

PEÇAS DE REPOSIÇÃO DE BAIXÍSSIMO GIRO: FORMULAÇÃO DE UMA
POLÍTICA DE ESTOQUES EM CONTRAPOSIÇÃO ÀS PEÇAS DE CONSUMO EM
MASSA

Paula Dias Elias

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientadores: Edilson Fernandes de Arruda

Virgílio José Martins Ferreira Filho

Rio de Janeiro
Setembro de 2013

PEÇAS DE REPOSIÇÃO DE BAIXÍSSIMO GIRO: FORMULAÇÃO DE UMA
POLÍTICA DE ESTOQUES EM CONTRAPOSIÇÃO ÀS PEÇAS DE CONSUMO EM
MASSA

Paula Dias Elias

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
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.

Examinada por:

Prof. João Bosco Ribeiro do Val

Prof. Edilson Fernandes de Arruda

Prof. Lino Guimarães Marujo

Prof. Virgílio José Martins Ferreira Filho

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

SETEMBRO DE 2013

Elias, Paula Dias

Peças de Reposição de Baixíssimo Giro: Formulação de Uma Política de Estoques em Contraposição às Peças de Consumo em Massa / Paula Dias Elias. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.

XIII, 86 p.: il.; 29,7 cm

Orientadores: Edilson Fernandes de Arruda

Virgílio José Martins Ferreira Filho

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE / Programa de Engenharia de Produção, 2013.

Referências Bibliográficas: p.72-77

1.Gestão de Estoques 2. Giro de Estoques. I Arruda, Edilson Fernandes de, et al. II Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Produção. III Título

Aos meus amados pais, marido e filha, e aos meus queridos professores do mestrado.

Agradecimentos

Aos professores da COPPE/UFRJ, principalmente aos meus orientadores Edilson e Virgílio, pelo direcionamento metodológico e constantes revisões realizadas.

À ANP, em decurso do fomento às minhas atividades de pesquisa.

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

PEÇAS DE REPOSIÇÃO DE BAIXÍSSIMO GIRO: FORMULAÇÃO DE UMA
POLÍTICA DE ESTOQUES EM CONTRAPOSIÇÃO ÀS PEÇAS DE CONSUMO EM
MASSA

Paula Dias Elias

Setembro/2013

Orientadores: Edilson Fernandes de Arruda

Virgílio José Martins Ferreira Filho

Programa: Engenharia de Produção

A gestão de estoques de peças de reposição de baixo giro pode ser considerada como um grande desafio da atualidade. Isto ocorre em função dos elevados custos de aquisição, longos tempos de reposta de fornecimento, baixo giro, consumo irregular e alto risco de obsolescência, tornando difícil, ou mesmo inviável, o gerenciamento pelos métodos tradicionais.

O presente trabalho apresenta uma nova metodologia, prática e eficaz, para a gestão de estoques desses materiais, por meio de uma classe de processos markovianos, denominada Processos Markovianos Determinísticos por Partes. Trata-se de uma abordagem distinta em relação aos atuais modelos disponíveis na literatura.

O estudo tem aplicação em setores como petrolífero, siderúrgico, automobilístico, aéreo e naval, que mantêm elevados custos de estoque de itens de reposição com baixíssimo consumo, mas primordiais ao processo produtivo. Nesse âmbito, as decisões precisam ser tomadas rapidamente, e algumas análises relacionadas ao gerenciamento de peças de reposição são deixadas em segundo plano.

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

LOW TURNOVER REPLACEMENT PARTS: CONTRAST TO MASS OF AN
INVENTORY POLICY IN OPPOSE TO CONSUMPTION REPLACEMENT PARTS

Paula Dias Elias

September/2013

Advisors: Edilson Fernandes de Arruda

Virgílio José Martins Ferreira Filho

Department: Production Engineering

The management low turnover replacement parts may be deemed as a huge challenge nowadays. Characteristics such as high acquisition costs, long supply answer time, low turnover, irregular consumption and high risk of obsolescence, render the management by traditional methods difficult or even impossible.

This study features a new methodology, practical and effective, for managing low turnover replacement parts. It makes use of a class of Markovian processes called Piecewise Deterministic Process. This is a novel approach and incorporates stock and order costs in an infinite horizon.

The findings in this work can be applied in industries such as oil, steel, automobile, air and maritime, which feature high storage costs of replacement items that have a very low consumption rate, but are instrumental to the productive process. In this sense, decisions must be taken swiftly, and often the analysis related to the management of replacement parts plays only a secondary role.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - Introdução.....	xiii
1.1 Relevância do tema.....	1
1.2 Motivação	2
1.3 Contextualização na literatura	3
1.3.1 Teoria clássica de gestão de estoque	5
1.3.2 Considerações sobre a gestão de peças de reposição.	7
1.3.3 Considerações sobre o giro baixíssimo	9
1.4 Justificativa.....	11
1.5 Objetivos específicos.....	12
1.6 Limitações do Estudo	13
1.7 Estrutura do Trabalho	13
CAPÍTULO 2 - Fundamentos da Gestão de Estoques.....	15
2.1 Estoques.....	15
2.2 Classificação dos estoques.....	16
2.3 Competências da gestão de estoques	17
2.4 Principais custos de estoque	18
2.4.1 Custos de manutenção de estoques.....	19
2.4.2 Custos do pedido	19
2.4.3 Custos da falta	19
2.4.4 Cálculo do custo total do estoque	20
2.5 Níveis de estocagem	21
2.6 Principais técnicas empregadas em gestão de estoques.....	22
2.6.1 Curva ABC	22

