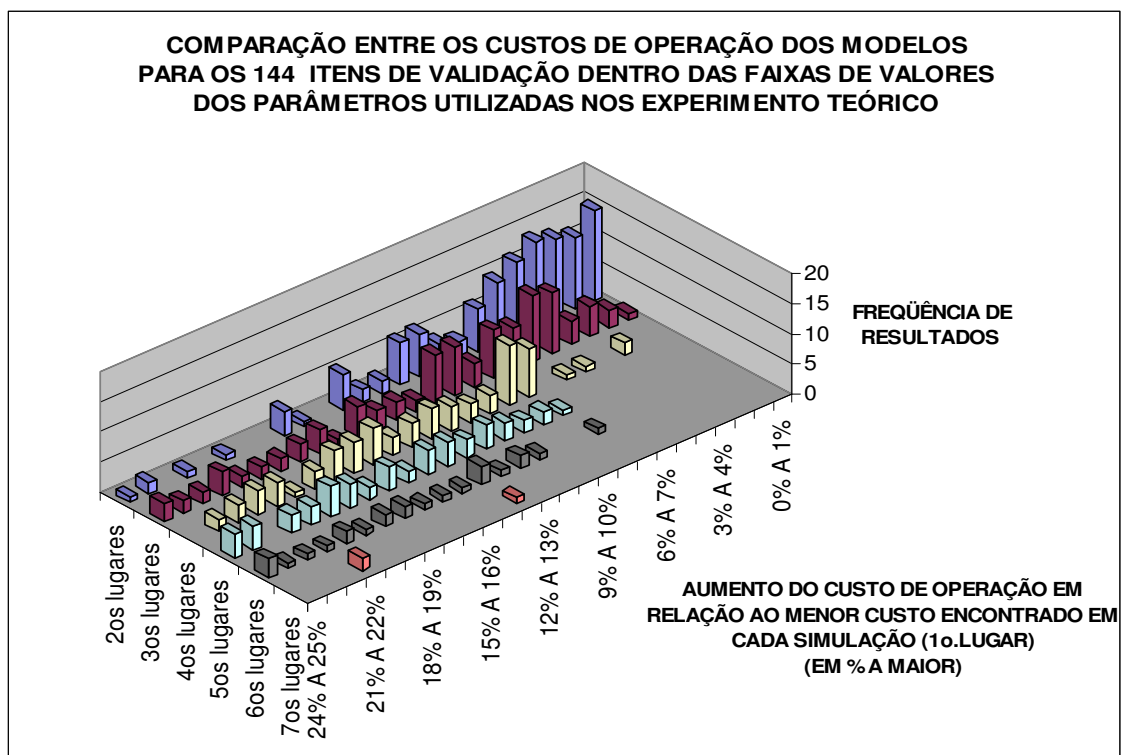


Figura 5.19 – Detalhamento da faixa de 0 - 25% das diferenças entre Custos de Operação dos 144 itens de validação dentro das faixas utilizadas no experimento teórico.

