

UM MODELO DE DECISÃO PARA GESTÃO DE ESTOQUES DE PEÇAS DE
REPOSIÇÃO

Caio Fiuza Silva

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO
DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO.

Aprovada por:

Prof. Francisco José de Castro Moura Duarte, D.Sc.

Prof. Raad Yahya Qassim, Ph.D.

Prof. Osvaldo Luiz Gonçalves Quelhas, D.Sc.

Prof. Alberto Gabbay Canen, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
SETEMBRO DE 2005

SILVA, CAIO FIUZA

Um Modelo de Decisão para Gestão de Estoques de Peças de Reposição [Rio de Janeiro] 2005

XII, 87 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia de Produção, 2005)

Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Gestão de Estoques
2. Itens de Baixo/Baixíssimo Giro
3. Programação Matemática

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

A Visagio.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Raad Yahya Qassim pela enorme dedicação profissional, pela sabedoria e pela importante experiência que me passou durante o tempo em que trabalhamos juntos.

Aos professores Francisco Duarte e Armando Clemente pelo apoio oferecido nos momentos mais difíceis.

A professora Anne-Marie Maculan pela confiança em mim depositada, fundamental para o desenvolvimento do presente trabalho.

A Maria de Fátima Santiago que, com incrível paciência, socorreu-me em inúmeros momentos ao longo da minha trajetória na COPPE/UFRJ.

Aos companheiros da Visagio pelo conhecimento que me foi transmitido e pelo constante incentivo.

A Milena Giupponi “Mimi” pela inestimável ajuda durante o processo.

Aos meus pais, familiares e Aline, que sempre incentivaram incansavelmente. Neste caso, não cabe apenas agradecer, mas também compartilhar este feito.

Resumo da dissertação apresentada a COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

UM MODELO DE DECISÃO PARA GESTÃO DE ESTOQUES DE PEÇAS DE REPOSIÇÃO

Caio Fiuza Silva

Setembro/2005

Orientadores: Raad Yahya Qassim
Francisco Duarte

Programa: Engenharia de Produção

Este trabalho apresenta uma abordagem para o problema da gestão de estoques de itens de baixo/baixíssimo giro. Esta abordagem consiste em identificar os custos totais associados aos estoques de peças de reposição, os requisitos de nível de serviço e, de posse de tais elementos definir a política ótima de ressuprimento para o item em questão. Neste caso, a política ótima é aquela que minimiza os custos totais atendendo aos requisitos de nível de serviço. A principal diferença da abordagem proposta para as demais é a inexistência de restrições com relação à distribuição de probabilidades que representa a demanda.

Abstract of dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

A DECISION MODEL TO SPARE PARTS INVENTORY MANAGEMENT

Caio Fiuza Silva

September/2005

Advisors: Raad Yahya Qassim
Francisco Duarte

Department: Industrial Engineering

This work brings a quantitative approach to slow moving items inventory management. This approach consists in identify total cost associated to slow moving items inventory, service level requirements and define the best replenishment orders, that is defined by the minimum cost aggregated to the analyzed system. Service lever restriction can not be violated. In the model presented any probability distribution can estimate demand and this is the most important difference between this approach and the other found in the literature.

SUMÁRIO

Capítulo 1 – Introdução	1
1.1. Relevância da Gestão dos Estoques	4
1.2. Gestão de Estoques de Peças de Reposição	5
1.3. Objetivos do Trabalho.....	10
Capítulo 2 – Descritivo do Modelo Matemático.....	12
2.1. Fundamentos do Modelo Matemático	13
2.2. Premissas do Modelo Matemático	13
2.3. Notação	15
2.4. Modelagem Matemática.....	16
2.4.1. Função Objetivo.....	16
2.4.2. Restrições	16
2.5. Exemplos Numéricos	18
2.5.1. Exemplo 1 – Demanda com Base na Distribuição de Poisson	22
2.5.2. Exemplo 2 – Demanda com Base na Distribuição Binomial.....	24
2.5.3. Exemplo 3 – Demanda com base na Distribuição Discreta.....	26
Capítulo 3 – Validação Modelo Matemático	28
3.1. Validação através de Modelos de Simulação.....	29
3.1.1. Resultados da Simulação com Base no Exemplo 1	31
3.1.2. Resultados da Simulação com Base no Exemplo 2	36
3.1.3. Resultados da Simulação com Base no Exemplo 3	41
3.1.4. Construção dos Intervalos de Confiança para as Médias das Corridas.....	46
3.2. Validação através de Análise de Sensibilidade.....	49
3.2.1. Resultados da Análise de Sensibilidade para o Exemplo 1	49
3.2.2. Resultados da Análise de Sensibilidade para o Exemplo 2	52
3.2.3. Resultados da Análise de Sensibilidade para o Exemplo 3	55
Capítulo 4 – Conclusões	58
Capítulo 5 – Bibliografia	61
Capítulo 6 – Anexos.....	65
ANEXO 1: Modelagem do Exemplo 1 em LINDO 6.1.....	66
ANEXO 2: Modelagem do Exemplo 2 em LINDO 6.1.....	70
ANEXO 3: Modelagem do Exemplo 3 em LINDO 6.1.....	73

ANEXO 4: Cenários Criados para Validação do Modelo Matemático – Exemplo 1	
.....	75
ANEXO 5: Cenários Criados para Validação do Modelo Matemático – Exemplo 2	
.....	76
ANEXO 6: Cenários Criados para Validação do Modelo Matemático – Exemplo 3	
.....	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Gráfico 1 - Políticas de estocagem.....	21
Gráfico 2 - Exemplo 1: custo total do cenário 1	32
Gráfico 3 - Exemplo 1: custo total do cenário 2	32
Gráfico 4 - Exemplo 1: custo total do cenário 3	33
Gráfico 5 - Exemplo 1: custo total do cenário 4	33
Gráfico 6 - Exemplo 1: custo total do cenário 5	34
Gráfico 7 - Exemplo 1: custo total do cenário 6	34
Gráfico 8 - Exemplo 1: custo total do cenário 7	34
Gráfico 9 - Exemplo 1: custo total do cenário 8	35
Gráfico 10 - Exemplo 1: custo total do cenário 9	35
Gráfico 11 - Exemplo 1: comparativo de custos entre os cenários analisados	36
Gráfico 12 - Exemplo 2: custo total do cenário 1	37
Gráfico 13 - Exemplo 2: custo total do cenário 2	38
Gráfico 14 - Exemplo 2: custo total do cenário 3	38
Gráfico 15 - Exemplo 2: custo total do cenário 4	38
Gráfico 16 - Exemplo 2: custo total do cenário 5	39
Gráfico 17 - Exemplo 2: custo total do cenário 6	39
Gráfico 18 - Exemplo 2: custo total do cenário 7	39
Gráfico 19 - Exemplo 2: custo total do cenário 8	40
Gráfico 20 - Exemplo 2: custo total do cenário 9	40
Gráfico 21 - Exemplo 2: comparativo de custos entre os cenários analisados	41
Gráfico 22 - Exemplo 3: custo total do cenário 1	42
Gráfico 23 - Exemplo 3: custo total do cenário 2	43
Gráfico 24 - Exemplo 3: custo total do cenário 3	43
Gráfico 25 - Exemplo 3: custo total do cenário 4	43
Gráfico 26 - Exemplo 3: custo total do cenário 5	44
Gráfico 27 - Exemplo 3: custo total do cenário 6	44
Gráfico 28 - Exemplo 3: custo total do cenário 7	44
Gráfico 29 - Exemplo 3: custo total do cenário 8	45
Gráfico 30 - Exemplo 3: custo total do cenário 9	45
Gráfico 31 - Exemplo 3: comparativo de custos entre os cenários analisados	46

Gráfico 32 - Exemplo 1: Resultados da análise de sensibilidade em relação ao parâmetro custo de indisponibilidade	50
Gráfico 33 - Exemplo 1: Resultados da análise de sensibilidade em relação ao parâmetro custo de aquisição	51
Gráfico 34 - Exemplo 1: Resultados da análise de sensibilidade em relação ao parâmetro custo de ressuprimento	51
Gráfico 35 - Exemplo 1: Resultados da análise de sensibilidade em relação ao parâmetro consumo médio	52
Gráfico 36 - Exemplo 2: Resultados da análise de sensibilidade em relação ao parâmetro custo de indisponibilidade	53
Gráfico 37 - Exemplo 2: Resultados da análise de sensibilidade em relação ao parâmetro custo de aquisição	53
Gráfico 38 - Exemplo 2: Resultados da análise de sensibilidade em relação ao parâmetro custo de ressuprimento	54
Gráfico 39 - Exemplo 2: Resultados da análise de sensibilidade em relação ao parâmetro consumo médio	54
Gráfico 40 - Exemplo 3: Resultados da análise de sensibilidade em relação ao parâmetro custo de indisponibilidade	55
Gráfico 41 - Exemplo 3: Resultados da análise de sensibilidade em relação ao parâmetro custo de aquisição	56
Gráfico 42 - Exemplo 3: Resultados da análise de sensibilidade em relação ao parâmetro custo de ressuprimento	56
Gráfico 43 - Exemplo 3: Resultados da análise de sensibilidade em relação ao parâmetro consumo médio	57

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Pesos dos Estoques nos indicadores de margem de algumas empresas	5
Tabela 2 - Parâmetros do item de manutenção	18
Tabela 3 - Características das políticas de estocagem possíveis.....	20
Tabela 4 - Valores de P_{ijk} para o exemplo 1	23
Tabela 5 - Valores dos elementos da função objetivo para o exemplo 1.....	23
Tabela 6 - Resultados apresentados pelo modelo matemático para o exemplo 1	23
Tabela 7 - Valores de P_{ijk} para o exemplo 2	25
Tabela 8 - Valores dos elementos da função objetivo para o exemplo 2.....	25
Tabela 9 - Resultados apresentados pelo modelo matemático para o exemplo 2.....	26
Tabela 10 - Valores de P_{ijk} para o exemplo 3	27
Tabela 11 - Valores dos elementos da função objetivo para o exemplo 3.....	27
Tabela 12 - Resultados apresentados pelo modelo matemático para o exemplo 3.....	27
Tabela 13 - Exemplo 1: corridas 1 a 10	31
Tabela 14 - Exemplo 1: corridas 11 a 20	31
Tabela 15 - Exemplo 1: corridas 21 a 30	31
Tabela 16 - Exemplo 1: corridas 31 a 40	31
Tabela 17 - Exemplo 2: corridas 1 a 10	36
Tabela 18 - Exemplo 2: corridas 11 a 20	36
Tabela 19 - Exemplo 2: corridas 21 a 30	37
Tabela 20 - Exemplo 2: corridas 31 a 40	37
Tabela 21 - Exemplo 3: corridas 1 a 10	41
Tabela 22 - Exemplo 3: corridas 11 a 20	41
Tabela 23 - Exemplo 3: corridas 21 a 30	42
Tabela 24 - Exemplo 3: corridas 31 a 40	42
Tabela 25 - Exemplo 1: intervalos de confiança para as políticas propostas.....	47
Tabela 26 - Exemplo 2: intervalos de confiança para as políticas propostas.....	47
Tabela 27 - Exemplo 3: intervalos de confiança para as políticas propostas.....	47
Tabela 28 - Exemplo 1: comparativo entre resultados dos modelos de simulação e de otimização	48
Tabela 29 - Exemplo 2: comparativo entre resultados dos modelos de simulação e de otimização	48

Tabela 30 - Exemplo 3: comparativo entre resultados dos modelos de simulação e de otimização	48
Tabela 31 – Análise de sensibilidade: caso base	49
Tabela 32 - Resultados da análise de sensibilidade	57
Tabela 33 - Exemplo 1: variação no custo de indisponibilidade	76
Tabela 34 - Exemplo 1: variação no custo de aquisição	77
Tabela 35 - Exemplo 1: variação no custo de ressuprimento	78
Tabela 36 - Exemplo 1: variação no consumo histórico.....	79
Tabela 37 - Exemplo 2: variação no custo de indisponibilidade	80
Tabela 38 - Exemplo 2: variação no custo de aquisição	81
Tabela 39 - Exemplo 2: variação no custo de ressuprimento	82
Tabela 40 - Exemplo 2: variação no consumo histórico.....	83
Tabela 41 - Exemplo 3: variação no custo de indisponibilidade	84
Tabela 42 - Exemplo 3: variação no custo de aquisição	85
Tabela 43 - Exemplo 3: variação no custo de ressuprimento	86
Tabela 44 - Exemplo 3: variação no consumo histórico.....	87

Capítulo 1 – Introdução

De acordo com o CSCMP (Council of Supply Chain Management Professionals) a logística é definida como “o processo de planejar, implementar e controlar de maneira eficiente o fluxo e a armazenagem de produtos, bem como os serviços e informações associados, cobrindo desde o ponto de origem até o ponto de consumo, com o objetivo de atender aos objetivos do consumidor”.

No Brasil, conforme explica FLEURY, WANKE e FIGUEIREDO (2000), com uma economia fechada e um contexto inflacionário e de baixa competição, as empresas foram levadas a negligenciar por muito tempo o processo logístico, gerando uma defasagem de, no mínimo, 10 anos em relação às melhores práticas internacionais.

Atualmente, em busca de uma gestão mais eficiente, muitas empresas têm deixado a inércia de rotinas na qual estavam inseridas há anos, aderindo às mudanças exigidas por um ambiente altamente dinâmico e competitivo. Embora os gerentes e marechais num passado longínquo já tivessem reconhecido o papel crítico da logística, o reconhecimento da mesma como um aspecto fundamental para a obtenção de vantagem competitiva só chegou até as empresas num passado recente.

Como consequência desse atraso na busca por excelência operacional e competitividade, temos que a revisão, não só do modelo de operações, mas também da própria mentalidade logística tornou-se uma tarefa muito mais difícil e de longo prazo. Isto porque a maioria das grandes empresas experimentou um crescimento pouco ou nada estruturado com respeito à visão integrada da logística.

Na prática, decisões importantes e, muitas vezes estratégicas, dentro do campo da gestão empresarial, de forma geral eram tomadas sem se considerar o todo da empresa e, quanto menos, o todo da cadeia de suprimentos. Durante certo tempo às desvantagens desse tipo de crescimento podem ter ficado mascaradas por operações simples e um mercado ainda pouco exigente. No entanto, o indiscutível aumento da complexidade dos negócios e as crescentes exigências dos consumidores fizeram destacar a importância de um sistema flexível e capaz de responder rapidamente às flutuações de mercado. Ressaltou-se, portanto a necessidade de um planejamento mais

detalhado e, se possível, científico, às luzes da logística integrada, principalmente das decisões de longo prazo.

A logística integrada engloba três grandes áreas: suprimentos que corresponde aos processos de compras e interface e interface com fornecedores, logística industrial que representa o planejamento da produção e as operações de sequenciamento, além da distribuição física que engloba o transporte e a interface com os clientes e consumidores. Outra característica relevante na logística integrada é a relação entre a gestão das operações e o marketing. LAMBERT e STOCK (1993), consideram a logística integrada como um dos 4 “Ps” de Marketing, como pode ser visto na Figura 1.

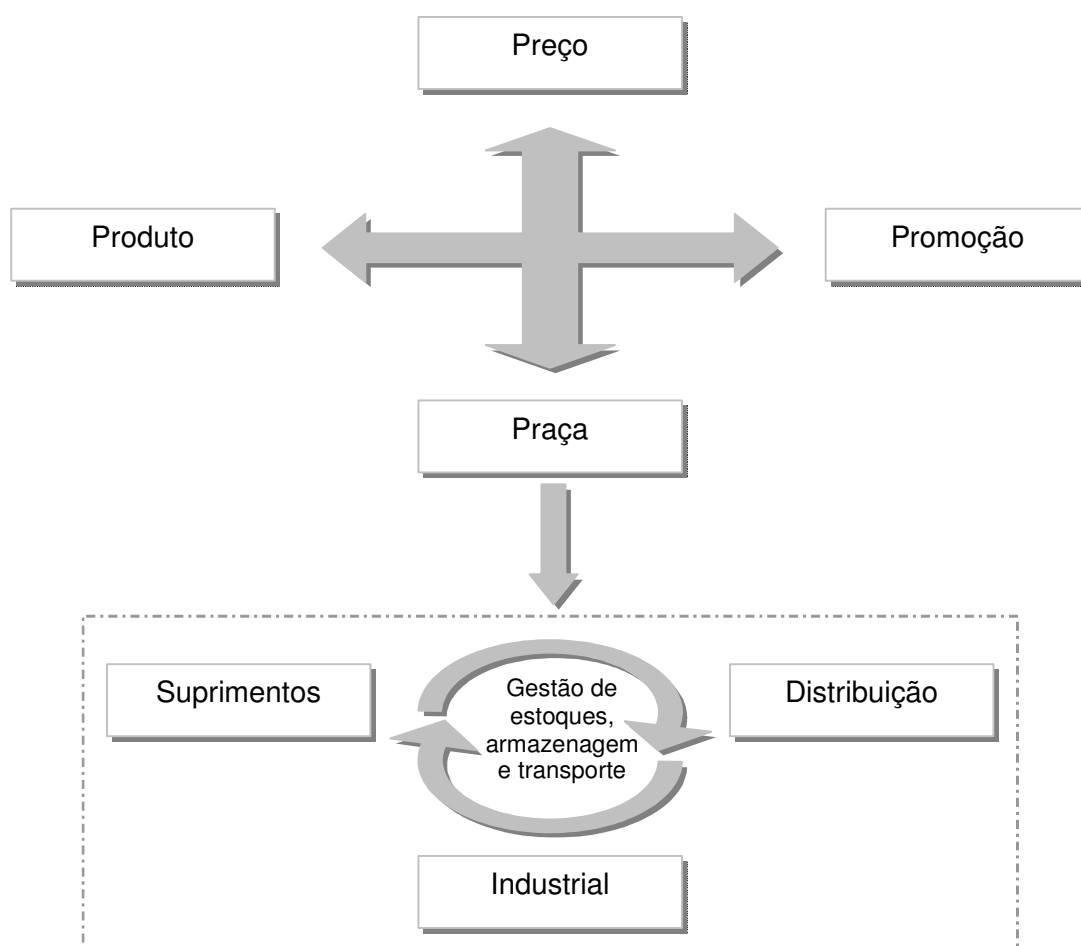


Figura 1 - Logística Integrada. FONTE: Adaptado de LAMBERT e STOCK (1993).

Como pode ser visto acima, a gestão de estoques juntamente com o transporte e a armazenagem são as funções fundamentais da logística integrada e, portanto, gerir

adequadamente os estoques possibilita o atingimento dos níveis de serviço adequados aos consumidores dentro de patamares aceitáveis de custos.

É nesse contexto que o mundo empresarial passa a demandar estudos e sistemas mais robustos para definições de políticas de estoque, modais de transporte, localização e capacidade de instalações, enfim, tudo aquilo que possa, de alguma forma, traduzir-se em vantagem competitiva.

No entanto, conforme citado, ainda que os conceitos da logística integrada sejam de rápida compreensão, as mudanças, efetivamente, ocorrem de forma muito mais lenta e difícil. Ao lado da complexidade intrínseca aos modelos matemáticos, caminha uma outra, relativa ao lado humano e organizacional, que é capaz de comprometer ou mesmo inviabilizar estudos desta natureza.

1.1. Relevância da Gestão dos Estoques

O custo de estoque é composto por diversos itens, dentre os quais o mais relevante é o custo de oportunidade do capital, ou seja, o equivalente aos rendimentos de possíveis investimentos do capital empatado em estoques. Ao comparar o Brasil com outros países desenvolvidos fica evidente que o custo do estoque é um item de destaque em virtude das elevadas taxas de juros e, conseqüentemente, das elevadas taxas obtidas em aplicações de mercado financeiro.

Deste modo, o estoque se destaca como sendo um item alvo para redução de custos, não apenas pela sua relevância dentro do custo total frente à margem das empresas, mas principalmente, pelo valor imobilizado nesta conta do ativo, fato este que afeta diretamente os indicadores de retorno sobre o capital dos acionistas. Em virtude da restrição de capital para novos investimentos as empresas têm adotado estratégias que visam maximizar o retorno do capital empregado. Para tanto, é necessário gerar o máximo possível de resultado com o mínimo possível de capital. Do ponto de vista operacional, isto é equivalente a maximizar o lucro e ao mesmo tempo minimizar os ativos. Portanto, a idéia de desmobilizar ativos ganha força dentro das empresas. A

Tabela 1 mostra a importância relativa dos estoques em empresas de alguns setores da economia.

Tabela 1 - Pesos dos Estoques nos indicadores de margem de algumas empresas. FONTE: Comunicação Interna

Empresa	Ativo	Estoques	% Estoque no Ativo	Receita Bruta	Lucro Líquido	Margem	Giro	ROI
Petrobras	R\$ 99.941.376	R\$ 10.385.216	10,4%	R\$ 82.334.499	R\$ 9.803.754	11,9%	0,8	9,8%
Pão de Açúcar	R\$ 8.874.972	R\$ 843.317	9,5%	R\$ 10.869.620	R\$ 225.545	2,1%	1,2	2,5%
Sadia	R\$ 5.098.791	R\$ 880.896	17,3%	R\$ 5.561.514	R\$ 452.491	8,1%	1,1	8,9%
Embraer	R\$ 11.939.468	R\$ 2.137.416	17,9%	R\$ 7.447.469	R\$ 1.202.066	16,1%	0,6	10,1%
Lojas Americanas	R\$ 1.412.920	R\$ 185.674	13,1%	R\$ 1.720.907	R\$ 103.086	6,0%	1,2	7,3%

Os dados da tabela acima mostram uma grande variabilidade nos indicadores. Na maioria das empresas analisadas, os estoques representam mais de 10% do total dos ativos, sendo que em algumas o valor é superior a 15%. Por isso, ao reduzir os níveis de estoque as empresas contribuem para o objetivo de desmobilizar capital. Com isto, a gestão de estoque passou a ser analisada não apenas pelo seu resultado de custos, mas, principalmente, pelo impacto financeiro (LIMA, 2003).

1.2. Gestão de Estoques de Peças de Reposição

De acordo com CORRÊA e DIAS (1998), uma das áreas mais antigas da gestão de operações e cujos modelos ainda são relativamente atuais é a gestão de estoques de itens de demanda independente (aqueles cujas demandas não guardam relação de dependência com a demanda de nenhum outro item ou atividade da organização, sendo função de fatores como cenário econômico, concorrentes, necessidades esporádicas etc). Os produtos acabados e as peças de reposição são exemplos de itens com demanda independente (exceto nos casos de itens utilizados para manutenção preventiva).

Com relação a este grupo, CORRÊA e DIAS (1998) apresentam os resultados de um estudo sobre a gestão dos estoques de peças de reposição em empresas como Gillette, Johnson & Johnson, Kodak, 3M do Brasil, Hewlett Packard, Copersucar, Varig, Lion (distribuidor de peças Catterpillar), Souza Cruz, Avon Cosméticos e Cia. Antarctica. O autor narra que a maioria das empresas pesquisadas não utilizava ou subtilizava os modelos de estoques encontrados na literatura e ensinados nas escolas de Administração e Engenharia na gestão de seus estoques de peças sobressalentes. Dentre os motivos elencados para tal situação foi apontado como principal fator o

desconhecimento dos modelos por parte dos gestores. Concluiu-se então que existia um grande potencial para redução destes estoques.

WANKE (2002) afirma que “a gestão de estoques de peças de reposição constitui um capítulo à parte na literatura e prática da gestão de estoques. Isto por que os elevados custos de aquisição, os longos tempos de resposta de fornecimento e os baixíssimos giros, característicos das peças de reposição são armadilhas freqüentemente encontradas na definição de políticas de estoques (quanto pedir, quando pedir, qual o nível de serviço)”.

Em virtude da complexidade apresentada acima, os sistemas integrados de gestão das empresas são incapazes de oferecerem alternativas para a gestão de tais itens tornando mais complicado o processo decisório. RAZI e TARN (2003) explicam que apesar de possuírem ferramentas sofisticadas para a previsão de demanda de itens de alto giro, os *ERPs* (*Enterprises Resource Planning*) são pouco equipados para tratar itens de baixo giro e demanda nervosa como as peças de reposição.

Além do baixo giro e de possuírem demanda nervosa, em geral as peças de reposição apresentam alto valor de aquisição, fato este que aumenta a relevância das mesmas dentro da gestão de estoque. Entre 20% e 40% do valor em estoque de uma manufatura é referente às peças de reposição. Isto representa entre 5 milhões e 15 milhões de dólares. No setor de aviação comercial, o valor total dos estoques de peças de reposição é de 45 bilhões de dólares, com um custo de oportunidade anual estimado em 8 bilhões de dólares. Este valor é maior que o lucro total obtido pelo setor (SANDVIG e ALLAIRE, 1998). Na indústria automobilística, setor extremamente competitivo e de baixas margens, os custos com armazenagem, seguro, movimentação e oportunidade do capital representam entre 25% e 35% do valor total do estoque das empresas (KRIZNER, 2001).

Diante do cenário apresentado acima, pressupõe-se que a gestão dos estoques de peças de reposição deva ser enxuta, de modo a minimizar os custos da empresa. Porém, a redução dos estoques não pode produzir impactos negativos nos indicadores de nível de serviço.

Em virtude suas próprias características, os estoques de peças de reposição não podem ser administrados de acordo com os métodos tradicionais para cálculo de estoques de segurança (BOWERSOX, 1999). A literatura apresenta alguns métodos para tratar este tipo de problema. O modelo METRIC (*Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control*) é uma das primeiras referências ao tema (SHERBROOKE, 1968). Este é um modelo analítico, multi-elo, no qual um determinado depósito fornece itens para muitas bases. Este método foi e ainda é muito utilizado no gerenciamento de itens de manutenção de instituições militares. Parte-se da premissa de que as demandas oriundas de cada cliente são aderentes a distribuições de Poisson e que sempre que há uma demanda há uma ordem de ressuprimento equivalente a uma unidade para o respectivo cliente. O modelo busca minimizar o custo estimado de estoque através da definição dos pontos de pedido para cada um dos clientes. O custo total de estoque neste caso é composto pelo custo da falta do item e pelo custo do excesso do item.

KRANENBURG e HOUTUM (2004) desenvolveram um modelo de programação linear, multi-item, no qual a função objetivo busca minimizar o investimento em estoque tendo como restrição o nível de serviço. Neste artigo, os autores consideraram como medida de nível de serviço o *fill rate* (SILVER e PETERSON, 1985). Como premissas, considerou-se que as peças de reposição estariam centralizadas em um único armazém e todos os clientes foram separados em classes, sendo que cada classe era caracterizada por uma determinada faixa de nível de serviço. Diante das classes de clientes, foram montados grupos de produtos e diferentes políticas de gestão de estoques para os grupos de itens.

RAZI e TARN (2003) desenvolveram um modelo de revisão periódica para melhorar a gestão de estoques de itens de baixo giro em sistemas integrados de gestão. Este modelo busca, para um determinado sistema, encontrar a política de estoque que gere o menor custo total, composto pelo custo do item, pelo custo de *backorder* e pelo custo de manutenção de estoque. No modelo em questão, o nível de serviço resultante não é representado explicitamente. Além dos custos apresentados acima, um dos inputs do modelo é a estimativa de demanda. Diversos autores como SCHULTZ (1987) e GELDERS e LOOY (1978) sugerem a estimativa da demanda por uma distribuição de Poisson. SLOAN (2004), apresenta um trabalho no qual a demanda é

tratada como uma distribuição binomial. Entretanto, RAZI e TARN (2003) não se baseiam na utilização de distribuições de probabilidade teóricas para estimar a demanda pelos itens, mas, em uma distribuição empírica construída a partir de dados históricos.