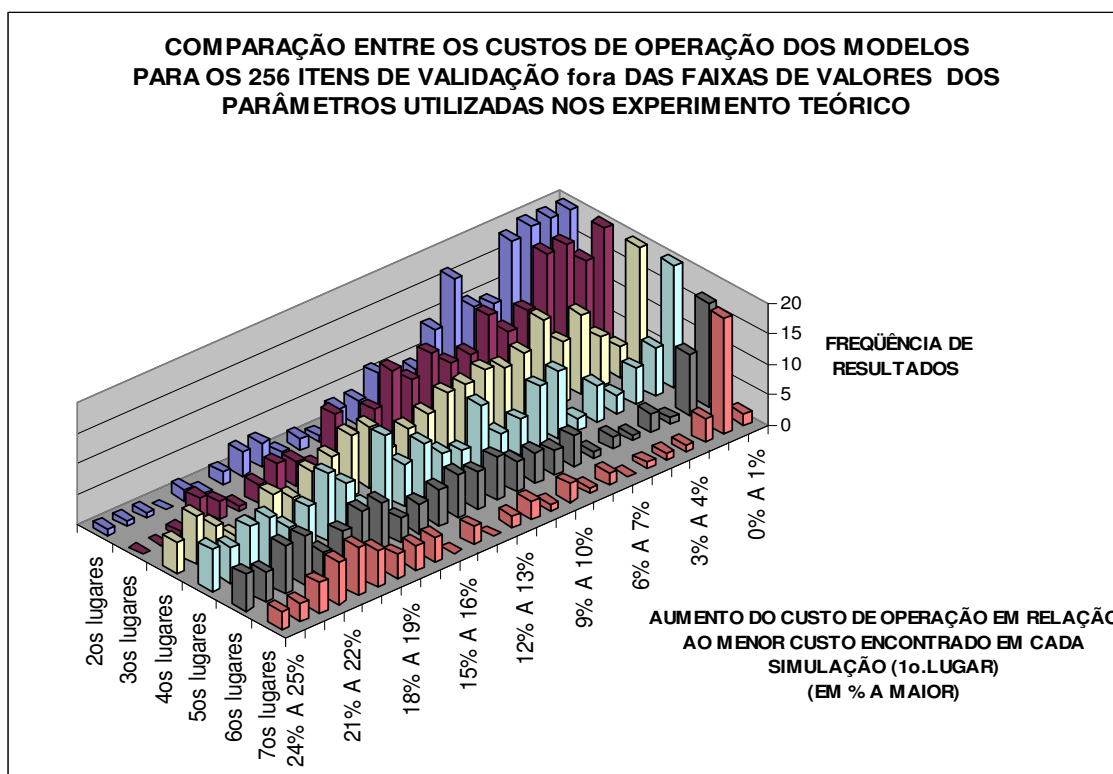


Figura 5.20 – Detalhamento da faixa de 0 - 25% das diferenças entre Custos de Operação dos 144 itens de validação fora das faixas utilizadas no experimento teórico.

Pode-se afirmar, portanto, que os resultados dos 400 ítems reais utilizados para a validação não contrariam as observações obtidas no experimento teórico, mostrando coerência com elas.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho se propôs a comparar modelos de estoque ativos e reativos numa grande variedade de ambientes de sistema, procurando determinar os mais robustos. Os resultados obtidos através da simulação, e não invalidados por dados reais, permitem algumas conclusões importantes.

A hipótese testada, apresentada em 4.6, mostrou-se verdadeira. O modelo de estoque Cálculo de Necessidades com Necessidade Líquida Mínima foi, como demonstram os resultados dos Custos de Operação, mais eficiente que os modelos reativos em todos os ambientes exceto em um deles, já nos limites das faixas testadas. Sua eficiência relativa, medida pelo número de 1^{os}. lugares obtidos, também mostrou-se crescente com o aumento dos Tempos de Espera.

Complementando esta conclusão geral, pode-se, ainda, efetuar uma série de afirmativas mais específicas:

- **O modelo proposto por Santoro (2006) de Cálculo de Necessidades com Necessidades Líquidas Mínima é superior em desempenho de custos aos modelos reativos testados para os ambientes onde as proporções CtoPed/CtoArm e CtoPed/CtoFal não são muito altas.** Embora o experimento não tenha determinado valores limite precisos para estas proporções aplicáveis a todos os casos, a ordem de grandeza de 600 e 100, respectivamente, para CtoPed/CtoArm e CtoPed/CtoFal servem de referência para a prevalência do CALNEC. Quando a seleção dos modelos não puder ser feita a cada decisão de abastecimento, condição ideal sugerida por Santoro(2006), o uso do modelo CALNEC é recomendável para os ambientes onde as proporções estejam abaixo desses valores.
- **O perfil da demanda influi fortemente no desempenho relativo dos modelos de estoque** - os modelos tem desempenhos que podem ser muito diferentes para uma mesma série de demanda. Embora os modelos de menor custo possam ter diferenças insignificantes de desempenho, suas diferenças para os de pior desempenho podem ser significativas,

justificando o conhecimento detalhado da demanda na seleção e operação dos modelos de estoque.