WANKE (2005) apresenta uma revisão da literatura sobre gestão de estoques de peças de reposição e destaca quatro autores com suas respectivas abordagens.

O primeiro deles é YEH (1997). O autor implementa um modelo matemático baseado em premissas de atingimento de níveis de serviço e, a partir de um estudo de caso em uma empresa de médio porte, fabricante de eletroeletrônicos localizado em Taiwan, o define fronteiras para a utilização das distribuições normal e poisson como estimadores da demanda. Uma das contribuições do autor é a utilização da distribuição Gama como estimador de demanda de itens de baixo giro.

A segunda abordagem é apresentada por ROBISON (2001). A partir do uso de estatística multivariada e do conceito de análise de rentabilidade de estoque, o autor apresenta um modelo multi-item no qual, dado um limite inferior para o nível de serviço, calcula os níveis de estoque necessários de cada item.

A terceira abordagem foi apresentada por SANDVIG e ALLAIRE (1998). Também partindo de um estudo de caso o autor utiliza simulações em planilha e técnicas de custeio, como o custeio ABC (*Activity Based Costing*), para identificar os problemas na gestão dos materiais e suas causas, internas e externas à empresa analisada. O autor enfatiza a importância do serviço ao cliente e conclui que a redução dos estoques não é resolvida apenas com a implementação de sistemas e modelos matemáticos sofisticados, mas também de atuação sobre as causas da variabilidade da demanda.

Por último, BOTTER e FORTUIN (2000), através de um estudo de caso em uma multinacional que desenvolve, produz e vende dispositivos eletrônicos utilizados em plantas industriais, apresentaram um método de investigação conjunta no qual to aproximadamente 50.000 itens de reposição foram classificados de acordo com demanda, lead-time de produção/desenvolvimento, criticidade e preço, dentre outros.

A partir da classificação foram definidos os níveis de serviço adequados e as melhores políticas para os itens.

Após revisitar as diversas abordagens para o problema foi possível identificar características comuns à maioria delas tanto no que refere às premissas adotadas quanto no que tange ao método utilizado. Em linhas gerais, os pontos mais relevantes identificados foram:

- Tendência maior ao uso de modelos analíticos frente a modelos de simulação. Os modelos de simulação são, geralmente, mais precisos na definição de estoques de segurança, e conseqüentemente, políticas de estoque. Entretanto, em virtude da necessidade de executar um número representativo de corridas, os modelos de simulação exigem grande capacidade computacional, tanto em termos de memória quanto em termos de processamento. A medida em que o número de itens a analisar aumenta torna-se mais complexa a utilização de um modelo de simulação. Por outro lado, os modelos analíticos, dentre os quais destacam-se os modelos de programação matemática e de estatística multivariada, permitem a automação dos cálculos e são mais flexíveis;
- Modelos de revisão periódica *versus* revisão contínua. A principal diferença entre os dois métodos é que no primeiro o nível de estoque é monitorado em intervalos de tempo definidos enquanto que no segundo os estoques são monitorados constantemente. Um fator utilizado como argumento em prol dos sistemas com revisão periódica é que as peças de reposição costumam ter giro muito baixo e, portanto, não requerem monitoramento constante. Além disso, para um número elevado de itens torna-se complexo o monitoramento constante e, por este motivo, os métodos de revisão periódica são mais difundidos. Com o advento da massificação dos sistemas integrados de gestão este argumento tende a perder sentido;
- Gestão focada em redução de custos e serviço ao cliente. Em todas as abordagens é comum a preocupação com a redução de custos, sendo este o objetivo em todos os modelos estudados. Porém, percebeu-se que o serviço ao

cliente aparece explicitamente em algumas abordagens através de restrições de nível de serviço, medido como *fill rate* ou como probabilidade de *stockout*.

- Consumo estimado por variáveis aleatórias calculadas através de distribuições de probabilidades diferentes da distribuição normal. Há um consenso de que a distribuição normal não é aderente ao consumo de peças de reposição. Para estes casos encontram-se na literatura referências onde o consumo é modelado por distribuições de Poisson, distribuição binomial, distribuição empírica e distribuição gama.

1.3. Objetivos do Trabalho

O objetivo da presente dissertação é apresentar uma abordagem para o problema da gestão de estoques de peças de reposição. Esta abordagem consiste em identificar os custos totais associados aos estoques de peças de reposição, os requisitos de nível de serviço e, de posse de tais elementos definir a política ótima de ressuprimento para o item em questão. Neste caso, a política ótima é aquela que minimiza os custos totais atendendo aos requisitos de nível de serviço.

Além do capítulo 1, onde são apresentados os objetivos da dissertação e a revisão das diversas abordagens existentes para o problema, esta dissertação é composta por outros quatro capítulos.

O capítulo 2 apresenta a abordagem proposta com ênfase no modelo de programação matemática desenvolvido. Neste capítulo serão exibidas as premissas do modelo, a notação adotada e as equações que compõem o mesmo, seguidas de respectivo detalhamento. Ainda no capítulo 2, o modelo matemático é ilustrado com três exemplos criados com base no estudo do comportamento de aproximadamente vinte e dois mil itens de estoque de uma empresa brasileira distribuidora de aços planos. Os históricos dos estoques de tais itens foram obtidos através de um trabalho de consultoria realizado na empresa. Apesar de nenhum dos itens ter sido utilizado diretamente como um dos exemplos, o estudo foi importante para a compreensão das relações entre a demanda, o custo de ressuprimento, o custo de indisponibilidade e o custo de manutenção em itens de baixo giro e para criar os exemplos ilustrativos do

funcionamento do modelo. Além de ilustrar o funcionamento do modelo, os exemplos criados foram baseados em variáveis aleatórias distintas entre si para representar o consumo dos itens.

No capítulo 3 são exibidos os testes de validação do modelo. Foram desenvolvidos modelos de simulação e análise de sensibilidade onde foram aplicados os mesmos parâmetros dos exemplos do capítulo 2. Os resultados obtidos com os modelos de análise de sensibilidade e de simulação são comparados com aqueles do modelo de otimização e são feitas as validações. Por último, o capítulo 4 apresenta as conclusões e as recomendações para futuros trabalhos.

Capítulo 2 – Descritivo do Modelo Matemático

2.1. Fundamentos do Modelo Matemático

A problemática tratada nesta dissertação é a gestão de estoques de peças de reposição. A gestão destes itens é especialmente complexa porque dentre suas características principais destacam-se o baixo giro dos estoques e a incerteza nas estimativas de demanda.

A abordagem proposta nesta dissertação baseia-se no desenvolvimento de um modelo matemático que visa apontar, para uma determinada quantidade de estoque inicial, qual a quantidade a ser ressuprida que proveria o menor custo para o sistema logístico.

O custo do sistema logístico associado à gestão dos estoques de peças de reposição é composto por três elementos. O somatório dos três custos oferece o custo total a ser minimizado.

1. *Custo de manutenção de estoque:* é o custo de oportunidade do capital empatado na aquisição dos itens em estoque;
2. *Custo de ressuprimento:* é composto pelos custos de compra e transporte dos itens em estoque;
3. *Custo de indisponibilidade:* é associado à penalidade por transtornos causados pela indisponibilidade de determinado item em estoque do momento desejado para consumo até o final do lead-time como, por exemplo, paradas de linhas de produção, paralisação de serviços contratados acarretando multas, dentre outros.

2.2. Premissas do Modelo Matemático

Propõe-se um modelo de programação matemática cuja função objetivo busca minimizar os custos do sistema logístico tendo como principal restrição um determinado nível de serviço mínimo. As premissas adotadas para a modelagem do problema foram:

- O cálculo do indicador de nível de serviço do sistema é expresso em termos de *stockout*, ou seja, representa a probabilidade de existência de demanda sem que haja produtos disponíveis para a entrega;
- O sistema modelado segue o regime de revisão periódica $\langle R, Q \rangle$, como pode ser visto em GARCIA (2003), onde R é o intervalo de revisão e Q é a quantidade a ser ressuprida. Em outras palavras, a modelagem do sistema garante que, a cada período de revisão R , o sistema será reavaliado e uma nova ordem de ressuprimento k será colocada;
- Este é um modelo uniperiodal ($R=I$), ou seja, analisa a melhor política de estoques para um período de reposição;
- TAGARAS e VLACHOS (2001) definiram duas possíveis formas de ressuprimento em sistemas baseados em revisão periódica. Uma delas é o ressuprimento normal, definido a cada revisão. A outra é o ressuprimento de emergência cujas principais características são o *lead-time* reduzido e custo elevado quando comparado com o primeiro modelo. No modelo matemático proposto, o conceito de ressuprimento de emergência foi inserido através do custo de indisponibilidade;
- Uma determinada demanda pode acontecer em qualquer momento dentro do período de revisão. Portanto, a demanda do período é um parâmetro aleatório. Deste modo, o modelo matemático proposto utiliza-se da premissa de que a demanda por itens pode ser aproximada por uma variável aleatória modelada por uma distribuição de probabilidades;
- Não há qualquer restrição quanto à variável aleatória que representa a demanda. Este é um ponto importante, pois, a maioria dos modelos matemáticos para gestão de estoques pressupõe algum tipo de demanda como pode ser visto em TYWORTH (1992), KEATON (1995), EPPEN and MARTIN (1988), NAMIT e CHEN (1999) e LAU (1989);
- Pressupõe-se também que o comportamento da variável aleatória em questão não se altera ao longo do tempo.

A equação de balanço do modelo é a seguinte:

$$E_f = E_i - x + k \quad (1)$$

E_i = Estoque Inicial;
 E_f = Estoque Final;
 k = Quantidade ressuprida;
 x = Demanda no período.

2.3. Notação

A seguir encontra-se a lista com a notação utilizada durante o desenvolvimento da modelagem.

i, j = Índices que representam, respectivamente, a quantidade inicial e a quantidade final em estoque: $\{i, j \in Z\}$;

k = Índice que representa o número unidades ressupridas: $\{k \in N\}$;

P_{ijk} = Probabilidade de um sistema estar com estoque inicial i e passar para o estoque final j através da reposição de k unidades. Este elemento representa a aleatoriedade da demanda e é estimado através de variáveis aleatórias;

CR_{ik} = Elemento da função objetivo que representa o custo de ressuprimento associado ao pedido de k unidades, partindo estoque inicial i ;

CI_{ik} = Elemento da função objetivo que representa o custo de indisponibilidade associado ao pedido de k unidades, partindo estoque inicial i ;

CM_{ik} = Elemento da função objetivo que representa o custo de manutenção de estoque associado ao ressuprimento de k unidades, partindo do estoque inicial i ;

Y_{ik} = Variável de decisão que indica a quantidade a ser pedida para cada posição de estoque inicial: $\{Y_{ik} \in Z / 0 \leq Y_{ik} \leq 1\}$;

NS = Parâmetro de entrada do sistema que indica o nível de serviço mínimo permitido para política de estoques selecionada;

As políticas de estoque são definidas pelo estoque inicial do sistema (parâmetro i) e pela ação a ser tomada (parâmetro k), ou seja, é função de dois parâmetros. A seguir é mostrada a modelagem matemática sugerida.

2.4. Modelagem Matemática

2.4.1. Função Objetivo

$$\text{Min} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I (CR_{ik} + CI_{ik} + CM_{ik}) \times Y_{ik} \quad (2)$$

2.4.2. Restrições

$$\sum_{k=1}^K Y_{ik} = 1, \text{ para todo } i \in Z \quad (3)$$

$$1 - (Y_{ik} \times P_{ijk}) = NS, \text{ para todo } i \in Z, k \in N \text{ e } j \in Z / j < 0 \quad (4)$$

$$Y_{ik} = \{0,1\} \quad (5)$$

A função objetivo (2) leva à minimização do custo total da política de estoques composto pelos elementos custo de ressuprimento, custo de indisponibilidade e custo de manutenção de estoques.

O custo de ressuprimento tem dois possíveis resultados e varia em função da quantidade ressuprida. Nos casos em que a quantidade ressuprida é igual a zero, assume-se o custo com sendo zero. Para os demais casos o custo pode ser assumido como uma constante.

$$\begin{aligned} \text{se } k = 0 &\Rightarrow CR_{i0} = 0 \\ \text{se não} &\Rightarrow CR_{ik} = cr \end{aligned} \quad (6)$$

Entretanto, o cálculo do custo dependerá do modelo de ressuprimento adotado pelos fornecedores no mercado. Nas situações em que os fornecedores utilizam o modelo de ressuprimento unitário o custo de ressuprimento será dado pela equação abaixo e será proporcional à quantidade ressuprida.

$$CR_{ik} = cr \times k \quad (7)$$

Os custos de indisponibilidade e de manutenção dos estoques variam em função da demanda e este fato torna indispensável à análise deste elemento no modelo. Como dito anteriormente, a demanda é inserida no modelo através de variáveis aleatórias. O custo de indisponibilidade está diretamente associado à probabilidade do sistema entrar em estado de *backlog*. Portanto, as expressões abaixo representam o cálculo deste elemento para os diferentes valores de \underline{i} , \underline{j} e \underline{k} .

$$\begin{aligned} \text{se } j > 0 &\Rightarrow CI_{ik} = ci \times P_{ijk} \\ \text{se não} &\Rightarrow CI_{ik} = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

A constante \underline{ci} está associada aos custos logísticos gerados por pedidos de emergência e aos prejuízos causados pela indisponibilidade do item.

O custo de manutenção para cada uma das políticas se refere ao custo de oportunidade associado ao investimento em estoques. Este pode ser calculado conforme a expressão a seguir.

$$CM_{ik} = \sum_{j=1}^J ca \times P_{ijk} \times \frac{(i+j)}{2} \quad (9)$$

A constante \underline{ca} representa o custo de oportunidade referente à aquisição de uma unidade do item em questão.

Após a análise da função objetivo e de seus elementos serão detalhadas as três equações que representam as restrições do sistema. As equações (3) e (5) garantem que para cada possível situação de estado inicial ocupada pelo sistema o modelo matemático indicará a opção de menor custo total. A equação (4) está associada à necessidade do sistema atingir níveis de serviço preestabelecidos. Ou seja, para que uma política seja viável é necessário que ela ofereça um nível de serviço maior ou igual ao valor especificado.

As variáveis de decisão Y_{ik} representam diretamente as políticas de estoques. A interpretação para a resposta do modelo matemático diz que as variáveis de decisão

que assumem o valor 1 são aquelas que minimizam os custos logísticos do sistema para cada uma das posições de estoque inicial.

Os elementos P_{ijk} representam as variáveis aleatórias associadas à demanda. Estes elementos são valores de entrada do modelo e, como dito anteriormente, podem assumir qualquer distribuição de probabilidade.

2.5. Exemplos Numéricos

Para ilustrar a aplicação do modelo acima proposto foram criados três exemplos numéricos baseados em observações dos vinte e dois mil itens de estoque de uma grande empresa brasileira distribuidora de aços planos realizadas durante um projeto de consultoria. Os dados aqui apresentados são fictícios em função da necessidade de manter em sigilo a identidade da empresa.

Foram mapeados na empresa dois grandes grupos de itens em estoque. Os itens de consumo são aqueles que apresentam alto giro e alta previsibilidade na demanda, além de causar poucos prejuízos financeiros e operacionais caso o sistema atinja situação de *stockout*. Por outro lado, os itens de manutenção possuem por característica o baixíssimo giro, o alto custo de aquisição e o elevado custo para a empresa em situações de *stockout*. Escolheu-se então para testar o modelo matemático proposto um item de manutenção, cujas características são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros do item de manutenção

Características do Item	
Custo de Indisponibilidade	\$ 7000
Custo Aquisição	\$ 10000
Custo Ressuprimento	\$ 400
Lead Time (Anos)	0,17
Custo Oportunidade (ao ano)	18%
Nível de Serviço Mínimo	90%

Os custos de aquisição e de ressuprimento são obtidos através de consultas aos fornecedores do item, da mesma forma como o lead-time regular de entrega que, neste caso, é de dois meses. O valor do custo de indisponibilidade foi calculado em função das perdas causadas à empresa caso haja alguma paralisação no processo produtivo

provocada pela falta do item em questão. O custo de oportunidade é a taxa de capital utilizada para investimentos da empresa é de 18% ao ano. O nível de serviço mínimo para este item foi estipulado em 90%. Em outras palavras, para cada 10 solicitações ao estoque em pelo menos 9 delas haverá disponibilidade do item em questão.

Nos três casos, o modelo matemático apresentado anteriormente foi utilizado para definir a melhor política de estocagem do referido item, ou seja, definir a melhor ordem de compra para cada posição de estoque inicial.

Além das características intrínsecas ao item estudado foram definidos também os estados inicial e final além das ações associadas da forma como está representado abaixo.

$i = 0 \Rightarrow$ posição de estoque inicial menor que zero (*stockout*)

$i = 1 \Rightarrow$ posição de estoque inicial igual a zero

$i = 2 \Rightarrow$ posição de estoque inicial igual a uma unidade

$j = 0 \Rightarrow$ posição de estoque final menor que zero (*stockout*)

$j = 1 \Rightarrow$ posição de estoque final igual a zero

$j = 2 \Rightarrow$ posição de estoque final igual a uma unidade

$k = 0 \Rightarrow$ não é colocado um pedido

$k = 1 \Rightarrow$ é colocado o pedido de 1 unidade

$k = 2 \Rightarrow$ é colocado um pedido de 2 unidades

Ao todo existem três estados representando as alternativas de estoque inicial e as três opções de colocação de pedido, levando a outras três alternativas de estoque final. Portanto, para os exemplos apresentados existem nove políticas de estocagem possíveis que são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Características das políticas de estocagem possíveis

Política P(i,k)	Características das Políticas	
	Estoque Inicial	Quantidade Ressuprida
Política 1 - P(0,0)	Menor que zero	0
Política 2 - P(0,1)	Menor que zero	1
Política 3 - P(0,2)	Menor que zero	Maior ou igual a Dois
Política 4 - P(1,0)	0	0
Política 5 - P(1,1)	0	1
Política 6 - P(1,2)	0	Maior ou igual a Dois
Política 7 - P(2,0)	1	0
Política 8 - P(2,1)	1	1
Política 9 - P(2,2)	1	Maior ou igual a Dois

As políticas 1, 2 e 3 são aquelas que se iniciam com estoque menor que zero. Isto significa que nestes três casos, já existem demandas para os itens sem que haja estoque disponível para atendê-las. As políticas 4, 5 e 6 apresentam estoque inicial igual a zero. Nestes casos, apesar do estoque ser igual a zero, não existem demandas fazendo com que os sistemas atinjam situação de *stockout*. Nos três últimos casos, já existe uma unidade em estoque no início do período de revisão.

Com relação aos pedidos de ressuprimento, apenas nos casos 2, 3, 5, 6, 8 e 9 são colocadas ordens, sendo que nos três primeiros a ordem será de uma unidade e nos outros três será de duas unidades. Vale destacar que as ordens colocadas chegam sempre no segundo mês em virtude do lead-time de entrega estabelecido pelo fornecedor, conforme Tabela 2. As demandas podem acontecer a qualquer momento dentro do período de 12 meses. A Figura 2 exibe os gráficos referentes a cada uma das políticas explicitando em todas elas o estoque inicial e as quantidades ressupridas.

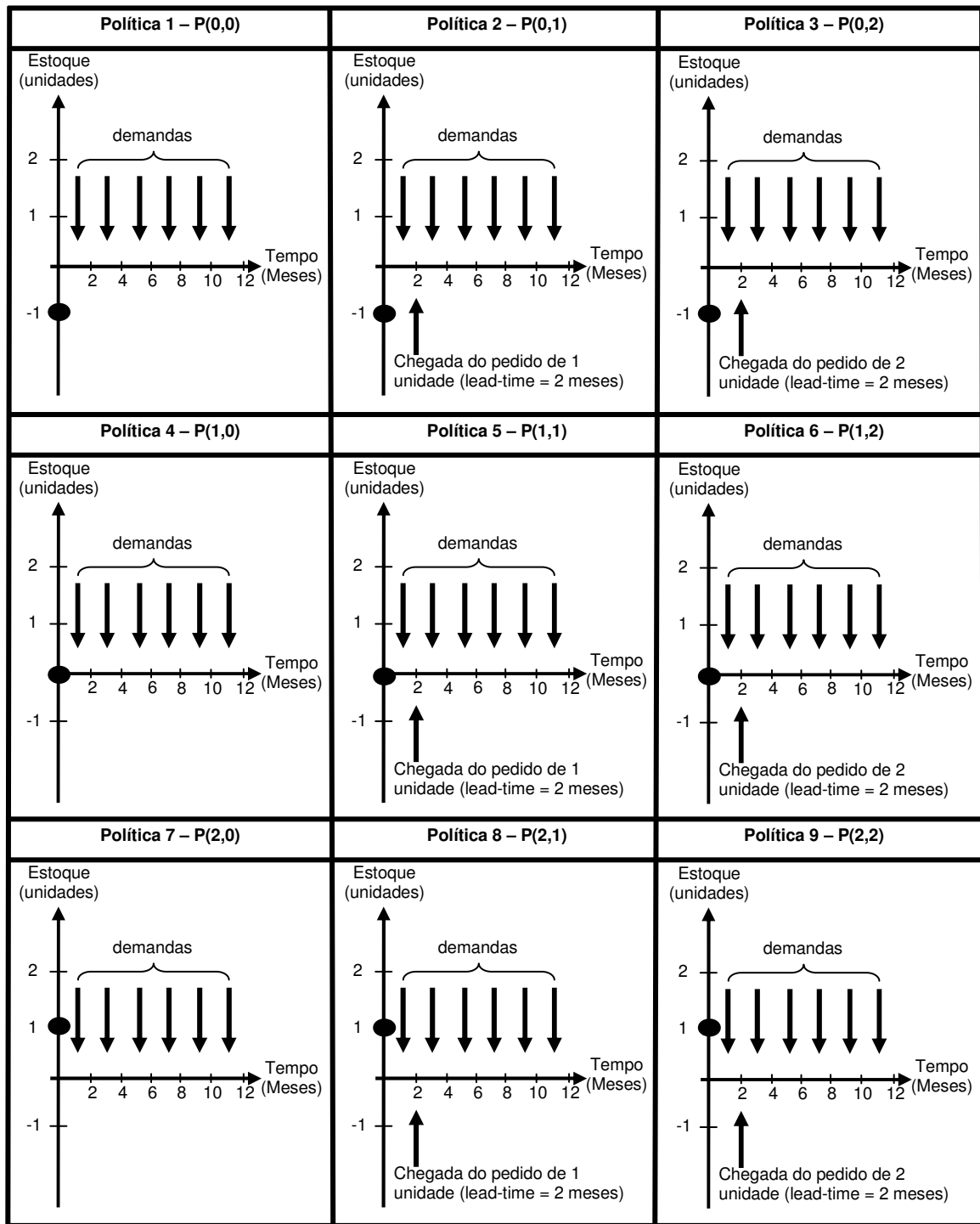


Figura 2 - Políticas de Estocagem

Os três exemplos diferem entre si apenas em relação à demanda. Os demais parâmetros são mantidos constantes. Optou-se por criar tal situação em virtude de testar a premissa de que o modelo é aderente à realidade independentemente das características da demanda. A seguir são apresentados os exemplos com suas respectivas peculiaridades.

2.5.1. Exemplo 1 – Demanda com Base na Distribuição de Poisson

No primeiro exemplo, os elementos representados pelos índices P_{ijk} foram estimados por uma distribuição de Poisson. Neste caso, a distribuição de Poisson fornece a probabilidade da ocorrência de uma determinada demanda em um dado intervalo de tempo (LARSON, 1982). Esta distribuição é definida pela seguinte expressão.

$$P_x(t) = \frac{(\lambda \times t)^x \times e^{-\lambda t}}{x!} \quad (10)$$

t = intervalo de tempo considerado (neste caso, $t=1$);

λ = taxa histórica de consumo das peças de reposição por unidade de tempo;

x = número de ocorrências ou demandas por peças de reposição;

Considerando que P_{ijk} representa a probabilidade de um sistema estar no estado i e passar para o estado j através do número de itens k e que os estados i e j indicam os níveis de estoque no início e no final do período analisado, é possível assumir que P_{ijk} é a probabilidade do nível de estoque de um determinado item se alterar a partir da ação k combinada com uma demanda x , conforme pode ser visto nas expressões abaixo.

$$E_i + k - x = E_j \quad (11)$$

$$E_i - E_j + k = x \quad (12)$$

Portanto, o cálculo de cada um dos elementos P_{ijk} obedece à seguinte lei de formação:

$$\begin{aligned} \text{se } (E_i - E_j + k) < 0 &\Rightarrow P_{ijk} = 0 \\ \text{se não } &\Rightarrow P_{ijk} = P_x = P(E_i - E_j + k) \end{aligned} \quad (13)$$

$$P_{ijk} = P_x = \frac{(\lambda)^x \times e^{-\lambda}}{x!} = P(E_i - E_j + k) = \frac{(\lambda)^{(E_i - E_j + k)} \times e^{-\lambda}}{(E_i - E_j + k)!} \quad (14)$$

E_i = quantidade em estoque no estado i ;

E_j = quantidade em estoque no estado j ;

k = quantidade a ser adquirida de acordo com a ação k ;

x = número de ocorrências ou demandas durante o intervalo;

P_x = Probabilidade de ocorrência de x demandas durante o intervalo;

Sendo assim, no exemplo dado foram obtidos os seguintes valores para P_{ijk} . Cada matriz representa um determinado valor de k . As colunas representam os valores de j enquanto as linhas exibem os valores de i .

Tabela 4 - Valores de P_{ijk} para o exemplo 1

	k = 0			k = 1			k = 2		
	j = 0	j = 1	j = 2	j = 0	j = 1	j = 2	j = 0	j = 1	j = 2
i = 0	1,000	0,000	0,000	0,417	0,583	0,000	0,103	0,315	0,583
i = 1	0,417	0,583	0,000	0,103	0,315	0,583	0,018	0,085	0,897
i = 2	0,103	0,315	0,583	0,018	0,085	0,897	0,002	0,015	0,982

A partir dos dados de P_{ijk} são calculados os custos dos elementos que compõem a função objetivo e estes são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores dos elementos da função objetivo para o exemplo 1

	CRik			Clik			CMik		
	k = 0	k = 1	k = 2	k = 0	k = 1	k = 2	k = 0	k = 1	k = 2
i = 0	0,00	400,00	400,00	7000,00	3600,64	1764,98	0,00	0,00	0,00
i = 1	0,00	400,00	400,00	2920,76	1085,11	589,48	0,00	454,54	1154,54
i = 2	0,00	400,00	400,00	717,97	222,35	133,13	1154,54	1920,81	2699,01

O modelo matemático foi implementado no software Lindo versão 6.1 e encontra-se detalhado no Anexo 1. Os resultados do modelo matemático estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados apresentados pelo modelo matemático para o exemplo 1

	Yik	CRik	Ciik	Cmik	Custo da Política
Política 1 - P(0,0)	0	0	7000	0	0
Política 2 - P(0,1)	0	400	2547	0	0
Política 3 - P(0,2)	1	400	1345	0	1745
Política 4 - P(1,0)	0	0	1656	0	0
Política 5 - P(1,1)	1	400	454	595	1449
Política 6 - P(1,2)	0	400	292	1352	0
Política 7 - P(2,0)	1	0	214	1352	1565
Política 8 - P(2,1)	0	400	51	2130	0
Política 9 - P(2,2)	0	400	37	2909	0

Os resultados apresentados pelo modelo matemático devem ser interpretados tendo em vista a posição de estoque no momento da revisão periódica. Foram apontadas três políticas. Com o sistema em situação de *stockout* ($i = 0$) a melhor resposta é a aquisição de duas unidades (Política 3 – P(0,2)). Entretanto, se o estoque inicial do sistema for igual a zero o modelo matemático indica a aquisição de uma unidade (Política 5 – P(1,1)). Por último, se o sistema estiver com estoque inicial de uma unidade, sugere-se não adquirir outras unidades (Política 7 – P(2,0)).

2.5.2. Exemplo 2 – Demanda com Base na Distribuição Binomial

No segundo exemplo, os elementos representados pelos índices P_{ijk} foram estimados por uma distribuição Binomial (SLOAN, 2004). A distribuição Binomial é útil para representar sistemas onde, para cada teste há dois resultados possíveis, um dos quais é considerado como sucesso e o outro insucesso. Uma das premissas da distribuição Binomial é que os resultados dos testes são independentes entre si (LARSON, 1982). A equação que rege esta distribuição de probabilidades é exibida a seguir.

$$P(x) = C_n^x \times p^x \times q^{n-x} \quad (15)$$

x = número de sucessos

n = número de testes realizados;

p = probabilidade de que o evento se realize em um só teste;

q = probabilidade de que o evento não se realize em um teste;

C_n^x = combinação de x sucessos em n testes;

$P(x)$ = é a probabilidade de que o evento se realize x vezes em n testes;

Considerando-se que o horizonte de análise para escolha da melhor política de estocagem é de 1 ano, definiu-se o número de testes realizados como sendo 12. Em outras palavras, o sistema criado neste exemplo define que em cada mês dentro do período de revisão existe a possibilidade da ocorrência de uma unidade de demanda e que, portanto, durante um ano são possíveis, no máximo doze solicitações ao estoque.

Tomando como base as equações (11), (12) e (13) foi obtida a lei de formação para o cálculo de P_{ijk} que, para este exemplo, é dado conforme a equação a seguir.

$$P_{ijk} = P_x = P(E_i - E_j + k) = C_{12}^{E_i - E_j + k} \times p^{E_i - E_j + k} \times q^{12 - E_i + E_j - k} \quad (16)$$

E_i = quantidade em estoque no estado i ;

E_j = quantidade em estoque no estado j ;

k = quantidade a ser adquirida de acordo com a ação k ;

$n = 12$ = número de meses do ano;

p = probabilidade de ocorrência de uma demanda em um mês;

q = probabilidade da não-ocorrência de uma demanda em um mês;

C_{12}^x = combinação de x demandas em 12 meses;

$P(x)$ = é a probabilidade de que o evento se realize x vezes em 12 meses;

Deste modo, neste exemplo foram obtidos os seguintes valores para P_{ijk} .

Tabela 7 - Valores de P_{ijk} para o exemplo 2

	k = 0			k = 1			k = 2		
	j = 0	j = 1	j = 2	j = 0	j = 1	j = 2	j = 0	j = 1	j = 2
i = 0	1,000	0,000	0,000	0,239	0,761	0,000	0,028	0,211	0,761
i = 1	0,239	0,761	0,000	0,028	0,211	0,761	0,002	0,026	0,972
i = 2	0,028	0,211	0,761	0,002	0,026	0,972	0,000	0,002	0,998

A partir dos dados de P_{ijk} são calculados os custos dos elementos que compõem a função objetivo e estes são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores dos elementos da função objetivo para o exemplo 2

	CRik			Clk			CMik		
	k = 0	k = 1	k = 2	k = 0	k = 1	k = 2	k = 0	k = 1	k = 2
i = 0	0,00	400,00	400,00	2000,00	732,41	380,67	0,00	0,00	0,00
i = 1	0,00	400,00	400,00	478,90	127,15	83,23	0,00	593,23	1538,94
i = 2	0,00	400,00	400,00	56,80	12,88	9,63	1351,08	2339,22	3100,46

O modelo matemático foi implementado no software Lindo versão 6.1 e encontra-se detalhado no Anexo 2. Os resultados do modelo matemático estão apresentados na tabela a seguir.

Tabela 9 - Resultados apresentados pelo modelo matemático para o exemplo 2

	Y _{ik}	CR _{ik}	Ci _{ik}	Cm _{ik}	Custo da Política
Política 1 - P(0,0)	0	0	2000	0	0
Política 2 - P(0,1)	0	400	732	0	0
Política 3 - P(0,2)	1	400	381	0	781
Política 4 - P(1,0)	0	0	479	0	0
Política 5 - P(1,1)	1	400	127	593	1120
Política 6 - P(1,2)	0	400	83	1539	0
Política 7 - P(2,0)	1	0	57	1351	1408
Política 8 - P(2,1)	0	400	13	2339	0
Política 9 - P(2,2)	0	400	10	3100	0

As políticas ótimas para o segundo exemplo foram as mesmas apontadas pelo modelo matemático considerando a demanda baseada na distribuição de Poisson.

2.5.3. Exemplo 3 – Demanda com base na Distribuição Discreta

No último exemplo, os elementos representados pelos índices P_{ijk} foram estimados por uma distribuição Discreta. Esta distribuição representa a probabilidade da ocorrência de x eventos em um determinado intervalo de tempo (PALISADE CORPORATION, 2002). A equação que representa a distribuição Discreta é exibida a seguir.

$$P(x_d) = p_d \quad (17)$$

x_d = número de eventos

p_d = probabilidade da ocorrência de x_d eventos em um dado intervalo de tempo;

Tomando como base as equações (11), (12) e (13) foi obtida a lei de formação para o cálculo de P_{ijk} que, para este exemplo, é dado conforme a equação a seguir.

$$P_{ijk} = P_x = P(E_i - E_j + k) = p_{E_i - E_j + k} \quad (18)$$

E_i = quantidade em estoque no estado i ;

E_j = quantidade em estoque no estado j ;

k = quantidade a ser adquirida de acordo com a ação k ;

p_d = probabilidade de ocorrência de x_d demandas em um ano;

Deste modo, neste exemplo foram obtidos os seguintes valores para P_{ijk} .

Tabela 10 - Valores de P_{ijk} para o exemplo 3

	k = 0			k = 1			k = 2		
	j = 0	j = 1	j = 2	j = 0	j = 1	j = 2	j = 0	j = 1	j = 2
i = 0	1,000	0,000	0,000	0,248	0,753	0,000	0,045	0,203	0,753
i = 1	0,248	0,753	0,000	0,045	0,203	0,753	0,009	0,036	0,955
i = 2	0,045	0,203	0,753	0,009	0,036	0,955	0,000	0,009	0,991

A partir dos dados de P_{ijk} são calculados os custos dos elementos que compõem a função objetivo e estes são mostrados na tabela abaixo.

Tabela 11 - Valores dos elementos da função objetivo para o exemplo 3

	CR _{ik}			C _{ik}			CM _{ik}		
	k = 0	k = 1	k = 2	k = 0	k = 1	k = 2	k = 0	k = 1	k = 2
i = 0	0,00	400,00	400,00	7000,00	2610,42	1429,17	0,00	0,00	0,00
i = 1	0,00	400,00	400,00	1732,50	551,25	341,25	0,00	586,95	1351,64
i = 2	0,00	400,00	400,00	315,00	105,00	52,50	1331,85	2135,92	2914,47

O modelo matemático foi implementado no software Lindo versão 6.1 e encontra-se detalhado no Anexo 3. Os resultados do modelo matemático estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultados apresentados pelo modelo matemático para o exemplo 3

	Y _{ik}	CR _{ik}	C _{ik}	Cm _{ik}	Custo da Política
Política 1 - P(0,0)	0	0	7000	0	0
Política 2 - P(0,1)	0	400	2610	0	0
Política 3 - P(0,2)	1	400	1429	0	1829
Política 4 - P(1,0)	0	0	1733	0	0
Política 5 - P(1,1)	1	400	551	587	1538
Política 6 - P(1,2)	0	400	341	1352	0
Política 7 - P(2,0)	1	0	315	1332	1647
Política 8 - P(2,1)	0	400	105	2136	0
Política 9 - P(2,2)	0	400	53	2914	0

As políticas ótimas para o terceiro exemplo foram as mesmas apontadas pelo modelo matemático para os outros dois exemplos.

Capítulo 3 – Validação Modelo Matemático

Após a análise dos resultados obtidos com a aplicação do modelo matemático para os três exemplos iniciou-se o processo de validação do modelo. A validação do modelo matemático será dada através de duas técnicas de pesquisa operacional: simulação e análise de sensibilidade. A análise de sensibilidade permitirá avaliar a robustez do modelo, ou seja, indicará a oscilação da resposta fornecida pelo modelo matemático para cada variação nos valores dos inputs do modelo.

A simulação é uma técnica que permite avaliar a aderência do modelo de otimização à realidade como pode ser visto em GARCIA, SILVA e SALIBY (2002). Esta técnica consiste em modelar uma determinada realidade utilizando variáveis aleatórias representadas por distribuições estatísticas. Após a modelagem do sistema, é gerado um número elevado de cenários combinando as inúmeras incertezas do sistema. Ao final colhem-se as estatísticas das variáveis investigadas e são calculados os intervalos de confiança para as mesmas.

3.1. Validação através de Modelos de Simulação

No presente documento, a técnica de simulação foi utilizada para validar os custos das políticas de estocagem apontados pelo modelo matemático. Foi utilizado como método de amostragem o de Monte Carlo (HAMMERSLEY e HANDSCOMB, 1964).

Para os exemplos ilustrativos, o modelo de simulação construído foi composto por 9 cenários distintos, cada um representando uma das políticas de estocagem previstas, conforme a Tabela 3.

Para cada cenário, o modelo consistiu na reprodução de um ciclo da curva de estocagem do item em questão e na aferição do custo total da respectiva política de proposta. A equação básica do modelo é dada pela equação a seguir.

$$E_f = E_i + x - k \quad (19)$$

E_i = Estoque Inicial;

E_f = Estoque Final;

k = Quantidade ressuprida;

x = Demanda no período.

O custo da política de estoque e de seus elementos são dados pelas respectivas expressões abaixo.

$$Custo_{total} = Custo_{ressuprimento} + Custo_{indisponibilidade} + Custo_{manutenção\ de\ estoque} \quad (20)$$

$$Custo_{ressuprimento} \quad \begin{array}{l} se\ k > 0 \Rightarrow Custo_{ressuprimento} = cr \\ se\ não \Rightarrow Custo_{ressuprimento} = 0 \end{array} \quad (21)$$

$$Custo_{indisponibilidade} \quad \begin{array}{l} se\ (E_i - x + k) < 0 \Rightarrow Custo_{indisponibilidade} = ci \\ se\ não \Rightarrow Custo_{indisponibilidade} = 0 \end{array} \quad (22)$$

$$Custo_{manutenção\ de\ estoque} \quad \begin{array}{l} se\ (\frac{E_i + E_f}{2}) > 0 \Rightarrow Custo_{manutenção\ de\ estoque} = ca \times (\frac{E_i + E_f}{2}) \\ se\ não \Rightarrow Custo_{manutenção\ de\ estoque} = 0 \end{array} \quad (23)$$

Os inputs das políticas são o estoque inicial e a quantidade ressuprida. A demanda do período é uma variável aleatória modelada conforme cada um dos três exemplos.

De acordo com BANKS (1995), em cada projeto de simulação é necessário decidir previamente a respeito do tamanho do processo de *warm up*, do número de corridas e do número de iterações em cada corrida. Portanto, para cada um dos exemplos, a simulação foi estruturada em 40 corridas com 100 iterações cada. Não foi necessário utilizar o processo de *warm-up*, pois, os resultados das iterações são independentes entre si (SILVA, GARCIA e SALIBY, 2002). Ao final, para cada um dos cenários foram obtidos os seguintes resultados.

3.1.1. Resultados da Simulação com Base no Exemplo 1

Tabela 13 - Exemplo 1: corridas 1 a 10

Valores Médios por Cenário										
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Corrida 4	Corrida 5	Corrida 6	Corrida 7	Corrida 8	Corrida 9	Corrida 10
Cenário 1	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000
Cenário 2	3025	3083	3083	2792	2850	2442	2500	2617	3142	2558
Cenário 3	1742	1742	1625	2033	1742	1917	1800	1742	1683	1625
Cenário 4	1190	1260	1470	1890	1820	1610	1260	1540	1750	1750
Cenário 5	1459	1378	1261	1393	1405	1389	1393	1436	1386	1370
Cenário 6	2037	2033	2010	2025	2049	2021	2092	2072	2006	2033
Cenário 7	1567	1591	1622	1536	1691	1489	1847	1684	1489	1490
Cenário 8	2584	2592	2486	2549	2584	2670	2638	2572	2560	2607
Cenário 9	3317	3333	3317	3325	3379	3364	3356	3325	3379	3356

Tabela 14 - Exemplo 1: corridas 11 a 20

Valores Médios por Cenário										
	Corrida 11	Corrida 12	Corrida 13	Corrida 14	Corrida 15	Corrida 16	Corrida 17	Corrida 18	Corrida 19	Corrida 20
Cenário 1	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000
Cenário 2	3375	3142	3258	3083	2733	3025	3025	3317	3083	2967
Cenário 3	1742	1625	1742	1800	1683	1800	1625	1683	1742	1683
Cenário 4	1400	1680	1750	1120	1750	1820	1400	1400	1470	1890
Cenário 5	1320	1378	1572	1292	1502	1374	1378	1498	1320	1522
Cenário 6	2026	2057	2018	2064	2025	2072	2072	2099	2057	2033
Cenário 7	1575	1404	1653	1590	1528	1785	1707	1692	1552	1489
Cenário 8	2662	2564	2623	2627	2665	2654	2603	2549	2568	2666
Cenário 9	3372	3325	3309	3282	3391	3376	3274	3313	3341	3372

Tabela 15 - Exemplo 1: corridas 21 a 30

Valores Médios por Cenário										
	Corrida 21	Corrida 22	Corrida 23	Corrida 24	Corrida 25	Corrida 26	Corrida 27	Corrida 28	Corrida 29	Corrida 30
Cenário 1	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000
Cenário 2	2850	3317	2908	2675	3200	3258	2850	3433	2850	2558
Cenário 3	1800	1742	1683	1683	1683	1858	1683	1742	1800	1917
Cenário 4	1680	1750	1890	1960	1680	1610	1890	1680	1820	1890
Cenário 5	1689	1510	1273	1467	1428	1506	1444	1355	1285	1456
Cenário 6	2010	2057	2072	2033	2049	2025	2041	2037	2025	2006
Cenário 7	1521	1692	1567	1590	1458	1513	1443	1295	1668	1598
Cenário 8	2634	2564	2611	2560	2568	2580	2623	2592	2576	2603
Cenário 9	3301	3282	3348	3387	3290	3379	3344	3368	3317	3337

Tabela 16 - Exemplo 1: corridas 31 a 40

Valores Médios por Cenário										
	Corrida 31	Corrida 32	Corrida 33	Corrida 34	Corrida 35	Corrida 36	Corrida 37	Corrida 38	Corrida 39	Corrida 40
Cenário 1	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000
Cenário 2	2675	2675	2850	3025	3258	3025	2908	3025	2792	3025
Cenário 3	1683	1625	1683	1567	1742	1742	1800	1742	1625	1742
Cenário 4	1540	1960	1400	1540	2100	1960	910	1260	1470	1680
Cenário 5	1568	1389	1529	1389	1599	1304	1495	1316	1607	1611
Cenário 6	2006	2099	2029	2033	2056	2037	2057	2037	2045	2006
Cenário 7	1536	1598	1622	1482	1614	1505	1622	1591	1715	1482
Cenário 8	2595	2588	2537	2572	2615	2576	2580	2533	2568	2728
Cenário 9	3341	3375	3309	3325	3372	3282	3356	3313	3376	3372

A seguir são apresentados os gráficos correspondentes aos resultados das 40 corridas para os 9 cenários.