- **Proporções altas de CtoPed/CtoArm e CtoPed/CtoFal influem fortemente no desempenho relativo dos modelos** – Esta influência é causada principalmente pelo grande valor relativo do Custo de Pedido. Os valores altos das proporções reduzem as diferenças de desempenho entre os modelos, nivelando-os e reduzindo suas confianças estatísticas.
- **O modelo Contínuo de Reposição do Máximo é o mais robusto dentre os modelos reativos** – por ser o mais flexível de todos os modelos reativos, a ponto dos demais poderem ser considerados casos especiais dele, o bom desempenho deste modelo era esperado, embora sua robustez tenha superado as expectativas. Em conjunto com o CALNEC, forma o par que tem o desempenho mais robusto em todos os ambientes testados, complementando, dessa forma uma recomendação forte para a configuração de sistemas onde a seleção dos modelos possui poucos dados para decisão. É interessante salientar que seu bom desempenho foi suportado por cálculo razoavelmente sofisticado dos seus parâmetros.
- **Os modelos periódico e contínuo de Reposição da Base são os menos robustos dentre os testados** – como os resultados indicam em todos os ambientes testados, estes modelos reativos poucas vezes superaram os demais. Mesmo nestes casos, a diferença dele para o segundo melhor é pouco significativa. Estes resultados, que incluem os dados reais da validação, se contrapõem à forte recomendação de uso do modelo Kanban, neles baseado, reforçando observação de Santoro (2006, pg 86) e sugerindo que o impacto do Custo de Pedido não tem sido devidamente analisado nas recomendações do modelo Kanban.

Devido à grande quantidade de dados gerados pela pesquisa, as conclusões apresentadas não esgotam o universo de contribuições possíveis. Elas, contudo, resumem o que de mais significativo foi obtido.

6.1 Próximos passos

Durante o desenvolvimento deste trabalho, várias questões surgiram e outras já existentes ganharam importância. Futuras pesquisas podem ser desenvolvidas a partir delas e dos resultados aqui obtidos.

Nova pesquisa exploratória pode ser feita explorando os limites encontrados para as proporções CtoPed/CtoArm e CtoPed/CtoFal, na tentativa de se chegar a valores precisos, associados à maior eficiência dos modelos CALNEC e REPMAXC. Caso possam ser definidos, tais limites seriam de grande ajuda para os responsáveis pela seleção de modelos de estoque.

Pesquisa semelhante pode também ser realizada, abrangendo a variação dos componentes irregular, de tendência, de sazonalidade e de ciclicidade numa mesma série, já que, neste trabalho, tais componentes se mantiveram constantes em cada uma delas. A rapidez de reação e reajustamento de cada modelo poderiam, dessa forma, ser incluídos na comparação.

Finalmente, uma nova comparação entre modelos ativos e reativos, estes últimos com seus parâmetros reajustados por previsões de demanda, se torna uma seqüência desejável deste trabalho. Este tipo de ajuste dos modelos reativos tem sido o rumo indicado por diversos artigos da literatura para a melhoria de seus desempenhos. Com a competitividade do modelo CALNEC provada em relação à forma clássica dos modelos reativos, seria bastante interessante a comparação entre os mesmos modelos, agora com os reativos ajustados pelo mesmo tipo de informação futura disponível para o modelo ativo, permitindo uma avaliação mais pura das regras de decisão.

Como de hábito em pesquisas de qualquer natureza, este trabalho se encerra gerando mais questões que respostas. Mas estas questões talvez sejam sua maior contribuição ao conhecimento, se estimularem a curiosidade e a manifestação dos espíritos críticos de seus leitores.

REFERÊNCIAS

- AGGARWAL, S.C. A review of Current Inventory Theory and its Applications. **International Journal of Operations Research**, 1974, v.12, p.443-482.
- ARMSTRONG, J.S. Research on forecasting: a quarter-century review, 1960-1984. **Interfaces**, Jan./Fev. 1986, v. 16, p.52 – 66,.
- BALLOU, R.H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos**: planejamento, organização e logística empresarial. 4^a.ed. Porto Alegre: Bookman. 2001, 532 p.
- BENZOATE, I.; GOLDSTEIN, D.K.; MEAD, M. The case research strategy in studies of information systems. **MIS Quarterly**, Sept. 1987. p.369 - 386.
- BERTRAND, J.W.M.; FRANSOO, J.C. Operations Management Research Methodologies Using Quantitative Modeling, **International Journal of Operations & Production Management**, v.22, N^o2, 2002. pp241-264.
- BIAZZI, J. L. **Administração de Materiais I** Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo EAD 463, Agosto 2002.
- BROWN, R.G. **Statistical Forecasting for Inventory Control**. New York: McGraw-Hill, 1959.
- BROWNE, S.; ZIPKIN P. Inventory models with continuous, stochastic demands. **The Annals of Applied Probability**, v.1, 1991.p.419-435.
- CHWIF, L; MEDINA A.C. **Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria e aplicações**. São Paulo: Editora Bravarte, 2006
- COSTA NETO, P. L. O. **Estatística**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.
- ELSAYED, E.A. **Analysis and control of production systems**. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1985.
- EILON, S.; ELMALEH, J. Adaptive Limits in Inventory Control. **Management Science**, v.16, n.8, 1970. p.533-548.
- FILDES, R. AND BEARD, C., Forecasting Systems for Production and Inventory Control. **International Journal of Operation & Production Management**, Vol.12, No.4, 1992. p. 4-27.
- GARDNER JR, E. S.; MCKENZIE. E. Forecasting Trends in Time Series, **Management Sci.**, v.31, Oct. 1985. p. 1237-1246.
- GARDNER JR., E. S. Evaluating Forecast Performance in an Inventory Control System. **Management Science**; Vol. 36, No. 4, April 1990.
- GODDARD, W.E. Let's scrap forecasting. **Modern Materials Handling**, vol.39, p.39, Sept. 1989.
- HANKE, J.E.; REITCH, A.G. **Business Forecasting**. New Jersey: Prentice Hall, 1998.
- HARRIS, F. W. How many parts to make at once. **Factory, The Magazine of Management**; 10 n^o 2, p. 135, Feb. 1913

JACOBS, R. A. **Statistical forecasting of demand for inventory control systems** (exponential smoothing estimation). Dissertação. The university of North Carolina at Chapel Hill, 1985. p.176

LAZZARINI, S.G. Estudos de caso: aplicabilidade e limitações do método para fins de pesquisa. **Economia & Empresa**, v.2 n°4, Outubro/Dezembro de 1995. p.17–26.

LEE, T.S.; ADAM JR., E. E. Forecasting error evaluation in material requirements planning (MRP) production-inventory systems. **Management Science**, v.32, Setembro de 1986. p. 1186 – 1205.

LOVE, S.F. **Inventory Control**. New York: McGraw-Hill, 1979.

MAKRIDAKIS, S.; WHEELRIGHT S.C. **Forecasting-Methods and Applications**. 3rd. ed. New York: Wiley, 1998.

MCLAUGHLIN, C.P.; VASTAG, G.; WHYBARK, D. C. Statistical Inventory Control in Theory and Practice. **International Journal of Production Economics**, v.35, p. 161-169, 1994.

NADDOR, E. **Inventory Systems**. New York: Wiley, 1966.

NAKANO, D.; FLEURY, A.C.C. Métodos de pesquisa na Engenharia de Produção. In: XVI ENEGEP, ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 1996, Piracicaba. **Anais ...**, Piracicaba: UNIMEP/ABEPRO, 1996, CD ROM.