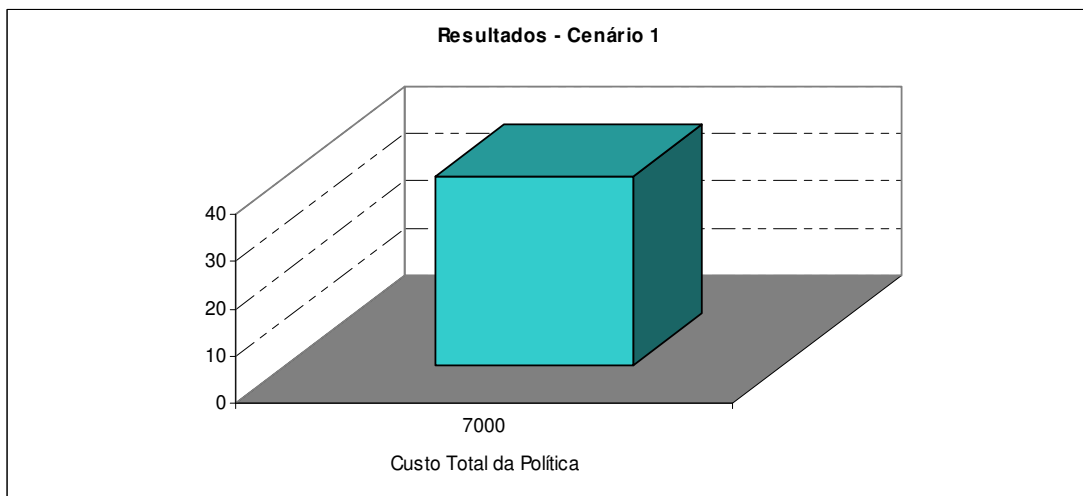


Gráfico 1 - Exemplo 1: custo total do cenário 1

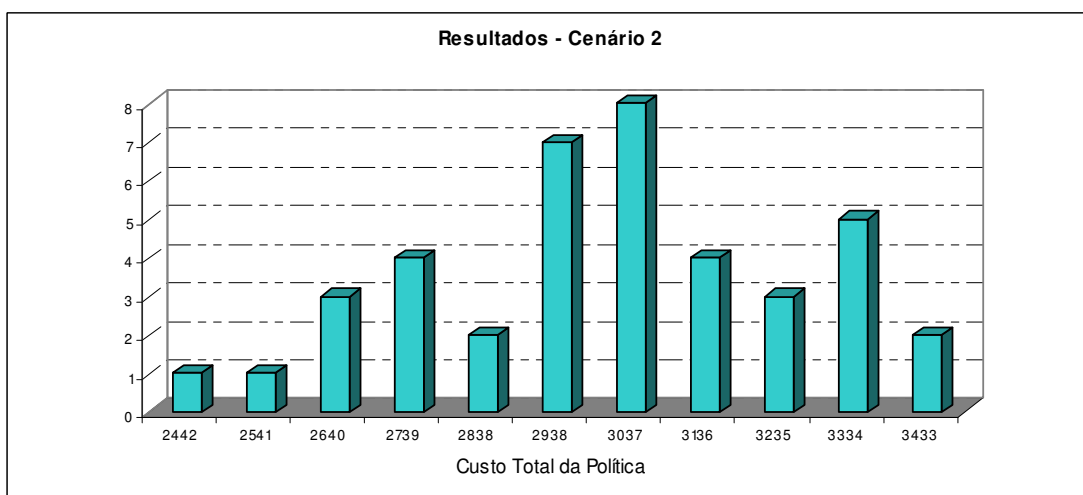


Gráfico 2 - Exemplo 1: custo total do cenário 2

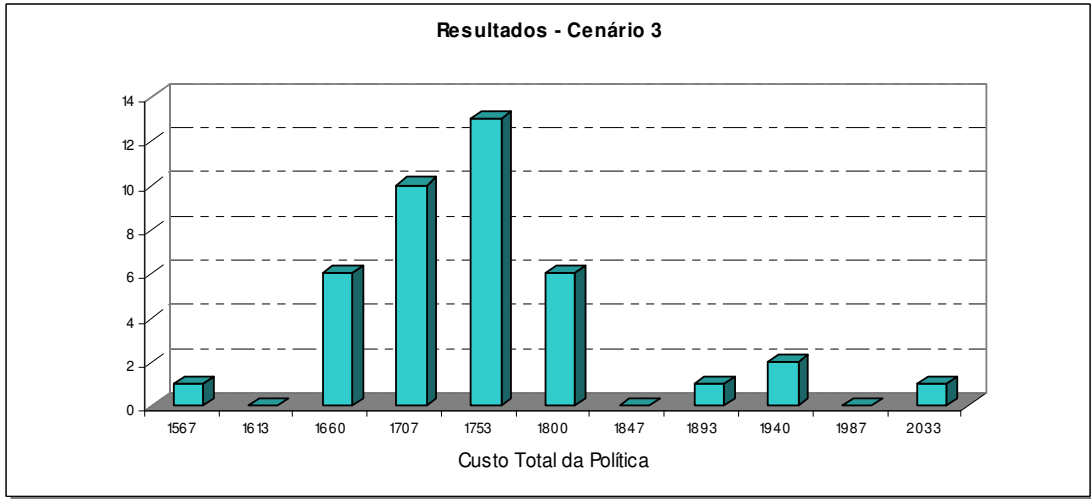


Gráfico 3 - Exemplo 1: custo total do cenário 3

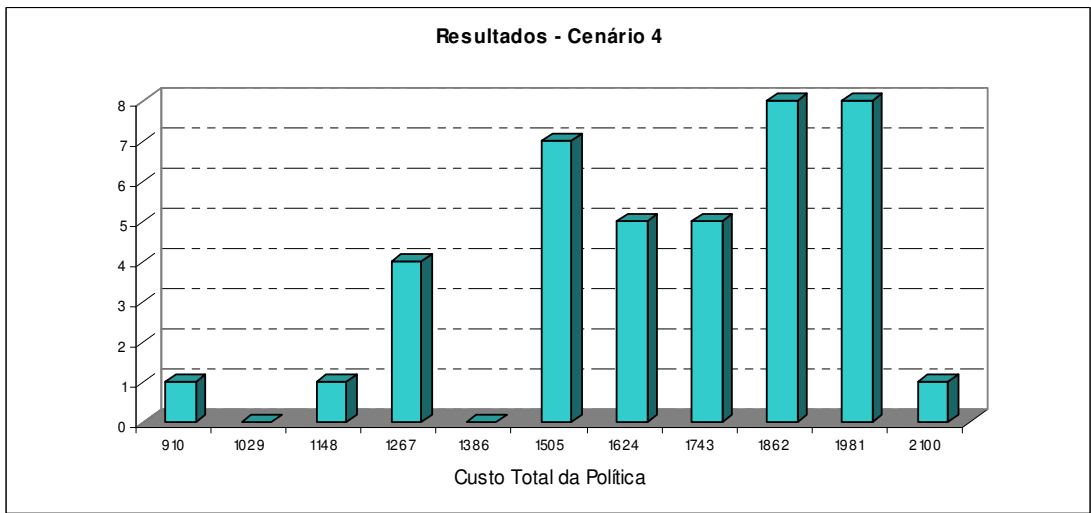


Gráfico 4 - Exemplo 1: custo total do cenário 4

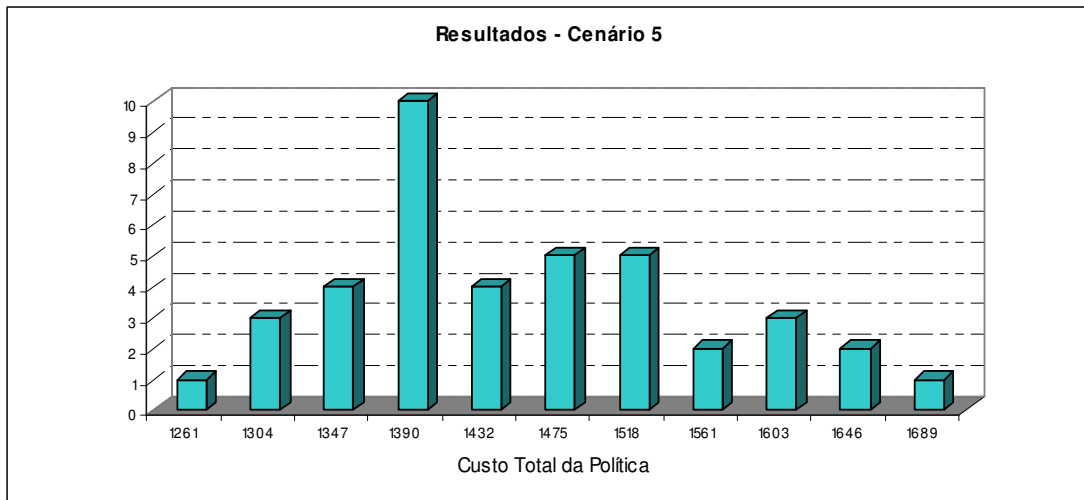


Gráfico 5 - Exemplo 1: custo total do cenário 5

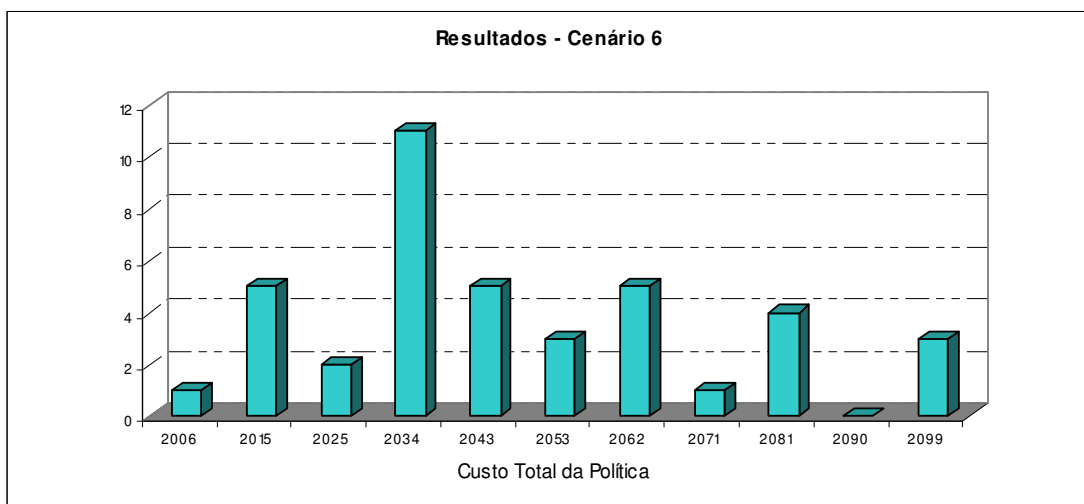


Gráfico 6 - Exemplo 1: custo total do cenário 6

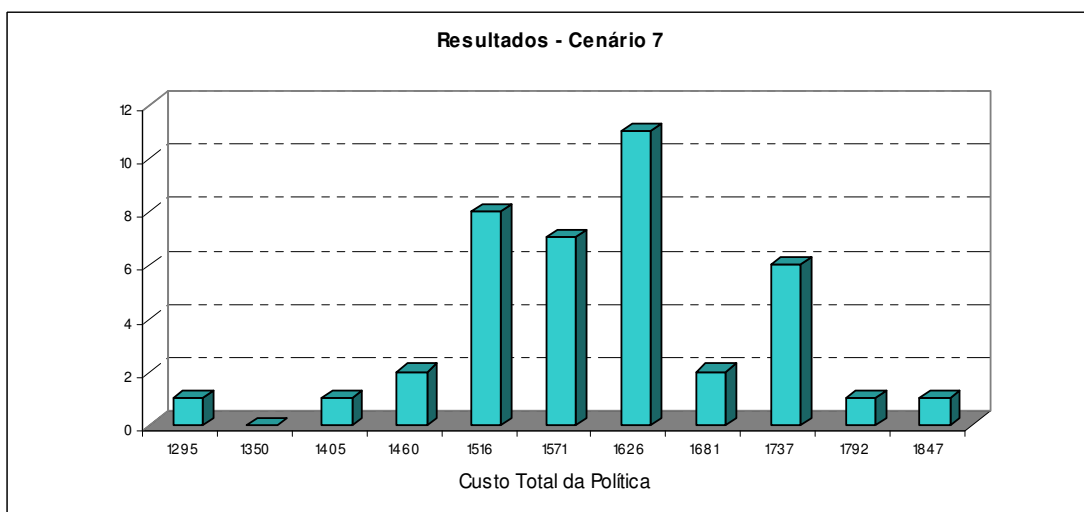


Gráfico 7 - Exemplo 1: custo total do cenário 7

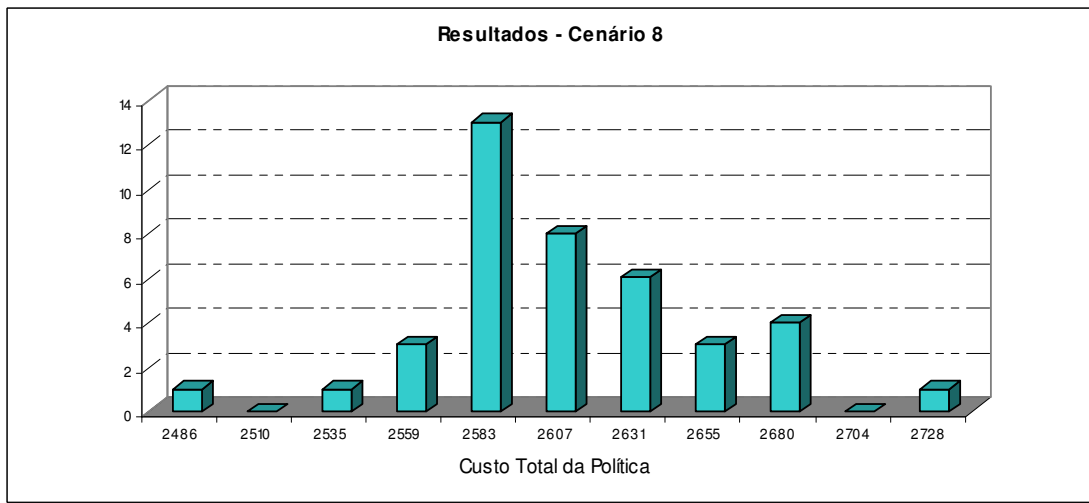


Gráfico 8 - Exemplo 1: custo total do cenário 8

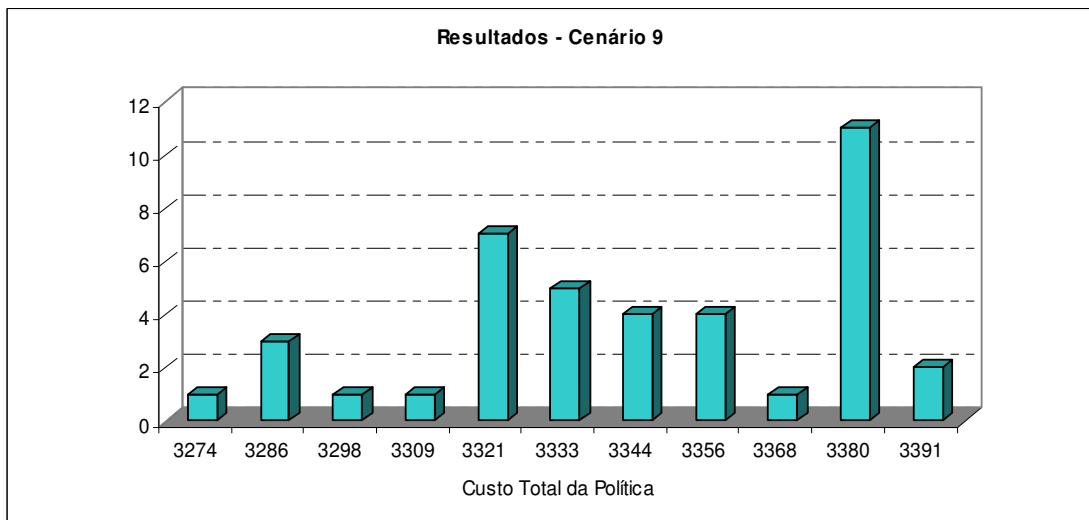


Gráfico 9 - Exemplo 1: custo total do cenário 9

O gráfico abaixo mostra a comparação entre os custos médios dos cenários testados.

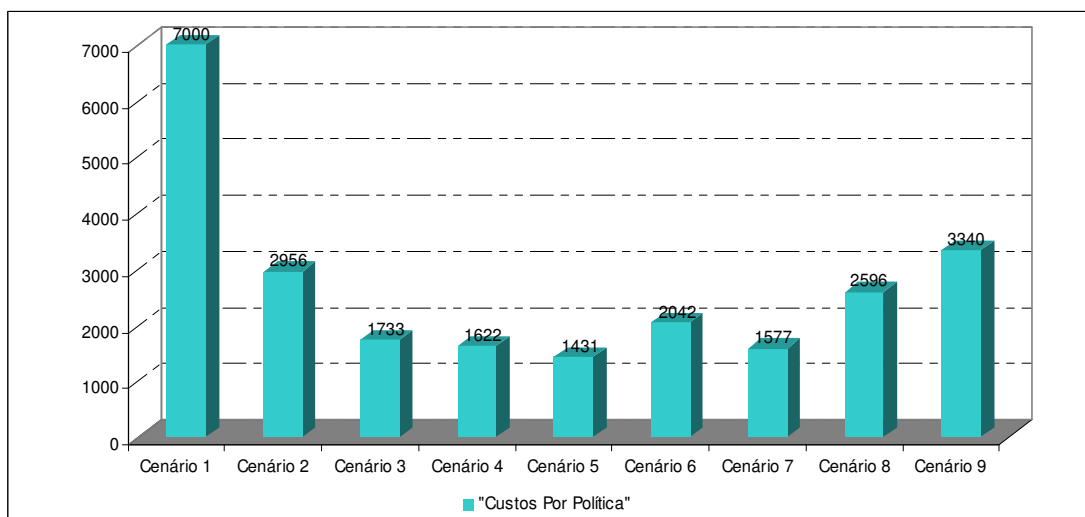


Gráfico 10 - Exemplo 1: comparativo de custos entre os cenários analisados

3.1.2. Resultados da Simulação com Base no Exemplo 2

Tabela 17 - Exemplo 2: corridas 1 a 10

Valores Médios por Cenário										
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Corrida 4	Corrida 5	Corrida 6	Corrida 7	Corrida 8	Corrida 9	Corrida 10
Cenário 1	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000
Cenário 2	3375	3317	3492	3492	3258	3200	3258	3200	3608	2967
Cenário 3	1683	1625	1742	1683	1742	1742	1683	1742	1800	1800
Cenário 4	2520	1540	2100	1960	2170	1960	1960	2100	1610	1820
Cenário 5	1588	1300	1592	1397	1331	1561	1506	1572	1459	1343
Cenário 6	2076	2119	2013	2029	2045	2057	2103	2126	2080	2057
Cenário 7	1598	1653	1754	1591	1443	1901	1785	1575	1645	1559
Cenário 8	2689	2517	2541	2580	2518	2560	2545	2541	2599	2564
Cenário 9	3274	3376	3301	3344	3329	3270	3286	3278	3321	3266

Tabela 18 - Exemplo 2: corridas 11 a 20

Valores Médios por Cenário										
	Corrida 11	Corrida 12	Corrida 13	Corrida 14	Corrida 15	Corrida 16	Corrida 17	Corrida 18	Corrida 19	Corrida 20
Cenário 1	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000
Cenário 2	3258	2967	3317	3608	3200	3200	2850	3667	3200	3258
Cenário 3	1917	1858	1917	1625	1800	1683	1742	1917	1683	1800
Cenário 4	1750	1470	1610	2310	1680	2240	1960	2100	2590	2100
Cenário 5	1440	1397	1712	1323	1529	1343	1343	1759	1514	1389
Cenário 6	2057	2014	2037	2068	2033	2025	2053	2064	2064	2092
Cenário 7	1567	1583	1513	1668	1567	1474	1684	1637	1590	1598
Cenário 8	2486	2510	2510	2506	2541	2537	2685	2560	2533	2549
Cenário 9	3352	3356	3379	3274	3321	3294	3270	3301	3325	3325

Tabela 19 - Exemplo 2: corridas 21 a 30

Valores Médios por Cenário										
	Corrida 21	Corrida 22	Corrida 23	Corrida 24	Corrida 25	Corrida 26	Corrida 27	Corrida 28	Corrida 29	Corrida 30
Cenário 1	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000
Cenário 2	2967	2675	2908	3492	2792	3025	3317	3317	3842	3083
Cenário 3	1683	1800	1858	1683	1800	1742	1800	2033	1858	1917
Cenário 4	2100	1890	1960	2730	2170	2730	1890	1680	1400	2030
Cenário 5	1448	1467	1389	1475	1627	1405	1401	1759	1646	1631
Cenário 6	2107	2037	2029	2103	2037	2029	2033	2049	2103	2041
Cenário 7	1450	1536	1731	1489	1489	1513	1466	1738	1699	1505
Cenário 8	2490	2506	2681	2549	2533	2607	2514	2634	2518	2584
Cenário 9	3352	3317	3305	3266	3341	3313	3278	3309	3301	3344

Tabela 20 - Exemplo 2: corridas 31 a 40

Valores Médios por Cenário										
	Corrida 31	Corrida 32	Corrida 33	Corrida 34	Corrida 35	Corrida 36	Corrida 37	Corrida 38	Corrida 39	Corrida 40
Cenário 1	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000
Cenário 2	2908	3025	3142	3083	3433	3025	2967	3200	3783	2967
Cenário 3	1625	1742	2033	1742	1683	1800	1683	1975	1800	1858
Cenário 4	2240	1750	1750	1610	2170	1890	2030	1750	1960	1750
Cenário 5	1479	1506	1405	1638	1339	1498	1459	1607	1397	1459
Cenário 6	2060	2068	2014	2053	2045	2060	2037	2060	2002	2099
Cenário 7	1489	1583	1544	1692	1474	1707	1723	1567	1342	1699
Cenário 8	2576	2556	2553	2572	2440	2545	2525	2502	2502	2545
Cenário 9	3274	3305	3305	3340	3372	3383	3290	3290	3333	3317

A seguir são apresentados os gráficos correspondentes aos resultados das 40 corridas para os 9 cenários do exemplo 2.

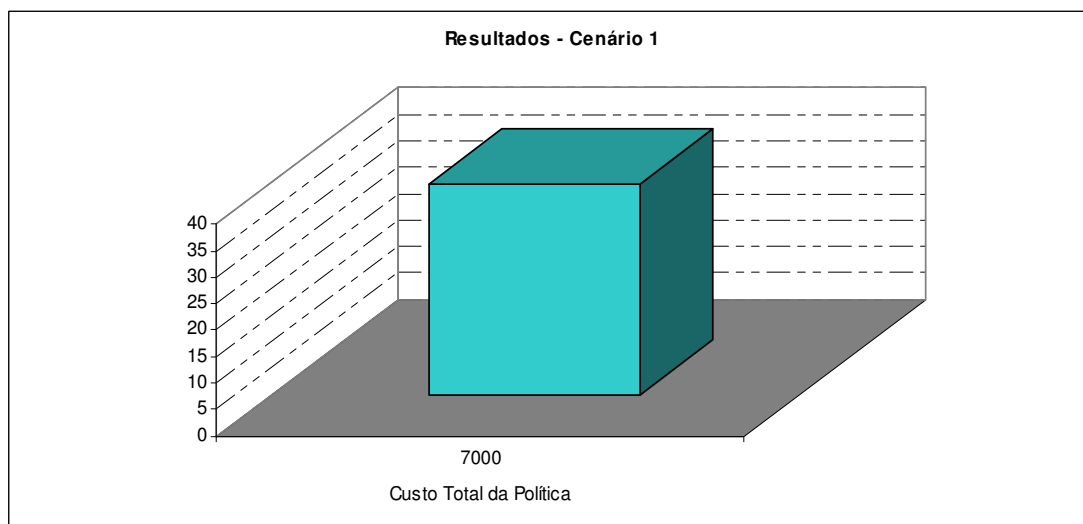


Gráfico 11 - Exemplo 2: custo total do cenário 1

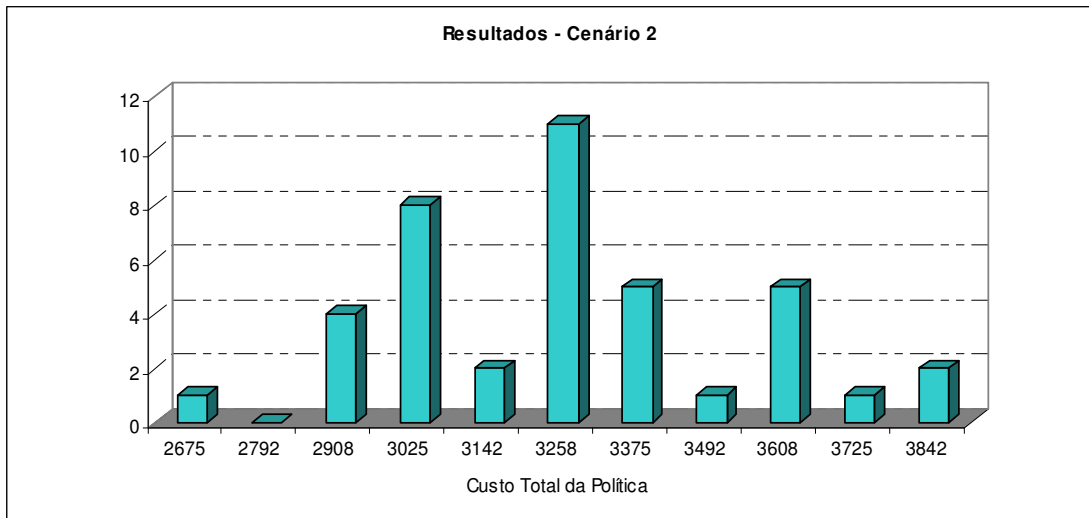


Gráfico 12 - Exemplo 2: custo total do cenário 2

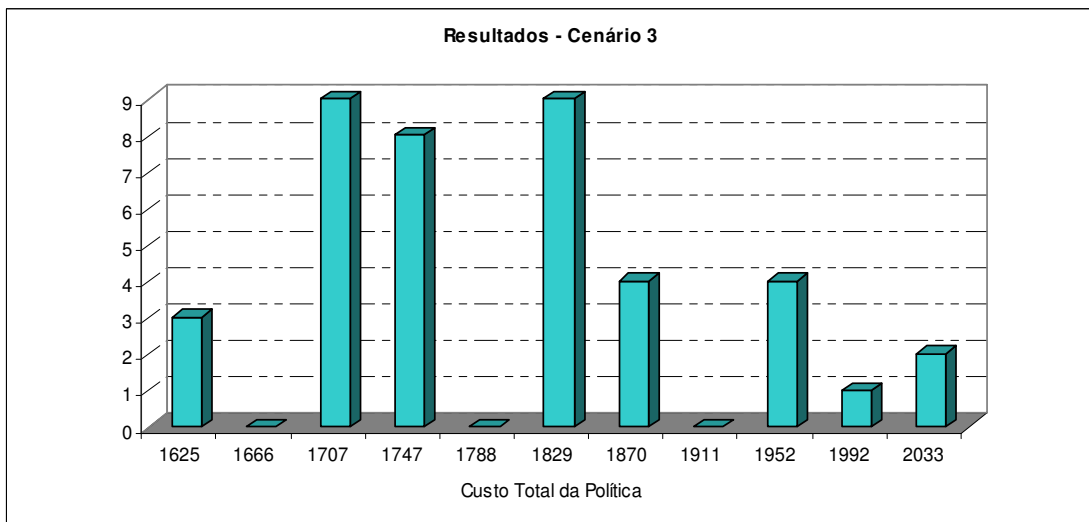


Gráfico 13 - Exemplo 2: custo total do cenário 3

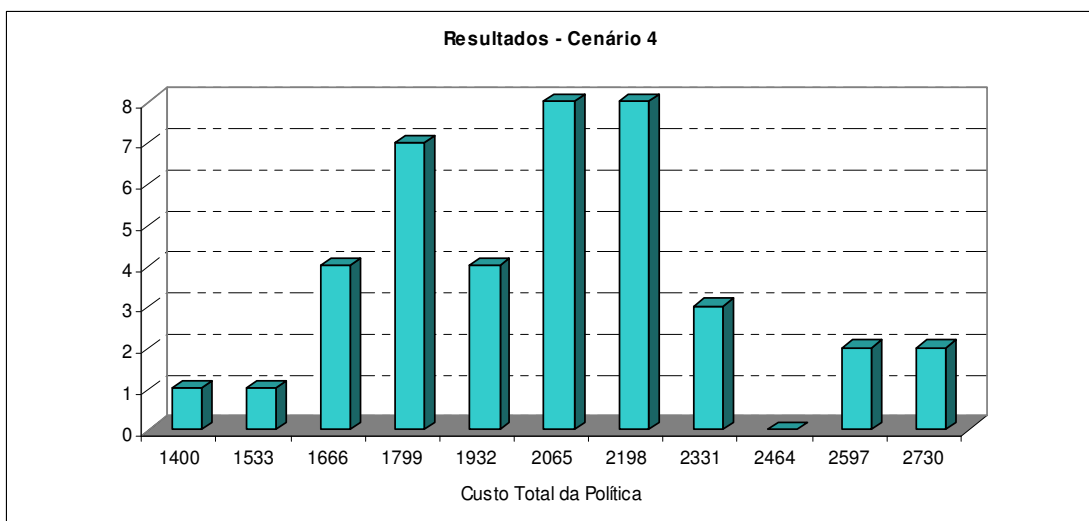


Gráfico 14 - Exemplo 2: custo total do cenário 4

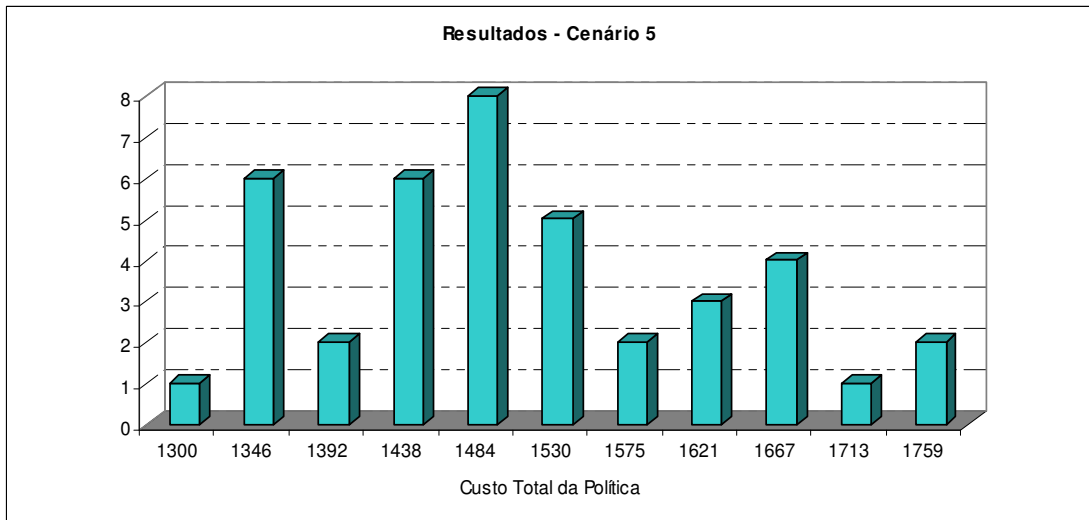


Gráfico 15 - Exemplo 2: custo total do cenário 5

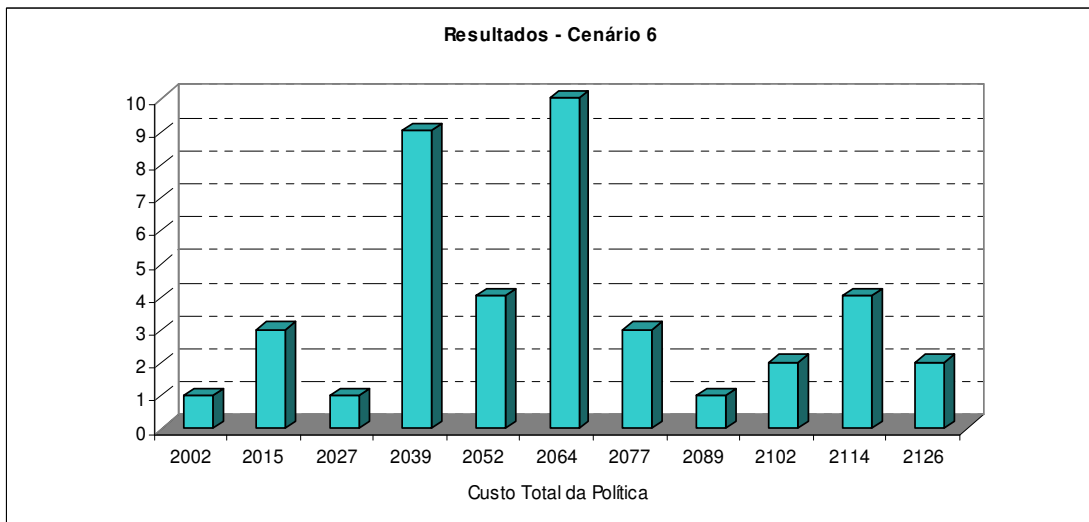


Gráfico 16 - Exemplo 2: custo total do cenário 6

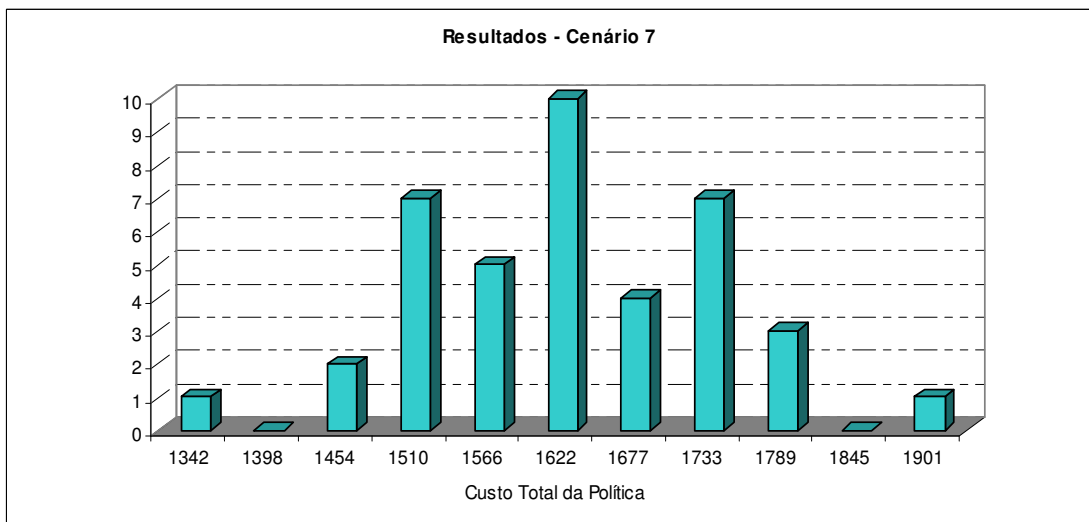


Gráfico 17 - Exemplo 2: custo total do cenário 7

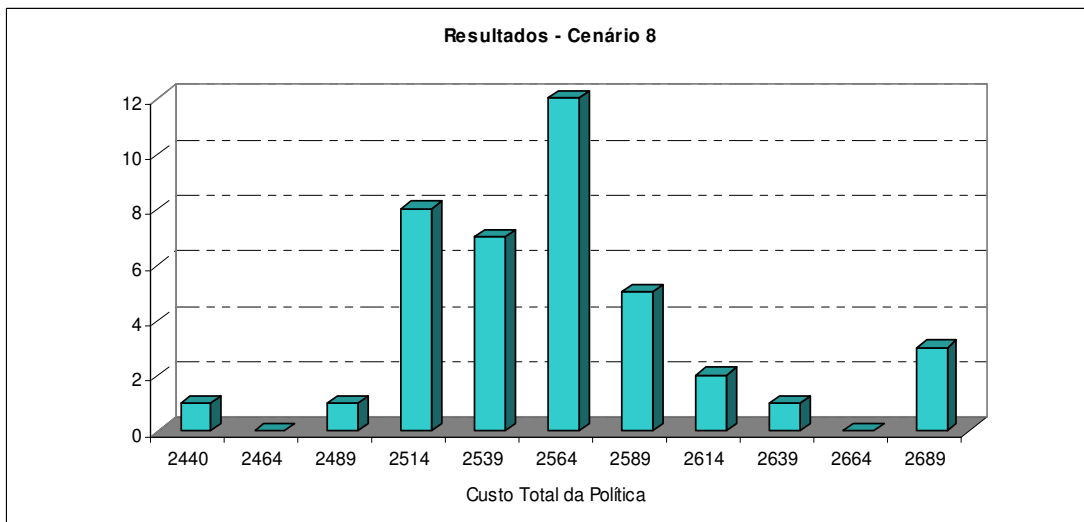


Gráfico 18 - Exemplo 2: custo total do cenário 8

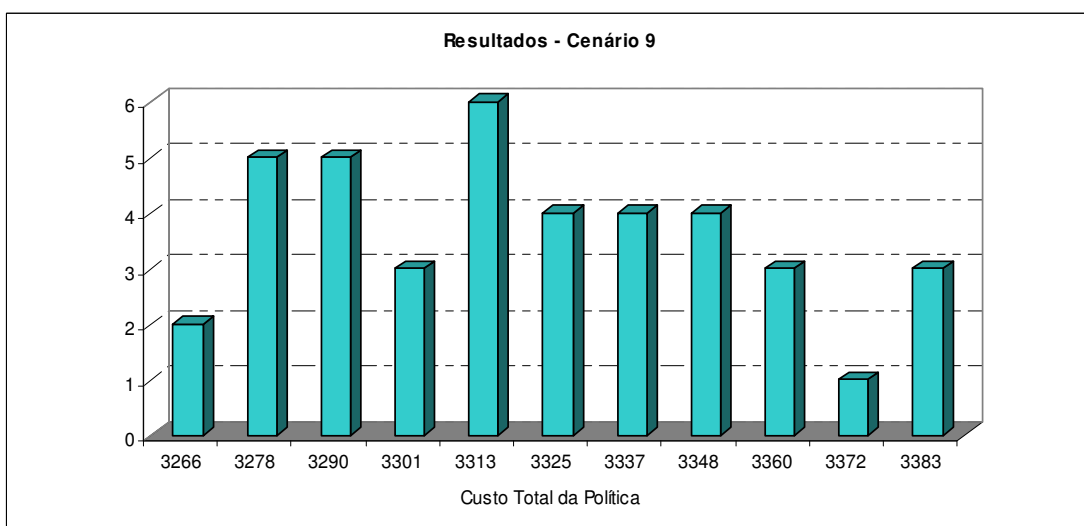


Gráfico 19 - Exemplo 2: custo total do cenário 9

O gráfico abaixo mostra a comparação entre os custos médios dos cenários testados para o exemplo 2.