OHNO, T. **O sistema Toyota de produção**: além da produção em larga escala. Porto Alegre, Bookman, 1997

SANTORO, M.C. **Planejamento, programação e controle da produção**: previsão de Demanda. Escola Politécnica da U.S.P. – Depto. Enga. de Produção. São Paulo. 2003. 49 p.

SANTORO, M.C. **Sistema de gestão de estoques de múltiplos itens em local único**. 2006. 109 f. Tese (Livre Docência em Gestão de Operações e Logística)– Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SANTORO, M.C.; FREIRE, G. Análise comparativa de modelos de estoque. In: SBPO 2004 SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 2004, S.J.DEL REY. **Anais ... SOBRAPO 2004** , CD ROM.

SILVER, E.A. Operations Research in Inventory Management: a review and critique, **Operations Research**, v.29, n.4, 1981. p. 628-645.

SILVER, E.A.; RAHNAMA, M.R. Biased selection of the Inventory Reorder point when demand parameters are statistically estimated. **Engineering Costs and Production Economics**, v.12, 1987. p. 283-292.

VOSS,C.; TSIKRIKTSIS, N. E FROHLICH, M. Case research in Operations Management. **International Journal of Operations & Production Management**, v.22, n. 2, 2002. p.195-219.

WESTBROOK, R – Action Research: a new paradigm for research in Production and Operations Management. **International Journal of Operations & Production Management**, v.15, n. 12, 1995. p. 6-20.

ZANAKIS, S.H.; AUSTIN, D.C.N.; SILVER, E.A. From Teaching to Implementing Inventory Management: Problems of Translation. **Interfaces**, v.10, 1980. p. 103-110.

APÊNDICE A – Exemplos de Relatórios de Saída do Módulo de busca e simulação

ITEMEstModSim		11/1/2007												
CodItem	CodModEst	ClasMod	Par1	Par2	NivAtdSimItem	CobEstSimItem	EstMedPerVal	CtoArmPerVal	CtoPedPerVal	CtoFalPer\$	CtoOperPerVal	CritParBuscaEst	EstIni	ClasEst
1	1	5	527,64	594,71	0,99	1,01	1509,06	15,09	1,36	0,40	16,84	1	0	0
1	2	6	122,34	593,60	0,99	1,01	1500,47	15,00	1,36	0,50	16,86	2	0	0
1	3	7	535,32	112,31	0,98	0,97	1453,93	14,54	1,36	1,32	17,22	1	0	0
1	4	1	165,42	301,60	1,00	0,02	35,99	0,36	4,00	0,17	4,53	1	0	0
1	5	3	122,34	302,80	1,00	0,03	46,16	0,46	4,00	0,10	4,56	1	0	0
1	6	4	281,81	86,54	0,99	0,19	289,30	2,89	4,00	0,59	7,48	1	0	0
1	7	2	3,56	140,61	1,00	0,02	35,31	0,35	4,00	0,21	4,56	1	0	0
1	8	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0
2	1	5	607,39	599,41	0,99	1,02	1532,77	15,33	1,36	0,86	17,54	1	0	0
2	2	6	122,76	596,94	0,98	1,01	1513,10	15,13	1,36	1,06	17,55	2	0	0
2	3	7	534,50	89,86	0,96	0,97	1455,87	14,56	1,36	2,10	18,02	1	0	0
2	4	3	340,14	308,66	0,99	0,06	92,50	0,93	4,00	0,34	5,27	1	0	0
2	5	2	122,76	309,77	1,00	0,07	101,05	1,01	4,00	0,24	5,25	1	0	0
2	6	4	276,97	76,70	1,00	0,13	201,85	2,02	4,00	0,27	6,29	1	0	0
2	7	1	8,72	132,48	1,00	0,07	98,51	0,99	4,00	0,25	5,24	1	0	0
2	8	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0
3	1	6	649,47	587,95	0,96	0,97	1455,95	14,56	1,36	2,19	18,11	1	0	0
3	2	7	122,76	588,32	0,96	0,97	1458,92	14,59	1,36	2,17	18,11	1	0	0
3	3	5	539,18	88,06	0,98	1,02	1527,36	15,27	1,36	1,33	17,96	1	0	0
3	4	1	287,97	311,96	0,99	0,09	134,60	1,35	4,00	0,85	6,19	1	0	0
3	5	2	116,18	312,48	0,99	0,09	138,80	1,39	4,00	0,81	6,20	1	0	0
3	6	4	269,59	76,70	0,98	0,09	141,24	1,41	4,00	1,34	6,76	1	0	0
3	7	3	15,54	0,00	0,98	0,09	137,85	1,38	4,00	0,94	6,32	2	0	0
3	8	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0
4	1	6	194,88	593,62	0,96	0,99	1485,20	14,85	1,36	2,25	18,45	1	0	0
4	2	5	116,42	594,44	0,96	0,99	1491,73	14,92	1,36	2,18	18,45	1	0	0
4	3	7	550,07	107,67	0,96	0,99	1494,09	14,94	1,36	2,25	18,55	1	0	0
4	4	2	329,35	320,95	0,98	0,14	217,17	2,17	4,00	0,92	7,09	1	0	0
4	5	3	0,00	319,53	0,98	0,14	205,99	2,06	4,00	1,04	7,10	1	0	0
4	6	4	292,06	90,06	0,99	0,26	389,19	3,89	4,00	0,59	8,49	1	0	0
4	7	1	20,99	119,34	0,99	0,15	221,18	2,21	4,00	0,85	7,06	1	0	0
4	8	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0