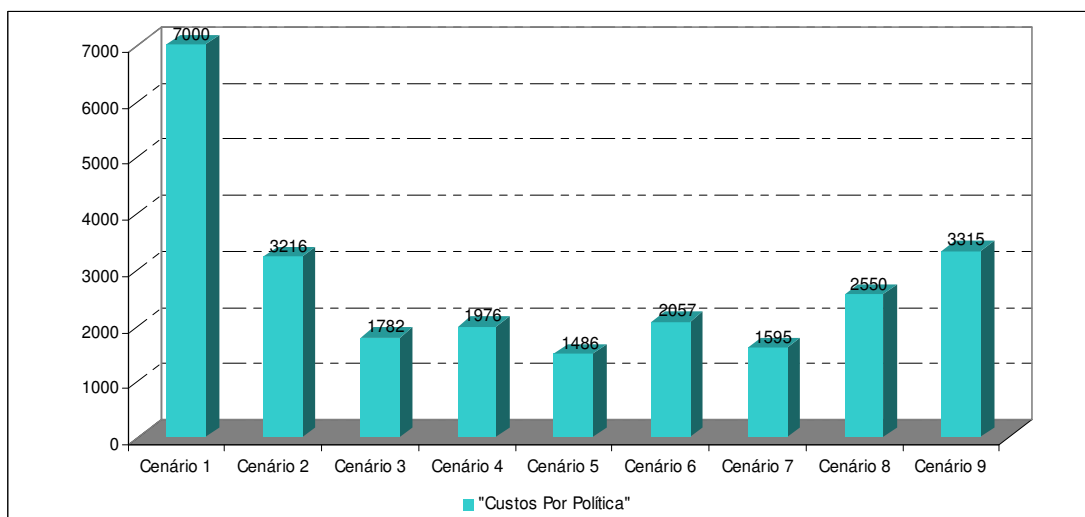


Gráfico 20 - Exemplo 2: comparativo de custos entre os cenários analisados

3.1.3. Resultados da Simulação com Base no Exemplo 3

Tabela 21 - Exemplo 3: corridas 1 a 10

Valores Médios por Cenário										
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Corrida 4	Corrida 5	Corrida 6	Corrida 7	Corrida 8	Corrida 9	Corrida 10
Cenário 1	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000
Cenário 2	3900	3433	3317	3608	4075	3492	3433	3433	3375	3375
Cenário 3	2208	2267	2383	2208	2092	1975	2033	2150	2092	2033
Cenário 4	2380	2940	2660	2800	2170	2380	2100	2450	2170	2240
Cenário 5	2011	2334	1797	1638	1716	2287	1953	1953	2206	1697
Cenário 6	2095	2087	2080	2041	2220	2118	2029	2041	2072	2037
Cenário 7	1995	1855	2119	1862	2445	2165	1854	1715	2010	1855
Cenário 8	2630	2603	2557	2646	2599	2587	2712	2509	2591	2774
Cenário 9	3223	3258	3196	3235	3270	3321	3286	3282	3251	3223

Tabela 22 - Exemplo 3: corridas 11 a 20

Valores Médios por Cenário										
	Corrida 11	Corrida 12	Corrida 13	Corrida 14	Corrida 15	Corrida 16	Corrida 17	Corrida 18	Corrida 19	Corrida 20
Cenário 1	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000
Cenário 2	3958	3025	3608	3667	3783	3783	3083	3375	3550	3958
Cenário 3	2208	2092	1742	2267	2558	1975	1975	2208	2267	2208
Cenário 4	2730	1890	2310	1890	2170	2170	2870	2310	2170	2940
Cenário 5	2058	1623	2105	1844	1938	1875	1778	2194	2136	1720
Cenário 6	2029	2192	2223	2122	2091	2165	2099	2107	2064	2177
Cenário 7	1847	2127	2135	2142	1824	1987	1971	1785	1653	2002
Cenário 8	2560	2525	2529	2584	2576	2684	2649	2576	2506	2653
Cenário 9	3321	3266	3305	3235	3325	3235	3297	3219	3243	3290

Tabela 23 - Exemplo 3: corridas 21 a 30

Valores Médios por Cenário										
	Corrida 21	Corrida 22	Corrida 23	Corrida 24	Corrida 25	Corrida 26	Corrida 27	Corrida 28	Corrida 29	Corrida 30
Cenário 1	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000
Cenário 2	3550	3142	3725	3375	4017	3608	3900	3433	3667	3375
Cenário 3	2325	2208	2033	2092	2267	2500	2150	2267	2267	2033
Cenário 4	2590	2800	2730	3570	2590	2450	1890	2730	2450	2660
Cenário 5	1592	2089	1770	1595	1809	2136	2272	2074	2089	1829
Cenário 6	2119	2107	2064	2165	2068	2130	2087	2061	2192	2072
Cenário 7	1816	1917	1870	1761	1917	1971	1870	1855	2033	1816
Cenário 8	2595	2661	2541	2634	2642	2642	2630	2591	2564	2615
Cenário 9	3219	3266	3266	3293	3254	3196	3301	3321	3270	3294

Tabela 24 - Exemplo 3: corridas 31 a 40

Valores Médios por Cenário										
	Corrida 31	Corrida 32	Corrida 33	Corrida 34	Corrida 35	Corrida 36	Corrida 37	Corrida 38	Corrida 39	Corrida 40
Cenário 1	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000
Cenário 2	3667	3550	3258	3608	3783	3258	3550	3025	3667	3375
Cenário 3	2558	2092	2267	2267	1917	2033	2092	2325	2267	1917
Cenário 4	2730	2940	2940	2800	2590	2380	2520	2660	3220	2800
Cenário 5	2004	1833	1860	2202	1836	2159	1864	2039	2023	1899
Cenário 6	2111	2251	2076	2064	1998	2119	2060	2192	2157	2021
Cenário 7	1699	2080	1761	1940	1816	1800	2065	2088	1917	1971
Cenário 8	2669	2708	2611	2649	2677	2843	2587	2615	2560	2692
Cenário 9	3297	3278	3266	3297	3243	3274	3211	3270	3313	3340

A seguir são apresentados os gráficos correspondentes aos resultados das 40 corridas para os 9 cenários do exemplo 3.

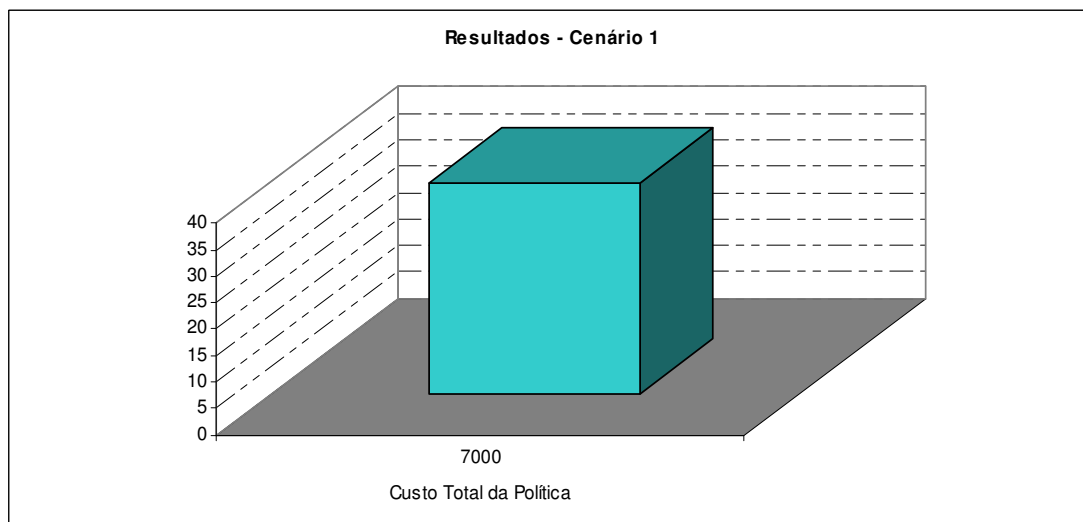


Gráfico 21 - Exemplo 3: custo total do cenário 1

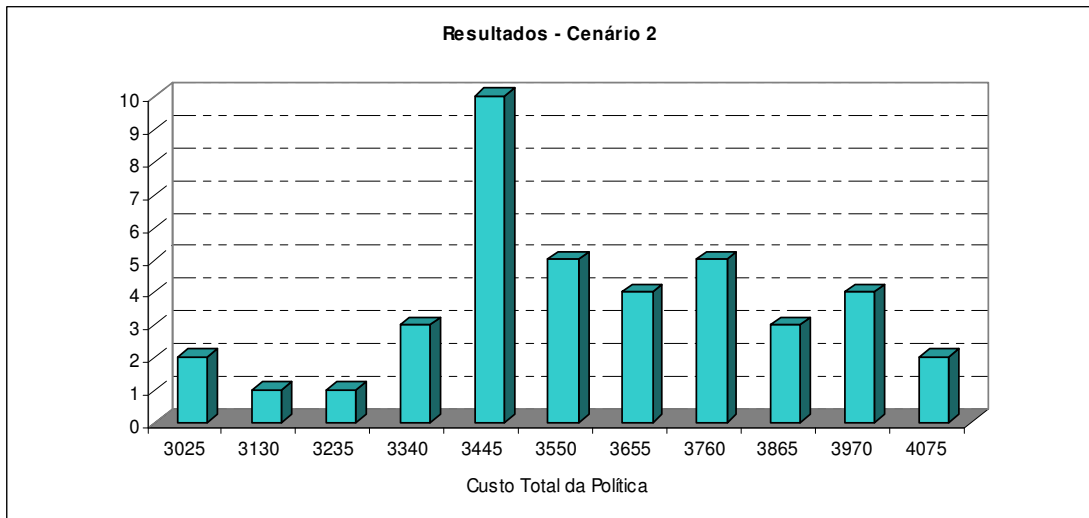


Gráfico 22 - Exemplo 3: custo total do cenário 2

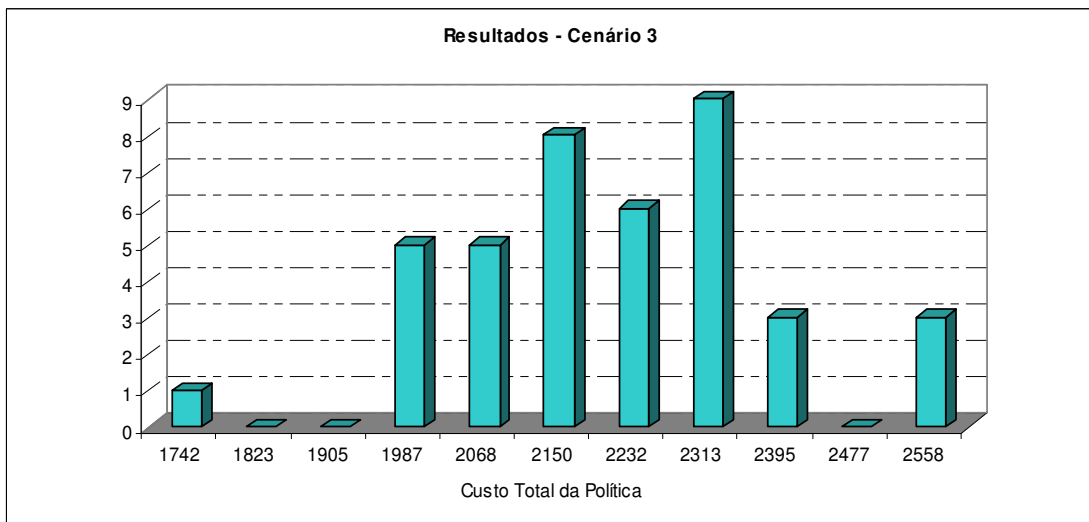


Gráfico 23 - Exemplo 3: custo total do cenário 3

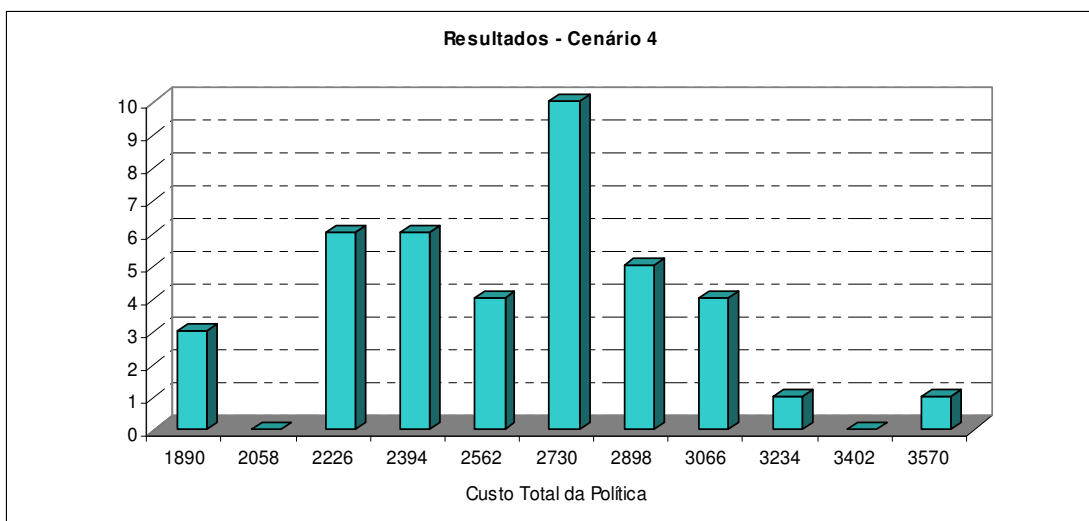


Gráfico 24 - Exemplo 3: custo total do cenário 4

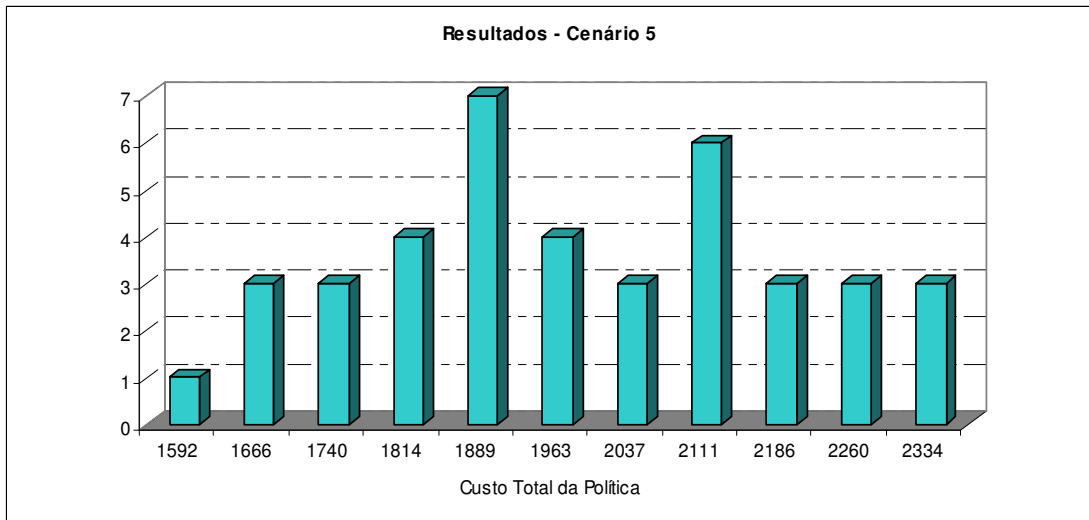


Gráfico 25 - Exemplo 3: custo total do cenário 5

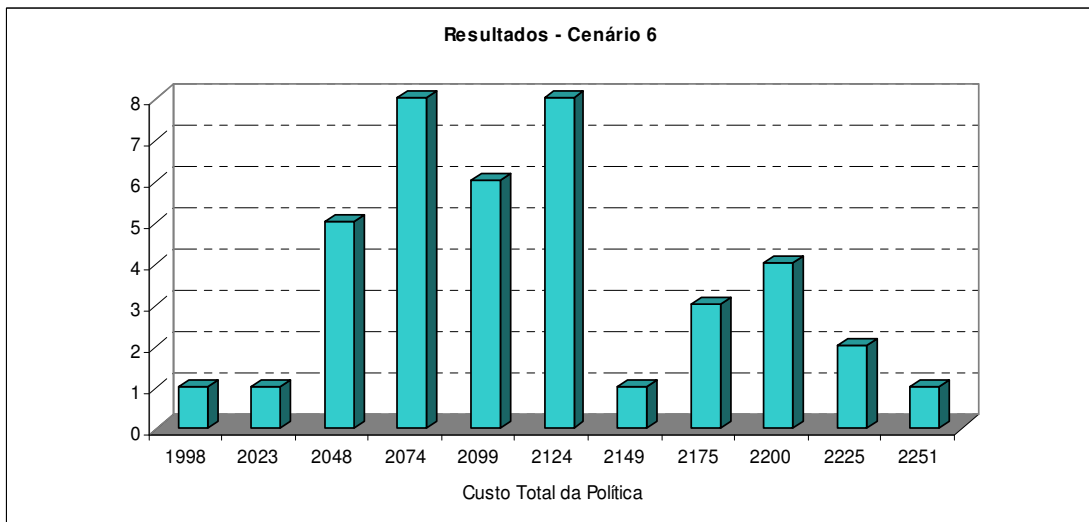


Gráfico 26 - Exemplo 3: custo total do cenário 6

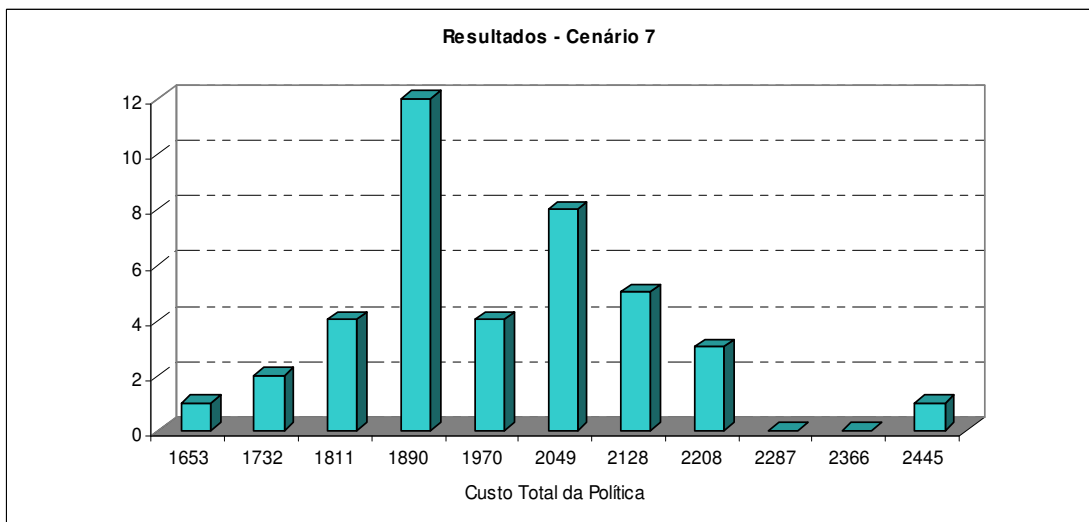


Gráfico 27 - Exemplo 3: custo total do cenário 7

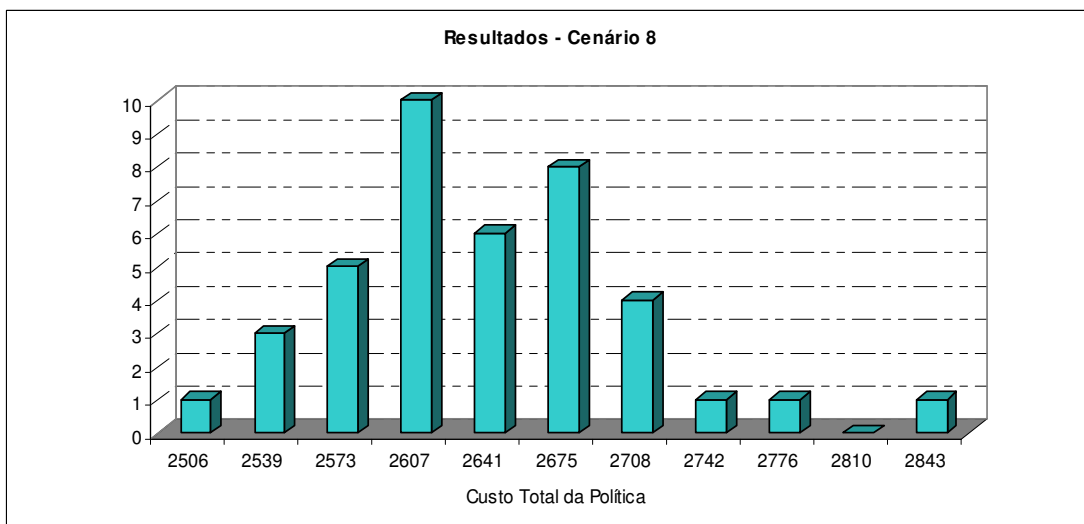


Gráfico 28 - Exemplo 3: custo total do cenário 8

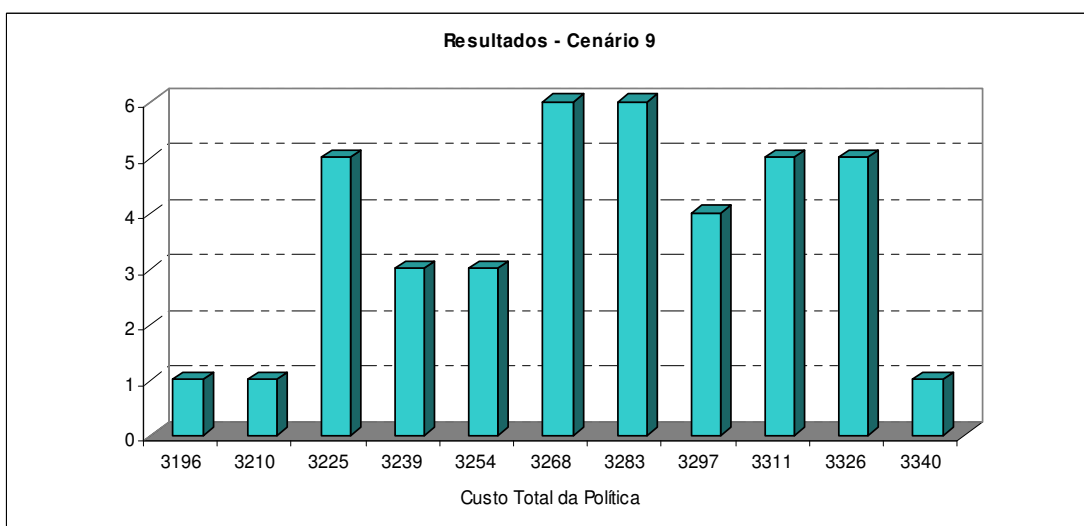


Gráfico 29 - Exemplo 3: custo total do cenário 9

O Gráfico 31 mostra a comparação entre os custos médios dos cenários testados para o exemplo 3.

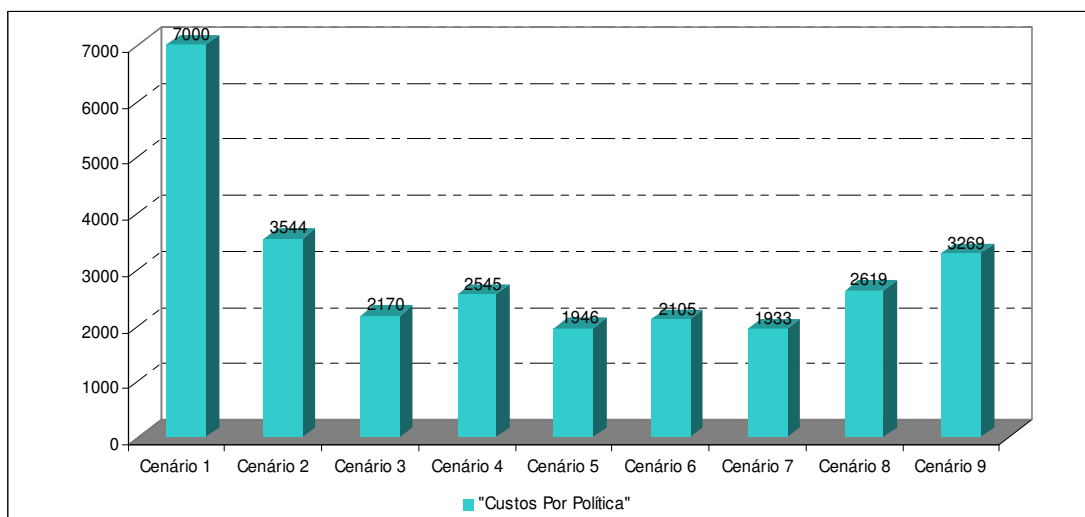


Gráfico 30 - Exemplo 3: comparativo de custos entre os cenários analisados

3.1.4. Construção dos Intervalos de Confiança para as Médias das Corridas

Diante dos valores obtidos em cada corrida tornou-se possível estimar o custo total médio para cada cenário e seus respectivos intervalos de confiança (COSTA NETO, 1977). Um intervalo de confiança para um parâmetro define uma faixa contendo os limites superior e inferior para a estimativa do parâmetro. Para grandes amostras, com número de elementos maior ou igual a 30, a distribuição das médias amostrais será normal com média μ e desvio-padrão σ/\sqrt{n} . Este resultado é garantido pelo teorema do limite central. O desvio-padrão da média amostral é também conhecido como erro padrão. Sendo assim, utilizou-se um intervalo com 97,5% de confiança e, portanto, os limites superior e inferior foram calculados com base nas expressões a seguir.

$$\text{Limite inf.} = \mu - 1,96 \times \sigma / \sqrt{n} \quad (24)$$

$$\text{Limite sup.} = \mu + 1,96 \times \sigma / \sqrt{n} \quad (25)$$

As tabelas a seguir mostram os intervalos de confiança dos custos totais para as médias de cada um dos 9 cenários dos 3 exemplos apresentados.

Tabela 25 - Exemplo 1: intervalos de confiança para as políticas propostas

	Modelo de Simulação - Exemplo 1		
	Limite Inferior	Custo Médio	Limite Superior
Cenário 1	7000	7000	7000
Cenário 2	2877	2956	3036
Cenário 3	1704	1733	1762
Cenário 4	1538	1622	1707
Cenário 5	1398	1431	1464
Cenário 6	2034	2042	2050
Cenário 7	1544	1577	1611
Cenário 8	2581	2596	2610
Cenário 9	3329	3340	3350

Tabela 26 - Exemplo 2: intervalos de confiança para as políticas propostas

	Modelo de Simulação - Exemplo 2		
	Limite Inferior	Custo Médio	Limite Superior
Cenário 1	7000	7000	7000
Cenário 2	3131	3216	3301
Cenário 3	1749	1782	1816
Cenário 4	1876	1976	2076
Cenário 5	1447	1486	1524
Cenário 6	2047	2057	2067
Cenário 7	1560	1595	1631
Cenário 8	2533	2550	2567
Cenário 9	3304	3315	3325

Tabela 27 - Exemplo 3: intervalos de confiança para as políticas propostas

	Modelo de Simulação - Exemplo 3		
	Limite Inferior	Custo Médio	Limite Superior
Cenário 1	7000	7000	7000
Cenário 2	3460	3544	3628
Cenário 3	2116	2170	2225
Cenário 4	2429	2545	2660
Cenário 5	1882	1946	2010
Cenário 6	2086	2105	2124
Cenário 7	1883	1933	1982
Cenário 8	2598	2619	2641
Cenário 9	3257	3269	3281

Uma vez apresentados os resultados obtidos com o modelo de simulação o próximo passo a ser seguido é compará-los com aqueles oriundos do modelo de otimização. A tabela a seguir mostra um comparativo dos resultados.

Tabela 28 - Exemplo 1: comparativo entre resultados dos modelos de simulação e de otimização

Modelo de Simulação X Modelo de Otimização (Exemplo 1)				
	Modelo de Simulação			Modelo de Otimização
	Limite Inferior	Custo Médio	Limite Superior	Custos
Cenário 1	7000	7000	7000	0
Cenário 2	2877	2956	3036	0
Cenário 3	1704	1733	1762	1745
Cenário 4	1538	1622	1707	0
Cenário 5	1398	1431	1464	1449
Cenário 6	2034	2042	2050	0
Cenário 7	1544	1577	1611	1565
Cenário 8	2581	2596	2610	0
Cenário 9	3329	3340	3350	0

Tabela 29 - Exemplo 2: comparativo entre resultados dos modelos de simulação e de otimização

Modelo de Simulação X Modelo de Otimização (Exemplo 2)				
	Modelo de Simulação			Modelo de Otimização
	Limite Inferior	Custo Médio	Limite Superior	Custos
Cenário 1	7000	7000	7000	0
Cenário 2	3131	3216	3301	0
Cenário 3	1749	1782	1816	1732
Cenário 4	1876	1976	2076	0
Cenário 5	1447	1486	1524	1438
Cenário 6	2047	2057	2067	0
Cenário 7	1560	1595	1631	1550
Cenário 8	2533	2550	2567	0
Cenário 9	3304	3315	3325	0

Tabela 30 - Exemplo 3: comparativo entre resultados dos modelos de simulação e de otimização

Modelo de Simulação X Modelo de Otimização (Exemplo 3)				
	Modelo de Simulação			Modelo de Otimização
	Limite Inferior	Custo Médio	Limite Superior	Custos
Cenário 1	7000	7000	7000	0
Cenário 2	3460	3544	3628	0
Cenário 3	2116	2170	2225	1829
Cenário 4	2429	2545	2660	0
Cenário 5	1882	1946	2010	1538
Cenário 6	2086	2105	2124	0
Cenário 7	1883	1933	1982	1647
Cenário 8	2598	2619	2641	0
Cenário 9	3257	3269	3281	0

Do ponto de vista de custos, a política com melhor desempenho foi aquela apontada pelo cenário 5, seguidos dos cenários 7 e 3. Para os três exemplos, os resultados obtidos pelo modelo de otimização foram confirmados pelos resultados produzidos pelo modelo de simulação. Além disso, para os três exemplos os valores obtidos através da otimização foram confirmados dentro dos respectivos intervalos de confiança gerados via simulação. Portanto, este resultado valida o modelo de otimização com relação à aderência do mesmo à realidade.

3.2. Validação através de Análise de Sensibilidade

Os modelos de otimização não consideram incertezas nos inputs. Entretanto, no caso estudado, alguns dos inputs são variáveis aleatórias. Para estas variáveis são feitas estimativas que são inseridas nos modelos de otimização. A análise de sensibilidade consiste no estudo da variação do output do modelo matemático quando um ou mais inputs variam. Este método foi utilizado para testar a robustez do modelo de otimização. Se a resposta do modelo se altera a cada pequena variação nos inputs é possível afirmar que o modelo em questão é pouco robusto.

No caso estudado, os inputs testados na análise de sensibilidade foram o custo de indisponibilidade, o custo de aquisição, o custo de ressuprimento e o consumo médio anual referente a cada distribuição de probabilidades arbitrada nos exemplos. Para cada exemplo foi definido um cenário base composto pelos quatro elementos citados acima. Para cada variável foram testados 39 cenários de modo a garantir grande amplitude de variação dos resultados. A análise consistiu em variar um parâmetro de cada vez, mantendo os demais constantes, rodar o modelo de otimização e coletar o resultado. Após executar os 156 cenários foram construídos gráficos para cada um dos parâmetros mostrando as políticas ótimas em função da variação do valor do parâmetro. A tabela 31 mostra o caso base para cada exemplo.

Tabela 31 – Análise de sensibilidade: caso base

	Custo de Indisponibilidade	Custo Aquisição	Custo Ressuprimento	Parâmetro da Demanda
Exemplo 1 - Demanda Poisson	7000	10000	400	0,27
Exemplo 2 - Demanda Binomial	7000	10000	400	0,027
Exemplo 3 - Demanda Ciscreta	7000	10000	400	0,27

As tabelas com os valores utilizados em cada um dos cenários referentes os três exemplos são apresentadas respectivamente nos anexos 4, 5 e 6. A seguir encontram-se os resultados obtidos com a análise dos cenários.

3.2.1. Resultados da Análise de Sensibilidade para o Exemplo 1

Para o primeiro exemplo, dos 156 cenários testados foram identificadas mudanças na resposta do modelo apenas para as políticas 4, 5 e 6, ou seja, aquelas cujo estoque

inicial é zero ($i = 1$). Para as outras seis políticas, o resultado manteve-se constante apesar da grande amplitude de variação. Os gráficos abaixo mostram em detalhes os resultados da análise de sensibilidade. As combinações referidas nas legendas dos gráficos representam os conjuntos de políticas de menor custo para cada um dos cenários. A combinação 1 indica que as políticas de menor custo foram as políticas 3, 4 e 7. A combinação 2 indica que as políticas de menor custo foram as políticas 3, 5 e 7 e a combinação 3 indica que as políticas de menor custo foram as políticas 3, 6 e 7.

Neste exemplo, alterando-se o custo de indisponibilidade e mantendo-se as demais variáveis constantes, nota-se que valores abaixo de \$5.600 favorecem à combinação 1. Valores acima disso, mantendo os demais parâmetros constantes, indicam a melhor decisão como sendo a combinação 2.

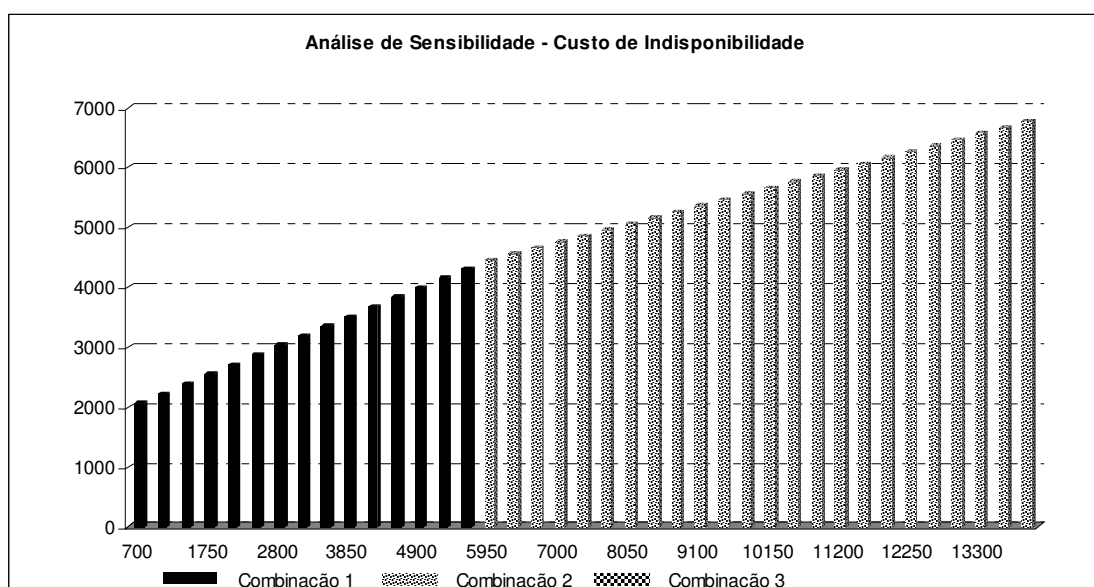


Gráfico 31 - Exemplo 1: Resultados da análise de sensibilidade em relação ao parâmetro custo de indisponibilidade

Com relação ao parâmetro custo de aquisição, valores inferiores a \$1.500, com os demais parâmetros iguais ao caso base, indicam a terceira como a combinação ótima. Entre \$1.500 e \$14.000 a melhor combinação é a segunda. Acima deste valor a combinação de menor custo é a primeira.

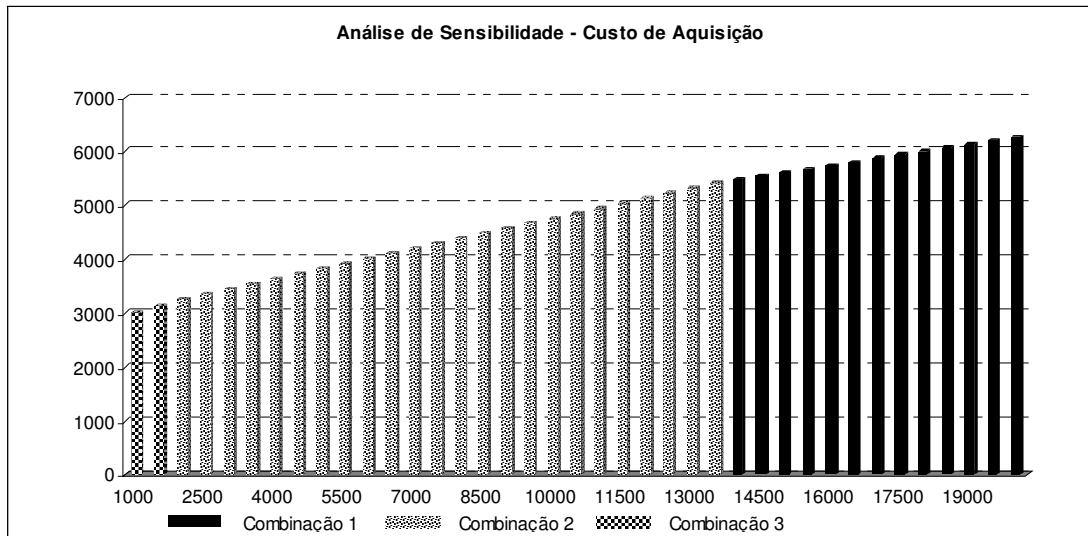


Gráfico 32 - Exemplo 1: Resultados da análise de sensibilidade em relação ao parâmetro custo de aquisição

No caso da variável custo de ressuprimento, valores abaixo de \$600 levam a combinação 2 a ter o melhor resultado. Acima deste valor a melhor política é a número 1.

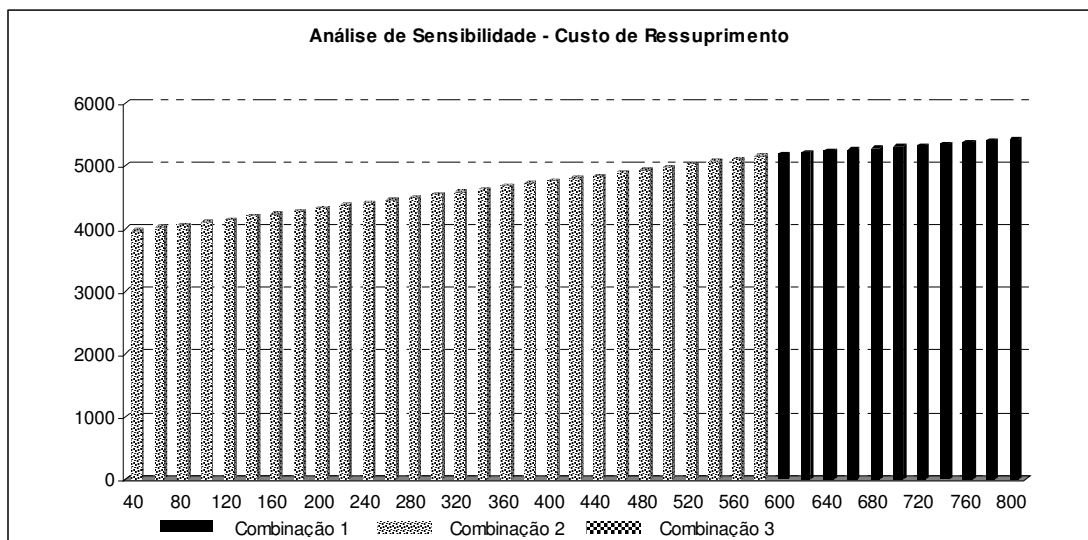


Gráfico 33 - Exemplo 1: Resultados da análise de sensibilidade em relação ao parâmetro custo de ressuprimento

Por último, quanto menor a demanda, menor é o custo da combinação 1. Sendo assim, os cenários com médias de ocorrências de demandas inferiores a 0,22 favorecem a adoção da política 1.

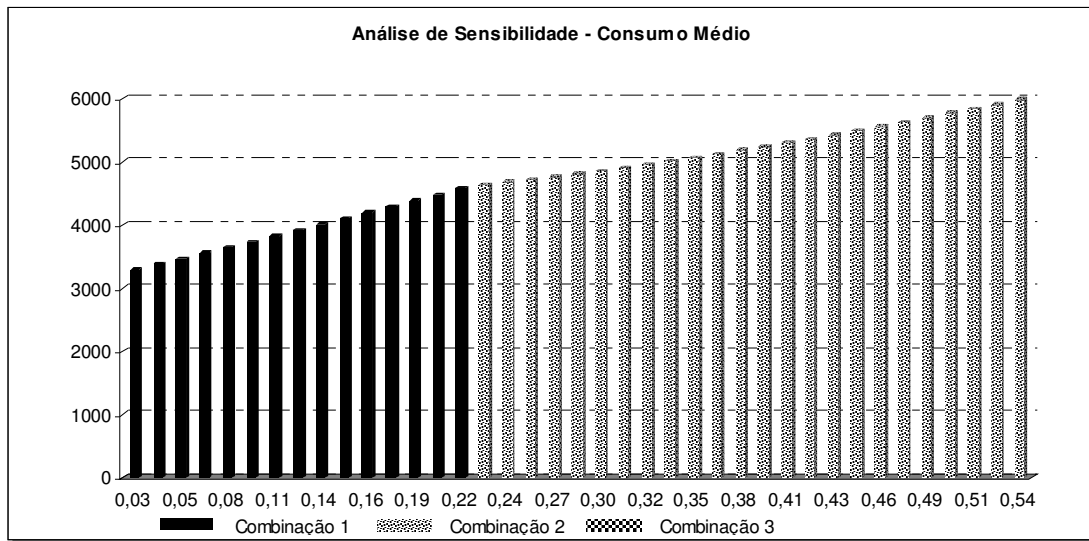


Gráfico 34 - Exemplo 1: Resultados da análise de sensibilidade em relação ao parâmetro consumo médio

3.2.2. Resultados da Análise de Sensibilidade para o Exemplo 2

Da mesma forma como no primeiro exemplo, dos 156 cenários testados foram identificadas mudanças na resposta do modelo apenas para as políticas 4, 5 e 6, ou seja, aquelas cujo estoque inicial é zero ($i = 1$). Para as outras seis políticas, o resultado manteve-se constante apesar da grande amplitude de variação. Os gráficos abaixo mostram em detalhes os resultados da análise de sensibilidade.

Neste exemplo, alterando-se o custo de indisponibilidade e mantendo-se as demais variáveis constantes, nota-se que sempre a combinação 2 é a escolhida. Apesar de, em alguns cenários, esta combinação apresentar valor de custo maior um das outras duas, ela acaba sendo a escolhida por respeitar a restrição de nível de serviço, enquanto que as outras violam a restrição. Resumindo, quando o custo das combinações 1 e 3 é menor que o custo da combinação 2, alguma restrição de nível de serviço é violada, o que invalida a solução.

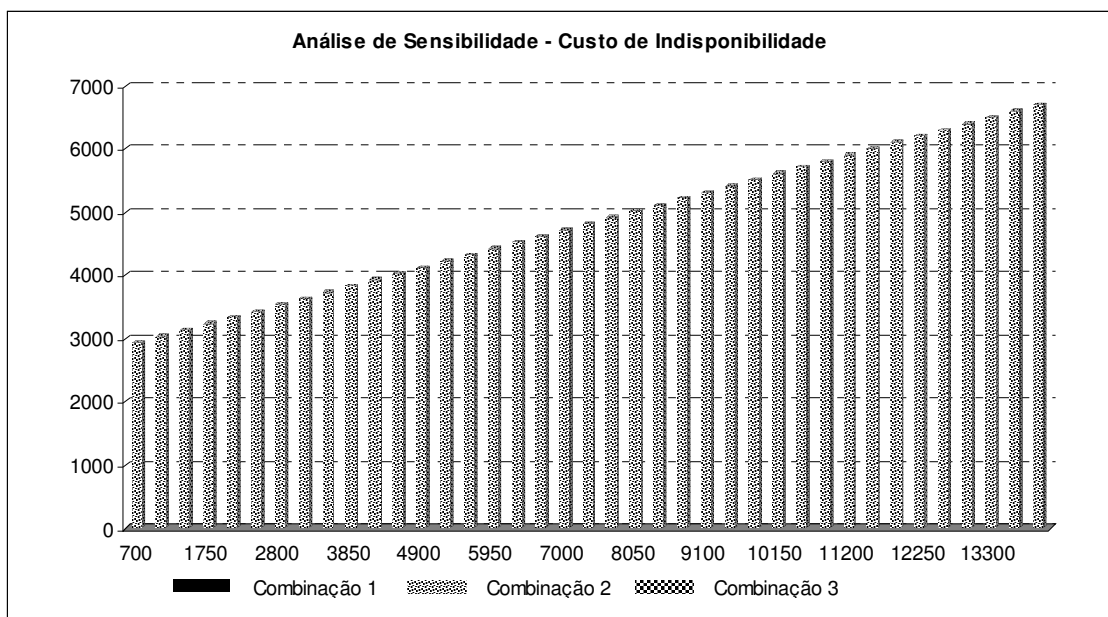


Gráfico 35 - Exemplo 2: Resultados da análise de sensibilidade em relação ao parâmetro custo de indisponibilidade

Com relação ao parâmetro custo de aquisição, valores inferiores a \$700, com os demais parâmetros iguais ao caso base, indicam a terceira como a combinação ótima. Entre \$700 e \$18.500 a melhor combinação é a segunda. Acima deste valor a combinação de menor custo é a primeira.

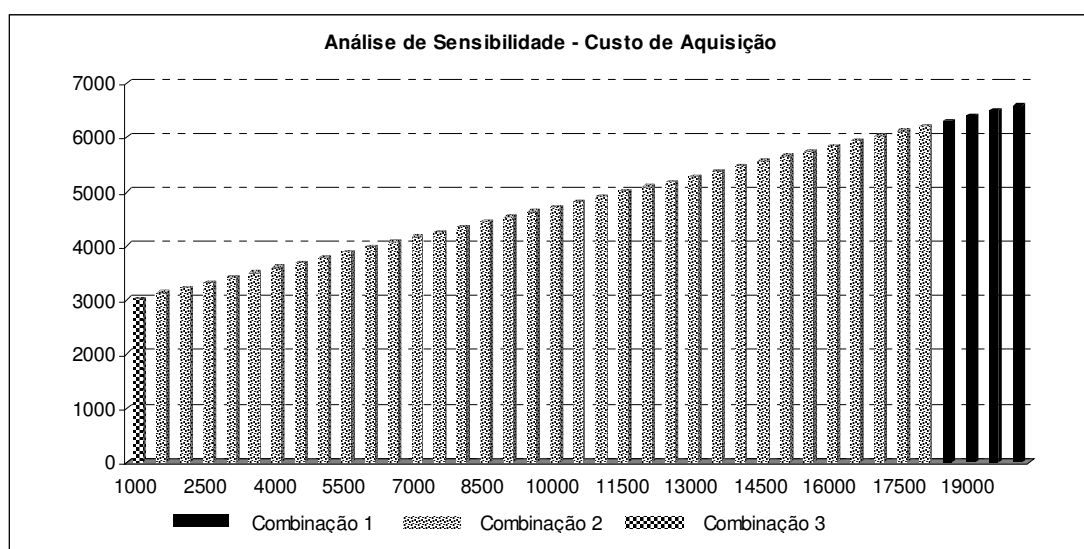


Gráfico 36 - Exemplo 2: Resultados da análise de sensibilidade em relação ao parâmetro custo de aquisição

No caso da variável custo de ressurgimento, a combinação 2 obteve o melhor resultado independentemente do valor do parâmetro pelos mesmos motivos apresentados para a variável custo de indisponibilidade.

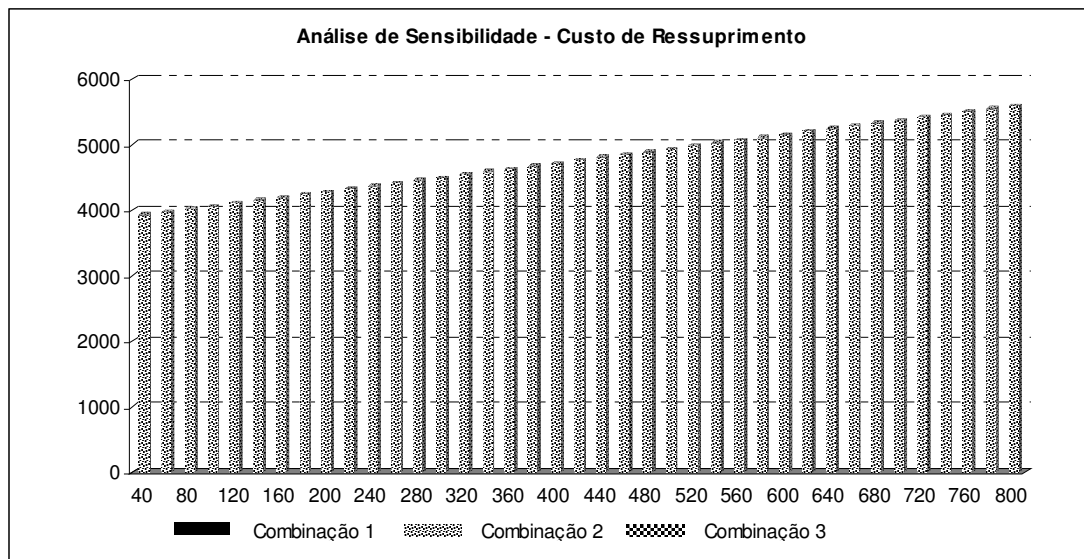


Gráfico 37 - Exemplo 2: Resultados da análise de sensibilidade em relação ao parâmetro custo de ressurgimento

Por último, quanto menor a demanda, menor é o custo da combinação 1. Sendo assim, os cenários com médias de ocorrências de demandas inferiores a 0,0095 favorecem a adoção da política 1.

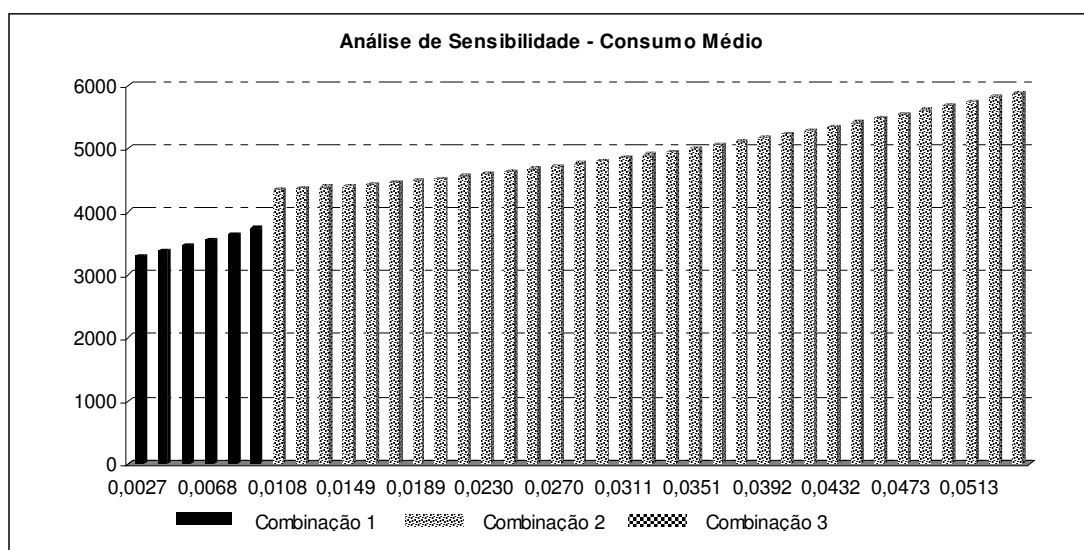


Gráfico 38 - Exemplo 2: Resultados da análise de sensibilidade em relação ao parâmetro consumo médio

3.2.3. Resultados da Análise de Sensibilidade para o Exemplo 3

Da mesma forma como nos outros dois exemplos, dos 156 cenários testados foram identificadas mudanças na resposta do modelo apenas para as políticas 4, 5 e 6, ou seja, aquelas cujo estoque inicial é zero ($i = 1$). Para as outras seis políticas, o resultado manteve-se constante apesar da grande amplitude de variação. Os gráficos abaixo mostram em detalhes os resultados da análise de sensibilidade.

Neste exemplo, para as variáveis custo de indisponibilidade e custo de ressurgimento, as alterações não modificaram a resposta do modelo matemático. Mais uma vez isso ocorre em função da restrição de nível de serviço. Os gráficos abaixo mostram a situação.

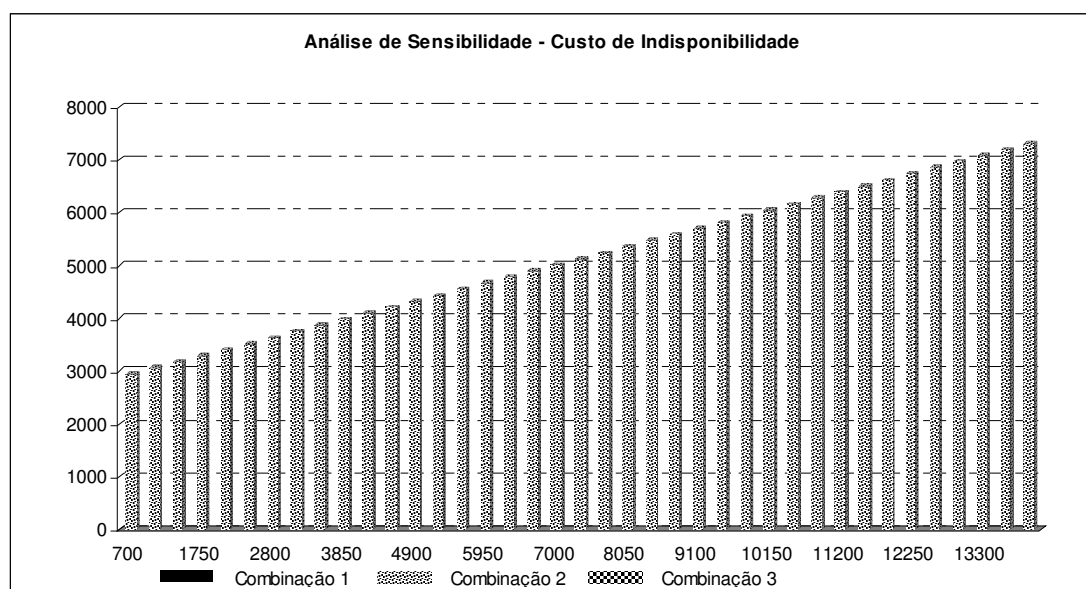


Gráfico 39 - Exemplo 3: Resultados da análise de sensibilidade em relação ao parâmetro custo de indisponibilidade

Para a variável custo de aquisição, valores menores que \$2000 levam o modelo matemático a apontar a combinação 3 como a melhor opção. Isso pode ser visto no gráfico abaixo.