ITEMEstSeg		11/1/2007										
CodItem	CodMod	SaiDesvMed	SaiDesvDPad	SaiDesvNAtd	EstSeg	CobEstSeg	SaiDesvAbsMed	SaiDesvQdrMed	ProjOtimoSN	CritParBuscaPro	AtiOtimoSN	
1	1	149,17	2,90	149,90	0,73	0,00						
1	2	298,44	4,08	299,47	1,03	0,00						
1	3	596,89	5,64	598,31	1,43	0,00						
1	4	298,44	4,08									
1	5	-0,85	3,79	5,39	6,24	0,04	3,07	14,69	TRUE	1	TRUE	
1	6	1,46	4,16	8,31	6,85	0,05	3,61	18,97		3	FALSE	
1	7	-0,85	3,79	5,39	6,24	0,04	3,07	14,69		3	FALSE	
1	8	1,46	4,16	8,31	6,85	0,05	3,61	18,97		3	FALSE	
1	9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
2	1	150,16	6,65	151,85	1,68	0,01						
2	2	300,26	9,82	302,75	2,49	0,01						
2	3	601,24	14,32	604,87	3,63	0,01						
2	4	300,26	9,82									
2	5	0,71	8,49	14,68	13,97	0,09	6,88	70,56	TRUE	1	TRUE	
2	6	-2,33	10,95	15,69	18,02	0,12	8,94	121,98		3	FALSE	
2	7	0,71	8,49	14,68	13,97	0,09	6,88	70,56		3	FALSE	
2	8	-2,33	10,95	15,69	18,02	0,12	8,94	121,98		3	FALSE	
2	9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
3	1	150,14	11,98	153,18	3,04	0,02						
3	2	300,62	15,27	304,49	3,87	0,01						
3	3	601,70	21,43	607,13	5,43	0,01						
3	4	300,62	15,27									
3	5	4,95	17,23	33,29	28,35	0,19	14,72	312,97		1	FALSE	
3	6	-6,84	17,42	21,81	28,65	0,19	14,34	341,58	TRUE	3	TRUE	
3	7	3,61	17,57	32,51	28,90	0,19	14,66	312,88		3	FALSE	
3	8	-6,84	17,42	21,81	28,65	0,19	14,34	341,58		3	FALSE	
3	9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
4	1	150,79	18,02	155,35	4,57	0,03						
4	2	301,54	23,76	307,56	6,02	0,02						
4	3	601,52	28,98	608,86	7,34	0,01						
4	4	301,54	23,76									
4	5	-2,60	19,94	30,20	32,80	0,22	16,50	393,06	TRUE	1	TRUE	
4	6	-9,15	25,20	32,31	41,46	0,27	22,35	700,71		3	FALSE	
4	7	-2,60	19,94	30,20	32,80	0,22	16,50	393,06		3	FALSE	
4	8	-9,15	25,20	32,31	41,46	0,27	22,35	700,71		3	FALSE	
4	9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				