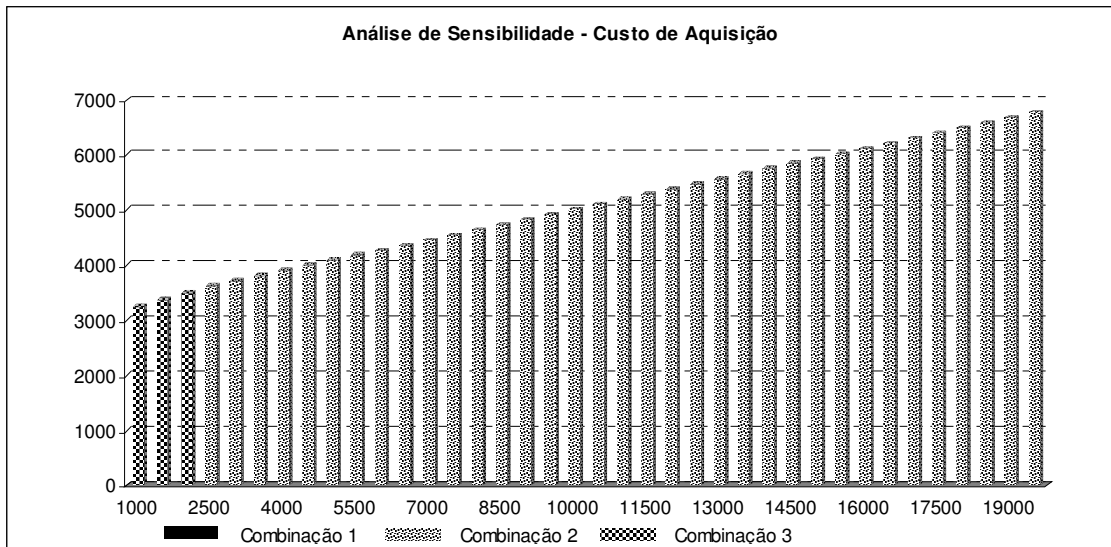


Gráfico 40 - Exemplo 3: Resultados da análise de sensibilidade em relação ao parâmetro custo de aquisição

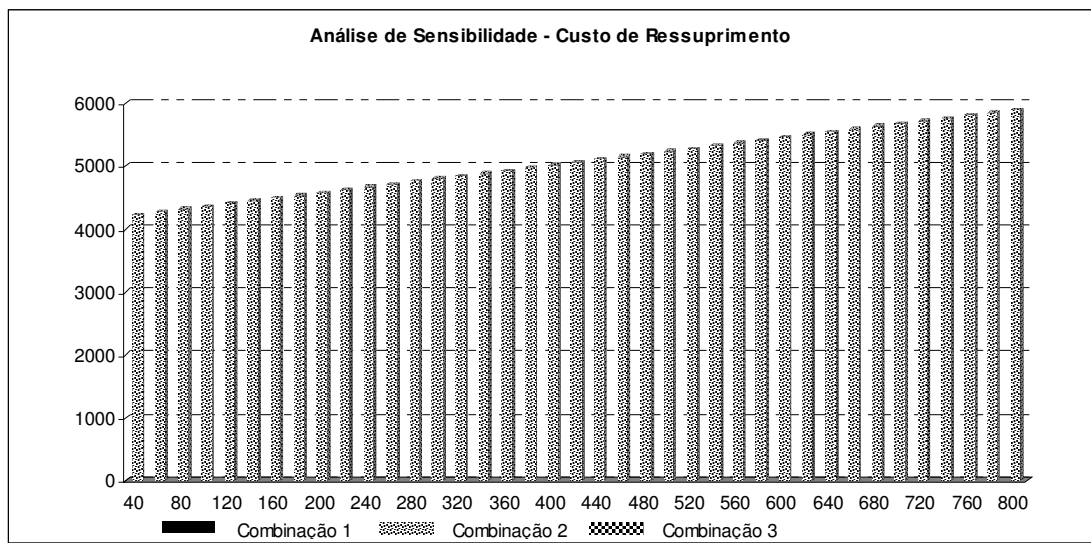


Gráfico 41 - Exemplo 3: Resultados da análise de sensibilidade em relação ao parâmetro custo de ressuprimento

Por último, quanto menor a demanda, menor é o custo da combinação 1. Sendo assim, os cenários com médias de ocorrências de demandas inferiores a 0,11 favorecem a adoção da combinação 1.

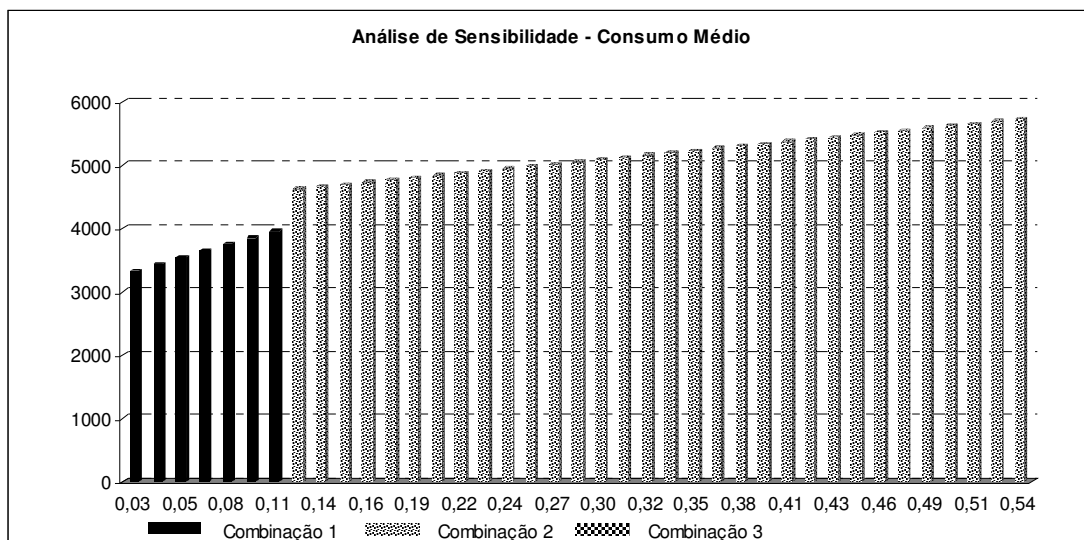


Gráfico 42 - Exemplo 3: Resultados da análise de sensibilidade em relação ao parâmetro consumo médio

Uma vez apresentados os resultados obtidos com a análise de sensibilidade o próximo passo a ser seguido é compará-los com aqueles oriundos do modelo de otimização. Para os três exemplos, o modelo apontou como melhor resposta a combinação 2. A tabela a seguir mostra o número de vezes em que a combinação 1 foi apontada pelo modelo matemático como a melhor opção.

Tabela 32 - Resultados da análise de sensibilidade

	Combinação 1	Combinação 2	Combinação 3
Exemplo 1 - Demanda Poisson	54	100	2
Exemplo 2 - Demanda Binomial	6	149	1
Exemplo 3 - Demanda Ciscreta	7	146	3

Como pode ser visto na maioria dos cenários a combinação 2 foi a melhor opção. A combinação 3 foi apontada apenas duas vezes no exemplo 1, uma vez no exemplo 2 e três vezes no exemplo 3, basicamente em função do elevado custo de manutenção dos estoques que tornava esta combinação cara. Portanto, dado que foram detectadas apenas pequenas mudanças na resposta em função de variações consideráveis nos valores das variáveis, resultados obtidos com a análise de sensibilidade validam o modelo segundo o critério de robustez.

Capítulo 4 – Conclusões

A gestão de estoques de itens de baixo/baixíssimo giro é especialmente complexa em função da dificuldade na estimativa da demanda. Como resultado, os gestores incorrem em elevados custos de manutenção de estoques ou em penalidades pela indisponibilidade de itens no momento adequado ao consumo.

A literatura apresenta estudos onde são detalhados modelos matemáticos que se propõem a resolver a problemática da gestão das peças de reposição. Alguns desses modelos encontram-se implementados em softwares de mercado que se prestam não só a gestão dos estoques propriamente dita, mas também ao melhor resultado para a cadeia de suprimentos.

O modelo matemático proposto nesta dissertação tem como principal objetivo a definição da melhor política para gestão de estoques de itens de baixo giro. Em outras palavras, o modelo busca apontar, para uma determinada quantidade de estoque inicial qual a ordem de ressuprimento que proveria o menor custo logístico para o sistema. Para tanto, foram colocadas como premissas o fato do sistema funcionar em regime de revisão periódica e que o comportamento da demanda não se altera ao longo do período de revisão apesar de aceitar como parâmetro de entrada qualquer variável aleatória, diferentemente da maioria dos modelos matemáticos utilizados para gestão de estoques de peças de reposição.

Após os testes de simulação e análise de sensibilidade nos três exemplos propostos concluiu-se que o modelo de otimização é robusto e aderente à proposta original e, portanto, este se configura como uma boa alternativa para suportar políticas de estoque de itens de baixíssimo giro em sistemas baseados em revisão periódica e com demanda qualquer.

É importante destacar que os modelos matemáticos são ferramentas de apoio à tomada de decisão e, portanto, não eliminam a figura do gestor, apenas existem para possibilitar uma análise racional do problema. Fatores como a experiência e o conhecimento tácito do decisor não podem ser colocados em segundo plano.

Apesar dos resultados satisfatórios apresentados pelo modelo, há oportunidade para evoluções sobre o mesmo. O modelo apresentado fornece a resposta para a política de

ressuprimento de 1 item apenas e com período de revisão igual a 1. Para futuros trabalhos sugere-se a expansão do mesmo para fornecer políticas ótimas de ressuprimento para mais de um item em n períodos de revisão, possibilitando inserir restrições de orçamento e fluxo de caixa. Recomenda-se também inserir no modelo proposto restrições de fornecimento e seleção de fornecedores.

Capítulo 5 – Bibliografía

- BOTTER, R., FORTUIN, L., 2000, “Stocking Strategy for Service Parts: A Case Study”. *International Journal of Operations & Production Management*, v. 20, n. 6, pp 656-674;
- BANKS, J., Banks, 1999. *Discrete-event system simulation*. Terceira Edição, New Jersey, Upper Saddle River, Prentice-Hall, Inc.;
- BOWERSOX, D. J., CLOSS, D. J., 1996, *Logistical Management: The Integrated Supply Chain Process*. New York, McGraw Hill;
- CORRÊA, H.L, DIAS, J.P.P, “De Volta à Gestão de Estoques: As Técnicas Estão Sendo Utilizadas Pelas Empresas?”, *SIMPOI*, São Paulo, 1998;
- EPPEN G.D., MARTIN R.K., 1988, “Determining Safety Stock in the Presence of Stochastic Lead Time and Demand”, *Management Science*, v. 34, n. 11, pp 1380-1391;
- FLEURY, P.F., WANKE, P., FIGUEIREDO, K.F., 2000. *Logística Empresarial - A perspectiva Brasil – Coleção Coppead de Administração*. Primeira Edição, Atlas;
- GARCIA, E.S, SILVA, C.F., SALIBY, E., “A Simulation Model to Validate and Evaluate the Adequacy of an Analytical Expression for Proper Safety Stock Sizing”, *In Proceedings of the 34th Conference on Winter Simulation*, San Diego, Dec., 2002, pp 1282-1288;
- GARCIA, E.S., 2003, *Tesi di Laurea*, “Inventory Management: Toward Logistical Optimization and Supply Chain Excellence”, Politécnico di Torino, Oct., 2003;
- GELDERS, L.F. E LOOY, P.M. VAN., 1978, “An Inventory policy for slow and fast movers in a Petrochemical plant: a case study”, *Journal of Operational Research Society*, v. 29, n. 9, pp 867-874;
- HAMMERSLEY, J.M., AND D.C. HANDSCOMB, 1964. *Monte Carlo Methods*, London, Chapman and Hall;
- KEATON, M., 1995, “Using the Gamma Distribution to Model Demand When Lead Time is Random”, *Journal of Business Logistics*, v. 16, n. 1, pp 107-132;
- KRANENBURG A.A., HOUTUM G.J. VAN., 2004, “A Multi-Item Spare Parts Inventory Model with Customer Differentiation”. *Beta Working Paper*. Technische Universiteit Eindhoven;

- KRIZNER, K., 2001, “Solution Takes Control of Parts Inventory Levels”, *Frontline Solutions*, pp 16-17;
- LAMBERT, D.M., STOCK, J. R., 1993. *Strategic Logistics Management*, Terceira Edição, Boston, Richard D. Irwin Inc.;
- LARSON J.L., 1982. *Introduction to Probability Theory and Statistical Inference*, New York, John Wiley & Sons;
- LAU, H-S., 1989, “Toward a Stock Control System Under Non-Normal Demand and Lead Time Uncertainty”, *Journal of Business Logistics*, v.10, n. 1, pp 88-104;
- LIMA, M. “Estoque: Custo de Oportunidade e Impacto sobre os Indicadores Financeiros”, (www.cel.coppead.ufrj.br);
- NAMIT K., CHEN J., 1999, “Solutions to the Inventory Model for Gamma Lead-Time Demand”, *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, v. 29, n. 2, pp 138-153 ;
- NETO, P. L. C., 1977. *Estatística*, Segunda Edição, São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda;
- PRASAD, S., HASAN, H. E SHAH, J., 1996, “A Prototype Intelligent Model Management System for Inventory Decision Support”. *Omega*, v. 24, n. 2, pp 153-166;
- ROBISON, J. A., 2001, “Inventory Profile Analysis: An Aggregation Technique For Improving Customer Service While Reducing Inventory”, *Production and Inventory Management Journal*, v. 42, n. 2; pp 8-14;
- RAZI, M. A., TARN, F. M., 2003, “An Applied Model For Improving Inventory Management in ERP Systems”, *Logistics Information Management*, v. 16, n. 2, pp 114-124;
- SANDVIG J.C., ALLAIRE, J.J., 1998, “Vitalizing a Spare parts Inventory”, *Production and Inventory Management Journal*, v. 39, n. 1, pp 67-72;
- SCHULTZ, C.R., 1987, “Forecasting and Inventory Control For Sporadic Demand Under Periodic Review”. *Journal of Operational Reserch Society*. v. 38, n. 5. pp 453-458;
- SHERBROOKE, C.C., 1968, “METRIC – A Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control”. *Operations Research* v. 16, n. 1, pp 122-141;

- SILVA, C.F., GARCIA, E.S., SALIBY, E., “Soccer Championship Analysis Using Monte Carlo Simulation”, *In Proceedings of the 34th Conference on Winter Simulation*, San Diego, Dec., 2002, pp 2011-2016;
- SILVER, E., PETERSON, R, 1985, *Decision Systems for inventory management and Production Planning*, Segunda Edição, New York, Wiley;
- SLOAN, T. W., 2004, “A Periodic Review Production And Maintenance Model With Random Demand, Deteriorating Equipment And Binomial Yield”, *The Journal of the Operational Research Society*, v. 55, n. 6, pp 647- 656;
- TAGARAS, G., VLACHOS, D., 2001, “A Periodic Review Inventory System With Emergency Replenishments”, *Management Science*, v. 47, n. 3, pp 415-429;
- TYWORTH J.E., 1992, “Modeling Transportation - Inventory Trade-offs in a Stochastic Setting,” *Journal of Business Logistics*, v. 13, n. 2, pp 97-125;
- YEH, Q.J., 1997, “A Practical Implementation Of Gamma Distribution To Reordering Decision Of An Inventory Control Problem”, *Production and Inventory Management Journal*, v. 38, n. 1. pp 51-57;
- WANKE, P., 2005, “Considerações Metodológicas Sobre a Gestão de Estoques de Peças de Reposição: Um Estudo de Caso”. *Working Paper*, COPPEAD/UFRJ;
- WANKE, P., 2003, “Gestão de Estoques de Peças de Reposição de Baixo Giro”, (www.cel.coppead.ufrj.br);
- WANKE, P., 2003, “Gestão de Estoques de Peças de Reposição de Baixíssimo Giro”, (www.cel.coppead.ufrj.br).

Capítulo 6 – Anexos

ANEXO 1: Modelagem do Exemplo 1 em LINDO 6.1

!MODELAGEM:

!3 estados possíveis para o estoque inicial:

!i=0 - estoque menor que zero

!i=1 - estoque igual a zero

!i=2 - estoque maior que zero

!As ações possíveis são:

!k=0 - não pedir

!k=1 - pedir uma unidade

!k=2 - pedir duas unidades

!Política	CR	CI	CM	Total
!P(0,0)	0	7000	0	7000
!P(0,1)	400	2547	0	2947
!P(0,2)	400	1345	0	1745
!P(1,0)	0	1656	0	1656
!P(1,1)	400	454	595	1449
!P(1,2)	400	292	1352	2043
!P(2,0)	0	214	1352	1565
!P(2,1)	400	51	2130	2581
!P(2,2)	400	37	2909	3346

MIN 7000 Y00 + 2947 Y01 + 1745 Y02 + 1656 Y10 + 1449 Y11 + 2043 Y12
+ 1565 Y20 + 2581 Y21 + 3346 Y22

SUBJECT TO

2) Y00 >= 0

3) Y10 >= 0

4) Y20 >= 0

5) Y01 >= 0

6) Y11 >= 0

7) Y21 >= 0

8) Y02 >= 0

9) Y12 >= 0

10) Y22 >= 0

11) Y00 <= 1

12) Y10 <= 1

13) Y20 <= 1

- 14) $Y01 \leq 1$
- 15) $Y11 \leq 1$
- 16) $Y21 \leq 1$
- 17) $Y02 \leq 1$
- 18) $Y12 \leq 1$
- 19) $Y22 \leq 1$
- 20) $Y00 + Y01 + Y02 = 1$
- 21) $Y10 + Y11 + Y12 = 1$
- 22) $Y20 + Y21 + Y22 = 1$

!Restrições de Nível de Serviço

- 23) $1 Y00 \leq 0.1$
- 24) $0.23662 Y01 \leq 0.1$
- 25) $0.03051 Y02 \leq 0.1$
- 26) $0 Y10 \leq 0.1$
- 27) $0.03051 Y11 \leq 0.1$
- 28) $0.00268 Y12 \leq 0.1$
- 29) $0 Y20 \leq 0.1$
- 30) $0.00268 Y21 \leq 0.1$
- 31) $0.00018 Y22 \leq 0.1$

END

!SOLUÇÃO:

1)	4759.000	
VARIABLE	VALUE	REDUCED COST
Y00	0.000000	5255.000000
Y01	0.000000	1202.000000
Y02	1.000000	0.000000
Y10	0.000000	207.000000
Y11	1.000000	0.000000
Y12	0.000000	594.000000
Y20	1.000000	0.000000
Y21	0.000000	1016.000000
Y22	0.000000	1781.000000
ROW	SLACK OR SURPLUS	DUAL PRICES
2)	0.000000	0.000000
3)	0.000000	0.000000
4)	1.000000	0.000000
5)	0.000000	0.000000
6)	1.000000	0.000000

7)	0.000000	0.000000
8)	1.000000	0.000000
9)	0.000000	0.000000
10)	0.000000	0.000000
11)	1.000000	0.000000
12)	1.000000	0.000000
13)	0.000000	0.000000
14)	1.000000	0.000000
15)	0.000000	0.000000
16)	1.000000	0.000000
17)	0.000000	0.000000
18)	1.000000	0.000000
19)	1.000000	0.000000
20)	0.000000	-1745.000000
21)	0.000000	-1449.000000
22)	0.000000	-1565.000000
23)	0.100000	0.000000
24)	0.100000	0.000000
25)	0.069490	0.000000
26)	0.100000	0.000000
27)	0.069490	0.000000
28)	0.100000	0.000000
29)	0.100000	0.000000
30)	0.100000	0.000000
31)	0.100000	0.000000

NO. ITERATIONS= 2

RANGES IN WHICH THE BASIS IS UNCHANGED:

VARIABLE	CURRENT COEF	OBJ COEFFICIENT RANGES	
		ALLOWABLE INCREASE	ALLOWABLE DECREASE
Y00	7000.000000	INFINITY	5255.000000
Y01	2947.000000	INFINITY	1202.000000
Y02	1745.000000	1202.000000	INFINITY
Y10	1656.000000	INFINITY	207.000000
Y11	1449.000000	207.000000	INFINITY
Y12	2043.000000	INFINITY	594.000000
Y20	1565.000000	1016.000000	INFINITY
Y21	2581.000000	INFINITY	1016.000000

Y22	3346.000000	INFINITY	1781.000000
-----	-------------	----------	-------------

RIGHTHAND SIDE RANGES

ROW	CURRENT RHS	ALLOWABLE INCREASE	ALLOWABLE DECREASE
2	0.000000	0.000000	INFINITY
3	0.000000	0.000000	INFINITY
4	0.000000	1.000000	INFINITY
5	0.000000	0.000000	INFINITY
6	0.000000	1.000000	INFINITY
7	0.000000	0.000000	INFINITY
8	0.000000	1.000000	INFINITY
9	0.000000	0.000000	INFINITY
10	0.000000	0.000000	INFINITY
11	1.000000	INFINITY	1.000000
12	1.000000	INFINITY	1.000000
13	1.000000	INFINITY	0.000000
14	1.000000	INFINITY	1.000000
15	1.000000	INFINITY	0.000000
16	1.000000	INFINITY	1.000000
17	1.000000	INFINITY	0.000000
18	1.000000	INFINITY	1.000000
19	1.000000	INFINITY	1.000000
20	1.000000	0.000000	1.000000
21	1.000000	0.000000	1.000000
22	1.000000	0.000000	1.000000
23	0.100000	INFINITY	0.100000
24	0.100000	INFINITY	0.100000
25	0.100000	INFINITY	0.069490
26	0.100000	INFINITY	0.100000
27	0.100000	INFINITY	0.069490
28	0.100000	INFINITY	0.100000
29	0.100000	INFINITY	0.100000
30	0.100000	INFINITY	0.100000
31	0.100000	INFINITY	0.100000

ANEXO 2: Modelagem do Exemplo 2 em LINDO 6.1

!MODELAGEM:

!CARACTERÍSTICAS DO MODELO:

!3 estados possíveis para o estoque inicial:

!i=0 - estoque menor que zero

!i=1 - estoque igual a zero

!i=2 - estoque maior que zero

!As ações possíveis são:

!k=0 - não pedir

!k=1 - pedir uma unidade

!k=2 - pedir duas unidades

!Política	CR	CI	CM	TOTAL
!P(0,0)	0	7000	0	7000
!P(0,1)	400	2563	0	2963
!P(0,2)	400	1332	0	1732
!P(1,0)	0	1676	0	1676
!P(1,1)	400	445	593	1438
!P(1,2)	400	291	1539	2230
!P(2,0)	0	199	1351	1550
!P(2,1)	400	45	2339	2784
!P(2,2)	400	34	3100	3534

MIN 7000 Y00 + 2963 Y01 + 1732 Y02 + 1676 Y10 + 1438 Y11 + 2230 Y12 +
1550 Y20 + 2784 Y21 + 3534 Y22

SUBJECT TO

2) Y00 >= 0

3) Y10 >= 0

4) Y20 >= 0

5) Y01 >= 0

6) Y11 >= 0

7) Y21 >= 0

8) Y02 >= 0

9) Y12 >= 0

10) Y22 >= 0

11) Y00 <= 1

- 12) $Y_{10} \leq 1$
- 13) $Y_{20} \leq 1$
- 14) $Y_{01} \leq 1$
- 15) $Y_{11} \leq 1$
- 16) $Y_{21} \leq 1$
- 17) $Y_{02} \leq 1$
- 18) $Y_{12} \leq 1$
- 19) $Y_{22} \leq 1$

- 20) $Y_{00} + Y_{01} + Y_{02} = 1$
- 21) $Y_{10} + Y_{11} + Y_{12} = 1$
- 22) $Y_{20} + Y_{21} + Y_{22} = 1$

!Restrições de Nível de Serviço

- 23) $1 Y_{00} \leq 0.1$
- 24) $0.2395 Y_{01} \leq 0.1$
- 25) $0.0284 Y_{02} \leq 0.1$
- 26) $0.2395 Y_{10} \leq 0.1$
- 27) $0.0284 Y_{11} \leq 0.1$
- 28) $0.00205 Y_{12} \leq 0.1$
- 29) $0.0284 Y_{20} \leq 0.1$
- 30) $0.00205 Y_{21} \leq 0.1$
- 31) $0.0001 Y_{22} \leq 0.1$

END

!SOLUÇÃO

1) 4720.000

VARIABLE	VALUE	REDUCED COST
Y00	0.000000	5268.000000
Y01	0.000000	1231.000000
Y02	1.000000	0.000000
Y10	0.000000	238.000000
Y11	1.000000	0.000000
Y12	0.000000	792.000000
Y20	1.000000	0.000000
Y21	0.000000	1234.000000
Y22	0.000000	1984.000000

ROW	SLACK OR SURPLUS	DUAL PRICES
2)	0.000000	0.000000
3)	0.000000	0.000000
4)	1.000000	0.000000
5)	0.000000	0.000000
6)	1.000000	0.000000
7)	0.000000	0.000000
8)	1.000000	0.000000
9)	0.000000	0.000000
10)	0.000000	0.000000
11)	1.000000	0.000000
12)	1.000000	0.000000
13)	0.000000	0.000000
14)	1.000000	0.000000
15)	0.000000	0.000000
16)	1.000000	0.000000
17)	0.000000	0.000000
18)	1.000000	0.000000
19)	1.000000	0.000000
20)	0.000000	-1732.000000
21)	0.000000	-1438.000000
22)	0.000000	-1550.000000
23)	0.100000	0.000000
24)	0.100000	0.000000
25)	0.071600	0.000000
26)	0.100000	0.000000
27)	0.071600	0.000000
28)	0.100000	0.000000
29)	0.071600	0.000000
30)	0.100000	0.000000
31)	0.100000	0.000000

NO. ITERATIONS= 2

ANEXO 3: Modelagem do Exemplo 3 em LINDO 6.1

```
!MODELAGEM
!CARACTERÍSTICAS DO MODELO:
!3 estados possíveis para o estoque inicial:
!i=0 - estoque menor que zero
!i=1 - estoque igual a zero
!i=2 - estoque maior que zero
!As ações possíveis são:
!k=0 - não pedir
!k=1 - pedir uma unidade
!k=2 - pedir duas unidades
```

!Política	CR	CI	CM	Total
!P(0,0)	0	7000	0	7000
!P(0,1)	400	2610	0	3010
!P(0,2)	400	1429	0	1829
!P(1,0)	0	1733	0	1733
!P(1,1)	400	551	587	1538
!P(1,2)	400	341	1352	2093
!P(2,0)	0	315	1332	1647
!P(2,1)	400	105	2136	2641
!P(2,2)	400	53	2914	3367

```
MIN 7000 Y00 + 3010 Y01 + 1829 Y02 + 1733 Y10 + 1538 Y11 + 2093 Y12 +
1647 Y20 + 2641 Y21 + 3367 Y22
```

```
SUBJECT TO
```

- 2) Y00 >= 0
- 3) Y10 >= 0
- 4) Y20 >= 0
- 5) Y01 >= 0
- 6) Y11 >= 0
- 7) Y21 >= 0
- 8) Y02 >= 0
- 9) Y12 >= 0
- 10) Y22 >= 0
- 11) Y00 <= 1
- 12) Y10 <= 1
- 13) Y20 <= 1

- 14) $Y01 \leq 1$
- 15) $Y11 \leq 1$
- 16) $Y21 \leq 1$
- 17) $Y02 \leq 1$
- 18) $Y12 \leq 1$
- 19) $Y22 \leq 1$
- 20) $Y00 + Y01 + Y02 = 1$
- 21) $Y10 + Y11 + Y12 = 1$
- 22) $Y20 + Y21 + Y22 = 1$

!Restrições de Nível de Serviço

- 23) $1 Y00 \leq 0.1$
- 24) $0.2475 Y01 \leq 0.1$
- 25) $0.0450 Y02 \leq 0.1$
- 26) $0.2475 Y10 \leq 0.1$
- 27) $0.0450 Y11 \leq 0.1$
- 28) $0.0090 Y12 \leq 0.1$
- 29) $0.0450 Y20 \leq 0.1$
- 30) $0.0090 Y21 \leq 0.1$
- 31) $0.0000 Y22 \leq 0.1$

!SOLUÇÃO

OBJECTIVE FUNCTION VALUE

1)	5014.000	
VARIABLE	VALUE	REDUCED COST
Y00	0.000000	5171.000000
Y01	0.000000	1181.000000
Y02	1.000000	0.000000
Y10	0.000000	195.000000
Y11	1.000000	0.000000
Y12	0.000000	555.000000
Y20	1.000000	0.000000
Y21	0.000000	994.000000
Y22	0.000000	1720.000000

ROW	SLACK OR SURPLUS	DUAL PRICES
2)	0.000000	0.000000
3)	0.000000	0.000000
4)	1.000000	0.000000
5)	0.000000	0.000000

6)	1.000000	0.000000
7)	0.000000	0.000000
8)	1.000000	0.000000
9)	0.000000	0.000000
10)	0.000000	0.000000
11)	1.000000	0.000000
12)	1.000000	0.000000
13)	0.000000	0.000000
14)	1.000000	0.000000
15)	0.000000	0.000000
16)	1.000000	0.000000
17)	0.000000	0.000000
18)	1.000000	0.000000
19)	1.000000	0.000000
20)	0.000000	-1829.000000
21)	0.000000	-1538.000000
22)	0.000000	-1647.000000
23)	0.100000	0.000000
24)	0.100000	0.000000
25)	0.055000	0.000000
26)	0.100000	0.000000
27)	0.055000	0.000000
28)	0.100000	0.000000
29)	0.055000	0.000000
30)	0.100000	0.000000
31)	0.100000	0.000000

NO. ITERATIONS= 2

ANEXO 4: Cenários Criados para Validação do Modelo Matemático – Exemplo 1

Tabela 33 - Exemplo 1: variação no custo de indisponibilidade

	Custo de Indisponibilidade	Custo Aquisição	Custo Ressuprimento	Consumo histórico
Cenário 1	700	10000	400	0,27
Cenário 2	1050	10000	400	0,27
Cenário 3	1400	10000	400	0,27
Cenário 4	1750	10000	400	0,27
Cenário 5	2100	10000	400	0,27
Cenário 6	2450	10000	400	0,27
Cenário 7	2800	10000	400	0,27
Cenário 8	3150	10000	400	0,27
Cenário 9	3500	10000	400	0,27
Cenário 10	3850	10000	400	0,27
Cenário 11	4200	10000	400	0,27
Cenário 12	4550	10000	400	0,27
Cenário 13	4900	10000	400	0,27
Cenário 14	5250	10000	400	0,27
Cenário 15	5600	10000	400	0,27
Cenário 16	5950	10000	400	0,27
Cenário 17	6300	10000	400	0,27
Cenário 18	6650	10000	400	0,27
Cenário 19	7000	10000	400	0,27
Cenário 20	7350	10000	400	0,27
Cenário 21	7700	10000	400	0,27
Cenário 22	8050	10000	400	0,27
Cenário 23	8400	10000	400	0,27
Cenário 24	8750	10000	400	0,27
Cenário 25	9100	10000	400	0,27
Cenário 26	9450	10000	400	0,27
Cenário 27	9800	10000	400	0,27
Cenário 28	10150	10000	400	0,27
Cenário 29	10500	10000	400	0,27
Cenário 30	10850	10000	400	0,27
Cenário 31	11200	10000	400	0,27
Cenário 32	11550	10000	400	0,27
Cenário 33	11900	10000	400	0,27
Cenário 34	12250	10000	400	0,27
Cenário 35	12600	10000	400	0,27
Cenário 36	12950	10000	400	0,27
Cenário 37	13300	10000	400	0,27
Cenário 38	13650	10000	400	0,27
Cenário 39	14000	10000	400	0,27

Tabela 34 - Exemplo 1: variação no custo de aquisição

	Custo de Indisponibilidade	Custo Aquisição	Custo Ressuprimento	Consumo histórico
Cenário 40	7000	1000	400	0,27
Cenário 41	7000	1500	400	0,27
Cenário 42	7000	2000	400	0,27
Cenário 43	7000	2500	400	0,27
Cenário 44	7000	3000	400	0,27
Cenário 45	7000	3500	400	0,27
Cenário 46	7000	4000	400	0,27
Cenário 47	7000	4500	400	0,27
Cenário 48	7000	5000	400	0,27
Cenário 49	7000	5500	400	0,27
Cenário 50	7000	6000	400	0,27
Cenário 51	7000	6500	400	0,27
Cenário 52	7000	7000	400	0,27
Cenário 53	7000	7500	400	0,27
Cenário 54	7000	8000	400	0,27
Cenário 55	7000	8500	400	0,27
Cenário 56	7000	9000	400	0,27
Cenário 57	7000	9500	400	0,27
Cenário 58	7000	10000	400	0,27
Cenário 59	7000	10500	400	0,27
Cenário 60	7000	11000	400	0,27
Cenário 61	7000	11500	400	0,27
Cenário 62	7000	12000	400	0,27
Cenário 63	7000	12500	400	0,27
Cenário 64	7000	13000	400	0,27
Cenário 65	7000	13500	400	0,27
Cenário 66	7000	14000	400	0,27
Cenário 67	7000	14500	400	0,27
Cenário 68	7000	15000	400	0,27
Cenário 69	7000	15500	400	0,27
Cenário 70	7000	16000	400	0,27
Cenário 71	7000	16500	400	0,27
Cenário 72	7000	17000	400	0,27
Cenário 73	7000	17500	400	0,27
Cenário 74	7000	18000	400	0,27
Cenário 75	7000	18500	400	0,27
Cenário 76	7000	19000	400	0,27
Cenário 77	7000	19500	400	0,27
Cenário 78	7000	20000	400	0,27

Tabela 35 - Exemplo 1: variação no custo de ressuprimento

	Custo de Indisponibilidade	Custo Aquisição	Custo Ressuprimento	Consumo histórico
Cenário 79	7000	10000	40	0,27
Cenário 80	7000	10000	60	0,27
Cenário 81	7000	10000	80	0,27
Cenário 82	7000	10000	100	0,27
Cenário 83	7000	10000	120	0,27
Cenário 84	7000	10000	140	0,27
Cenário 85	7000	10000	160	0,27
Cenário 86	7000	10000	180	0,27
Cenário 87	7000	10000	200	0,27
Cenário 88	7000	10000	220	0,27
Cenário 89	7000	10000	240	0,27
Cenário 90	7000	10000	260	0,27
Cenário 91	7000	10000	280	0,27
Cenário 92	7000	10000	300	0,27
Cenário 93	7000	10000	320	0,27
Cenário 94	7000	10000	340	0,27
Cenário 95	7000	10000	360	0,27
Cenário 96	7000	10000	380	0,27
Cenário 97	7000	10000	400	0,27
Cenário 98	7000	10000	420	0,27
Cenário 99	7000	10000	440	0,27
Cenário 100	7000	10000	460	0,27
Cenário 101	7000	10000	480	0,27
Cenário 102	7000	10000	500	0,27
Cenário 103	7000	10000	520	0,27
Cenário 104	7000	10000	540	0,27
Cenário 105	7000	10000	560	0,27
Cenário 106	7000	10000	580	0,27
Cenário 107	7000	10000	600	0,27
Cenário 108	7000	10000	620	0,27
Cenário 109	7000	10000	640	0,27
Cenário 110	7000	10000	660	0,27
Cenário 111	7000	10000	680	0,27
Cenário 112	7000	10000	700	0,27
Cenário 113	7000	10000	720	0,27
Cenário 114	7000	10000	740	0,27
Cenário 115	7000	10000	760	0,27
Cenário 116	7000	10000	780	0,27
Cenário 117	7000	10000	800	0,27

Tabela 36 - Exemplo 1: variação no consumo histórico

	Custo de Indisponibilidade	Custo Aquisição	Custo Ressuprimento	Consumo histórico
Cenário 118	7000	10000	400	0,03
Cenário 119	7000	10000	400	0,04
Cenário 120	7000	10000	400	0,05
Cenário 121	7000	10000	400	0,07
Cenário 122	7000	10000	400	0,08
Cenário 123	7000	10000	400	0,09
Cenário 124	7000	10000	400	0,11
Cenário 125	7000	10000	400	0,12
Cenário 126	7000	10000	400	0,14
Cenário 127	7000	10000	400	0,15
Cenário 128	7000	10000	400	0,16
Cenário 129	7000	10000	400	0,18
Cenário 130	7000	10000	400	0,19
Cenário 131	7000	10000	400	0,20
Cenário 132	7000	10000	400	0,22
Cenário 133	7000	10000	400	0,23
Cenário 134	7000	10000	400	0,24
Cenário 135	7000	10000	400	0,26
Cenário 136	7000	10000	400	0,27
Cenário 137	7000	10000	400	0,28
Cenário 138	7000	10000	400	0,30
Cenário 139	7000	10000	400	0,31
Cenário 140	7000	10000	400	0,32
Cenário 141	7000	10000	400	0,34
Cenário 142	7000	10000	400	0,35
Cenário 143	7000	10000	400	0,36
Cenário 144	7000	10000	400	0,38
Cenário 145	7000	10000	400	0,39
Cenário 146	7000	10000	400	0,41
Cenário 147	7000	10000	400	0,42
Cenário 148	7000	10000	400	0,43
Cenário 149	7000	10000	400	0,45
Cenário 150	7000	10000	400	0,46
Cenário 151	7000	10000	400	0,47
Cenário 152	7000	10000	400	0,49
Cenário 153	7000	10000	400	0,50
Cenário 154	7000	10000	400	0,51
Cenário 155	7000	10000	400	0,53
Cenário 156	7000	10000	400	0,54

ANEXO 5: Cenários Criados para Validação do Modelo Matemático – Exemplo 2

Tabela 37 - Exemplo 2: variação no custo de indisponibilidade

	Custo de Indisponibilidade	Custo Aquisição	Custo Ressuprimento	Consumo histórico
Cenário 1	700	10000	400	0,027
Cenário 2	1050	10000	400	0,027
Cenário 3	1400	10000	400	0,027
Cenário 4	1750	10000	400	0,027
Cenário 5	2100	10000	400	0,027
Cenário 6	2450	10000	400	0,027
Cenário 7	2800	10000	400	0,027
Cenário 8	3150	10000	400	0,027
Cenário 9	3500	10000	400	0,027
Cenário 10	3850	10000	400	0,027
Cenário 11	4200	10000	400	0,027
Cenário 12	4550	10000	400	0,027
Cenário 13	4900	10000	400	0,027
Cenário 14	5250	10000	400	0,027
Cenário 15	5600	10000	400	0,027
Cenário 16	5950	10000	400	0,027
Cenário 17	6300	10000	400	0,027
Cenário 18	6650	10000	400	0,027
Cenário 19	7000	10000	400	0,027
Cenário 20	7350	10000	400	0,027
Cenário 21	7700	10000	400	0,027
Cenário 22	8050	10000	400	0,027
Cenário 23	8400	10000	400	0,027
Cenário 24	8750	10000	400	0,027
Cenário 25	9100	10000	400	0,027
Cenário 26	9450	10000	400	0,027
Cenário 27	9800	10000	400	0,027
Cenário 28	10150	10000	400	0,027
Cenário 29	10500	10000	400	0,027
Cenário 30	10850	10000	400	0,027
Cenário 31	11200	10000	400	0,027
Cenário 32	11550	10000	400	0,027
Cenário 33	11900	10000	400	0,027
Cenário 34	12250	10000	400	0,027
Cenário 35	12600	10000	400	0,027
Cenário 36	12950	10000	400	0,027
Cenário 37	13300	10000	400	0,027
Cenário 38	13650	10000	400	0,027
Cenário 39	14000	10000	400	0,027

Tabela 38 - Exemplo 2: variação no custo de aquisição

	Custo de Indisponibilidade	Custo Aquisição	Custo Ressuprimento	Consumo histórico
Cenário 40	7000	1000	400	0,027
Cenário 41	7000	1500	400	0,027
Cenário 42	7000	2000	400	0,027
Cenário 43	7000	2500	400	0,027
Cenário 44	7000	3000	400	0,027
Cenário 45	7000	3500	400	0,027
Cenário 46	7000	4000	400	0,027
Cenário 47	7000	4500	400	0,027
Cenário 48	7000	5000	400	0,027
Cenário 49	7000	5500	400	0,027
Cenário 50	7000	6000	400	0,027
Cenário 51	7000	6500	400	0,027
Cenário 52	7000	7000	400	0,027
Cenário 53	7000	7500	400	0,027
Cenário 54	7000	8000	400	0,027
Cenário 55	7000	8500	400	0,027
Cenário 56	7000	9000	400	0,027
Cenário 57	7000	9500	400	0,027
Cenário 58	7000	10000	400	0,027
Cenário 59	7000	10500	400	0,027
Cenário 60	7000	11000	400	0,027
Cenário 61	7000	11500	400	0,027
Cenário 62	7000	12000	400	0,027
Cenário 63	7000	12500	400	0,027
Cenário 64	7000	13000	400	0,027
Cenário 65	7000	13500	400	0,027
Cenário 66	7000	14000	400	0,027
Cenário 67	7000	14500	400	0,027
Cenário 68	7000	15000	400	0,027
Cenário 69	7000	15500	400	0,027
Cenário 70	7000	16000	400	0,027
Cenário 71	7000	16500	400	0,027
Cenário 72	7000	17000	400	0,027
Cenário 73	7000	17500	400	0,027
Cenário 74	7000	18000	400	0,027
Cenário 75	7000	18500	400	0,027
Cenário 76	7000	19000	400	0,027
Cenário 77	7000	19500	400	0,027
Cenário 78	7000	20000	400	0,027

Tabela 39 - Exemplo 2: variação no custo de ressuprimento

	Custo de Indisponibilidade	Custo Aquisição	Custo Ressuprimento	Consumo histórico
Cenário 79	7000	10000	40	0,027
Cenário 80	7000	10000	60	0,027
Cenário 81	7000	10000	80	0,027
Cenário 82	7000	10000	100	0,027
Cenário 83	7000	10000	120	0,027
Cenário 84	7000	10000	140	0,027
Cenário 85	7000	10000	160	0,027
Cenário 86	7000	10000	180	0,027
Cenário 87	7000	10000	200	0,027
Cenário 88	7000	10000	220	0,027
Cenário 89	7000	10000	240	0,027
Cenário 90	7000	10000	260	0,027
Cenário 91	7000	10000	280	0,027
Cenário 92	7000	10000	300	0,027
Cenário 93	7000	10000	320	0,027
Cenário 94	7000	10000	340	0,027
Cenário 95	7000	10000	360	0,027
Cenário 96	7000	10000	380	0,027
Cenário 97	7000	10000	400	0,027
Cenário 98	7000	10000	420	0,027
Cenário 99	7000	10000	440	0,027
Cenário 100	7000	10000	460	0,027
Cenário 101	7000	10000	480	0,027
Cenário 102	7000	10000	500	0,027
Cenário 103	7000	10000	520	0,027
Cenário 104	7000	10000	540	0,027
Cenário 105	7000	10000	560	0,027
Cenário 106	7000	10000	580	0,027
Cenário 107	7000	10000	600	0,027
Cenário 108	7000	10000	620	0,027
Cenário 109	7000	10000	640	0,027
Cenário 110	7000	10000	660	0,027
Cenário 111	7000	10000	680	0,027
Cenário 112	7000	10000	700	0,027
Cenário 113	7000	10000	720	0,027
Cenário 114	7000	10000	740	0,027
Cenário 115	7000	10000	760	0,027
Cenário 116	7000	10000	780	0,027
Cenário 117	7000	10000	800	0,027

Tabela 40 - Exemplo 2: variação no consumo histórico

	Custo de Indisponibilidade	Custo Aquisição	Custo Ressuprimento	Consumo histórico
Cenário 118	7000	10000	400	0,0027
Cenário 119	7000	10000	400	0,0041
Cenário 120	7000	10000	400	0,0054
Cenário 121	7000	10000	400	0,0068
Cenário 122	7000	10000	400	0,0081
Cenário 123	7000	10000	400	0,0095
Cenário 124	7000	10000	400	0,0108
Cenário 125	7000	10000	400	0,0122
Cenário 126	7000	10000	400	0,0135
Cenário 127	7000	10000	400	0,0149
Cenário 128	7000	10000	400	0,0162
Cenário 129	7000	10000	400	0,0176
Cenário 130	7000	10000	400	0,0189
Cenário 131	7000	10000	400	0,0203
Cenário 132	7000	10000	400	0,0216
Cenário 133	7000	10000	400	0,0230
Cenário 134	7000	10000	400	0,0243
Cenário 135	7000	10000	400	0,0257
Cenário 136	7000	10000	400	0,0270
Cenário 137	7000	10000	400	0,0284
Cenário 138	7000	10000	400	0,0297
Cenário 139	7000	10000	400	0,0311
Cenário 140	7000	10000	400	0,0324
Cenário 141	7000	10000	400	0,0338
Cenário 142	7000	10000	400	0,0351
Cenário 143	7000	10000	400	0,0365
Cenário 144	7000	10000	400	0,0378
Cenário 145	7000	10000	400	0,0392
Cenário 146	7000	10000	400	0,0405
Cenário 147	7000	10000	400	0,0419
Cenário 148	7000	10000	400	0,0432
Cenário 149	7000	10000	400	0,0446
Cenário 150	7000	10000	400	0,0459
Cenário 151	7000	10000	400	0,0473
Cenário 152	7000	10000	400	0,0486
Cenário 153	7000	10000	400	0,0500
Cenário 154	7000	10000	400	0,0513
Cenário 155	7000	10000	400	0,0527
Cenário 156	7000	10000	400	0,0540

ANEXO 6: Cenários Criados para Validação do Modelo Matemático – Exemplo 3

Tabela 41 - Exemplo 3: variação no custo de indisponibilidade

	Custo de Indisponibilidade	Custo Aquisição	Custo Ressuprimento	Consumo histórico
Cenário 1	700	10000	400	0,27
Cenário 2	1050	10000	400	0,27
Cenário 3	1400	10000	400	0,27
Cenário 4	1750	10000	400	0,27
Cenário 5	2100	10000	400	0,27
Cenário 6	2450	10000	400	0,27
Cenário 7	2800	10000	400	0,27
Cenário 8	3150	10000	400	0,27
Cenário 9	3500	10000	400	0,27
Cenário 10	3850	10000	400	0,27
Cenário 11	4200	10000	400	0,27
Cenário 12	4550	10000	400	0,27
Cenário 13	4900	10000	400	0,27
Cenário 14	5250	10000	400	0,27
Cenário 15	5600	10000	400	0,27
Cenário 16	5950	10000	400	0,27
Cenário 17	6300	10000	400	0,27
Cenário 18	6650	10000	400	0,27
Cenário 19	7000	10000	400	0,27
Cenário 20	7350	10000	400	0,27
Cenário 21	7700	10000	400	0,27
Cenário 22	8050	10000	400	0,27
Cenário 23	8400	10000	400	0,27
Cenário 24	8750	10000	400	0,27
Cenário 25	9100	10000	400	0,27
Cenário 26	9450	10000	400	0,27
Cenário 27	9800	10000	400	0,27
Cenário 28	10150	10000	400	0,27
Cenário 29	10500	10000	400	0,27
Cenário 30	10850	10000	400	0,27
Cenário 31	11200	10000	400	0,27
Cenário 32	11550	10000	400	0,27
Cenário 33	11900	10000	400	0,27
Cenário 34	12250	10000	400	0,27
Cenário 35	12600	10000	400	0,27
Cenário 36	12950	10000	400	0,27
Cenário 37	13300	10000	400	0,27
Cenário 38	13650	10000	400	0,27
Cenário 39	14000	10000	400	0,27

Tabela 42 - Exemplo 3: variação no custo de aquisição

	Custo de Indisponibilidade	Custo Aquisição	Custo Ressuprimento	Consumo histórico
Cenário 40	7000	1000	400	0,27
Cenário 41	7000	1500	400	0,27
Cenário 42	7000	2000	400	0,27
Cenário 43	7000	2500	400	0,27
Cenário 44	7000	3000	400	0,27
Cenário 45	7000	3500	400	0,27
Cenário 46	7000	4000	400	0,27
Cenário 47	7000	4500	400	0,27
Cenário 48	7000	5000	400	0,27
Cenário 49	7000	5500	400	0,27
Cenário 50	7000	6000	400	0,27
Cenário 51	7000	6500	400	0,27
Cenário 52	7000	7000	400	0,27
Cenário 53	7000	7500	400	0,27
Cenário 54	7000	8000	400	0,27
Cenário 55	7000	8500	400	0,27
Cenário 56	7000	9000	400	0,27
Cenário 57	7000	9500	400	0,27
Cenário 58	7000	10000	400	0,27
Cenário 59	7000	10500	400	0,27
Cenário 60	7000	11000	400	0,27
Cenário 61	7000	11500	400	0,27
Cenário 62	7000	12000	400	0,27
Cenário 63	7000	12500	400	0,27
Cenário 64	7000	13000	400	0,27
Cenário 65	7000	13500	400	0,27
Cenário 66	7000	14000	400	0,27
Cenário 67	7000	14500	400	0,27
Cenário 68	7000	15000	400	0,27
Cenário 69	7000	15500	400	0,27
Cenário 70	7000	16000	400	0,27
Cenário 71	7000	16500	400	0,27
Cenário 72	7000	17000	400	0,27
Cenário 73	7000	17500	400	0,27
Cenário 74	7000	18000	400	0,27
Cenário 75	7000	18500	400	0,27
Cenário 76	7000	19000	400	0,27
Cenário 77	7000	19500	400	0,27
Cenário 78	7000	20000	400	0,27

Tabela 43 - Exemplo 3: variação no custo de ressuprimento

	Custo de Indisponibilidade	Custo Aquisição	Custo Ressuprimento	Consumo histórico
Cenário 79	7000	10000	40	0,27
Cenário 80	7000	10000	60	0,27
Cenário 81	7000	10000	80	0,27
Cenário 82	7000	10000	100	0,27
Cenário 83	7000	10000	120	0,27
Cenário 84	7000	10000	140	0,27
Cenário 85	7000	10000	160	0,27
Cenário 86	7000	10000	180	0,27
Cenário 87	7000	10000	200	0,27
Cenário 88	7000	10000	220	0,27
Cenário 89	7000	10000	240	0,27
Cenário 90	7000	10000	260	0,27
Cenário 91	7000	10000	280	0,27
Cenário 92	7000	10000	300	0,27
Cenário 93	7000	10000	320	0,27
Cenário 94	7000	10000	340	0,27
Cenário 95	7000	10000	360	0,27
Cenário 96	7000	10000	380	0,27
Cenário 97	7000	10000	400	0,27
Cenário 98	7000	10000	420	0,27
Cenário 99	7000	10000	440	0,27
Cenário 100	7000	10000	460	0,27
Cenário 101	7000	10000	480	0,27
Cenário 102	7000	10000	500	0,27
Cenário 103	7000	10000	520	0,27
Cenário 104	7000	10000	540	0,27
Cenário 105	7000	10000	560	0,27
Cenário 106	7000	10000	580	0,27
Cenário 107	7000	10000	600	0,27
Cenário 108	7000	10000	620	0,27
Cenário 109	7000	10000	640	0,27
Cenário 110	7000	10000	660	0,27
Cenário 111	7000	10000	680	0,27
Cenário 112	7000	10000	700	0,27
Cenário 113	7000	10000	720	0,27
Cenário 114	7000	10000	740	0,27
Cenário 115	7000	10000	760	0,27
Cenário 116	7000	10000	780	0,27
Cenário 117	7000	10000	800	0,27

Tabela 44 - Exemplo 3: variação no consumo histórico

	Custo de Indisponibilidade	Custo Aquisição	Custo Ressuprimento	Consumo histórico
Cenário 118	7000	10000	400	0,03
Cenário 119	7000	10000	400	0,04
Cenário 120	7000	10000	400	0,05
Cenário 121	7000	10000	400	0,07
Cenário 122	7000	10000	400	0,08
Cenário 123	7000	10000	400	0,09
Cenário 124	7000	10000	400	0,11
Cenário 125	7000	10000	400	0,12
Cenário 126	7000	10000	400	0,14
Cenário 127	7000	10000	400	0,15
Cenário 128	7000	10000	400	0,16
Cenário 129	7000	10000	400	0,18
Cenário 130	7000	10000	400	0,19
Cenário 131	7000	10000	400	0,20
Cenário 132	7000	10000	400	0,22
Cenário 133	7000	10000	400	0,23
Cenário 134	7000	10000	400	0,24
Cenário 135	7000	10000	400	0,26
Cenário 136	7000	10000	400	0,27
Cenário 137	7000	10000	400	0,28
Cenário 138	7000	10000	400	0,30
Cenário 139	7000	10000	400	0,31
Cenário 140	7000	10000	400	0,32
Cenário 141	7000	10000	400	0,34
Cenário 142	7000	10000	400	0,35
Cenário 143	7000	10000	400	0,36
Cenário 144	7000	10000	400	0,38
Cenário 145	7000	10000	400	0,39
Cenário 146	7000	10000	400	0,41
Cenário 147	7000	10000	400	0,42
Cenário 148	7000	10000	400	0,43
Cenário 149	7000	10000	400	0,45
Cenário 150	7000	10000	400	0,46
Cenário 151	7000	10000	400	0,47
Cenário 152	7000	10000	400	0,49
Cenário 153	7000	10000	400	0,50
Cenário 154	7000	10000	400	0,51
Cenário 155	7000	10000	400	0,53
Cenário 156	7000	10000	400	0,54