ITEMProjModSim								
CodItem	CodMod	CoefSuavCtte	CoefSuavIncl	CoefSuavIndSaz	Ctte_PerIni	Incl_PerIni	ProjOtimoSN	CritParBuscaPro
1	5	0,050	0,000	0,000	148,841	0,000	TRUE	1
1	6	0,200	0,000	0,000	150,559	0,149	FALSE	3
1	7	0,050	0,000	0,000	148,841	0,000	FALSE	3
1	8	0,200	0,000	0,000	150,559	0,149	FALSE	3
2	5	0,000	0,000	0,000	150,368	0,000	TRUE	1
2	6	0,400	0,000	0,000	145,812	-0,396	FALSE	3
2	7	0,000	0,000	0,000	150,368	0,000	FALSE	3
2	8	0,400	0,000	0,000	145,812	-0,396	FALSE	3
3	5	0,000	0,000	0,000	151,798	0,000	FALSE	1
3	6	0,000	0,000	0,000	149,538	-0,197	TRUE	3
3	7	0,020	0,000	0,000	151,798	0,000	FALSE	3
3	8	0,000	0,000	0,000	149,538	-0,197	FALSE	3
4	5	0,000	0,000	0,000	150,081	0,000	TRUE	1
4	6	0,350	0,000	0,000	138,871	-0,975	FALSE	3
4	7	0,000	0,000	0,000	150,081	0,000	FALSE	3
4	8	0,350	0,000	0,000	138,871	-0,975	FALSE	3
5	5	0,100	0,000	0,000	142,424	0,000	FALSE	1
5	6	0,100	0,000	0,000	142,236	-0,016	FALSE	3
5	7	0,118	0,000	0,000	142,424	0,000	TRUE	3
5	8	0,100	0,000	0,000	142,236	-0,016	FALSE	3
6	5	0,030	0,000	0,000	299,741	0,000	TRUE	1
6	6	0,200	0,000	0,000	297,868	-0,163	FALSE	3
6	7	0,036	0,000	0,000	299,741	0,000	FALSE	3
6	8	0,200	0,000	0,000	297,868	-0,163	FALSE	3
7	5	0,000	0,000	0,000	298,741	0,000	TRUE	1
7	6	0,050	0,000	0,000	300,267	0,133	FALSE	3
7	7	0,000	0,000	0,000	298,741	0,000	FALSE	3
7	8	0,050	0,000	0,000	300,267	0,133	FALSE	3
8	5	0,026	0,000	0,000	298,136	0,000	TRUE	1
8	6	0,050	0,000	0,000	296,997	-0,099	FALSE	3

EstModResGraf		11/1/2007					
CtoPed	TxArm	NLiqMin	NivAtd	CtoFalta	0,4	Tesp	1
4,00	0,010	TRUE	0,60				
ClasfMod	REPMAXP	REPBASE	LOTFIXP	REPMAXC	REPBASC	LOTFIXC	CALNEC
1 ^o lugar	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,92
2 ^o lugar	0,00	0,00	0,00	0,72	0,08	0,17	0,03
3 ^o lugar	0,00	0,00	0,00	0,20	0,55	0,20	0,05
4 ^o lugar	0,00	0,00	0,00	0,00	0,37	0,63	0,00
5 ^o lugar	0,33	0,07	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00
6 ^o lugar	0,52	0,43	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
7 ^o lugar	0,15	0,50	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00

APÊNDICE B – Gráficos de desempenho dos modelos de estoque