2.6.2 Indicadores de desempenho.....	23
2.6.3 Técnicas de previsão de demanda	23
2.6.4 Lote econômico de compras	24
2.6.5 Modelos de gestão de estoques.....	26
2.7 Posicionamento dos estoques	28
2.8 Planejamento do fluxo	29
CAPÍTULO 3 - Caracterização das Peças de Reposição	31
3.1 Peças de reposição	31
3.2 Desafios da gestão do estoque de peças de reposição	32
3.3 Classificação das peças de reposição.....	33
3.4 Caracterização das peças de reposição	34
3.5 Gestão de estoques de peças de reposição.....	35
3.5.1 Peças de consumo em massa	36
3.5.2 Peças de baixo giro	37
3.5.3 Peças de baixíssimo giro.....	40
3.6 Quadro Conceitual	42
3.7 Considerações	43
CAPÍTULO 4 - Modelagem.....	45
4.1 Considerações iniciais sobre o modelo.....	45
4.2 O sistema estudado	46
4.3 A demanda.....	47
4.4 A produção	48
4.5 Os saltos do processo.....	49
4.6 O controle impulsional	50
4.7 Os custos operacionais do sistema	52

4.8 Formulação do problema de controle impulsional	52
4.9 Operador de um salto ou uma intervenção	54
4.10 Cálculo dos operadores.....	55
4.11 Retornando ao problema original	56
4.12 Considerações sobre o programa principal.....	56
4.13 Considerações sobre o modelo	58
CAPÍTULO 5 - Experimentos Numéricos	59
5.1 Experimentos numéricos	59
5.2 Resultados.....	62
5.2 Análise dos resultados	66
CAPÍTULO 6 - Conclusões.....	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
APÊNDICE A	78
A.1 Lema 3.1	78
A.2 Lema 3.2	80
A.3 Lema 3.4	Erro!
Indicador não definido.	
APÊNDICE B	Erro!
Indicador não definido.	
B.1 Valores de V_1 obtidos nos experimentos realizados	Erro!
Indicador não definido.	

LISTA DAS FIGURAS

Figura 3.1: Quadro Conceitual (WANKE, 2012).....	43
Figura 4.1: Trajetória do processo ξ_t (ARRUDA, 2002)	48
Figura 4.2: Trajetória do processo (η_t, ξ_t) (ARRUDA, 2002).....	50
Figura 4.3: Trajetória típica do problema de controle impulsional (ARRUDA, 2002).....	51
Figura 5.1: Funções do custo de armazenagem	62
Figura 5.2: Caso A.....	63
Figura 5.3: Caso B	63
Figura 5.4: Caso C	63
Figura 5.5: Caso D.....	64
Figura 5.6: Caso E	64
Figura 5.7: Caso F	64
Figura 5.8: Caso G.....	65
Figura 5.9: Caso H.....	65
Figura 5.10: Caso I	65

LISTA DAS TABELAS

Tabela 5.1: Casos numéricos **Erro! Indicador não definido.**

LISTA DOS GRÁFICOS

Gráfico B.1: Caso A	82
Gráfico B.2: Caso B	82
Gráfico B.3: Caso C	83
Gráfico B.4: Caso D	83
Gráfico B.5: Caso E.....	84
Gráfico B.6: Caso F	84
Gráfico B.7: Caso G	85
Gráfico B.8: Caso H	85
Gráfico B.9: Caso I.....	86

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo introdutório, duas questões primordiais sobre o controle de estoques de peças de reposição são mantidas em foco: o porquê da administração destes estoques receberem uma atenção especial, ou seja, a sua importância, e o motivo pelo qual os métodos tradicionais de gestão de estoques são, na prática, ineficazes para o controle destas peças.

1.1 Relevância do tema

A gestão de estoques de peças de reposição pode ser considerada um grande desafio acadêmico e empresarial (ROSA; MAYERLE; GONÇALVES, 2010; WANKE, 2012). Segundo Wanke (2003), as maiores dificuldades na administração desses itens são os elevados custos de aquisição, os longos tempos de reposta de fornecimento (*lead-time*) e o giro baixíssimo.

Outras dificuldades normalmente somam-se a estas, tais como o consumo irregular e o alto risco de obsolescência. Estas características dificultam, ou até mesmo tornam inviável, o gerenciamento de estoque de peças de reposição pelos métodos tradicionais (SILVA, 2009).

Sandvig e Allaire (1998) estimam em torno de US\$ 5 e 15 milhões de dólares o valor imobilizado em peças de reposição que usualmente é encontrado em uma empresa típica fabricante de bens de consumo, isto com um custo de oportunidade anual oscilando entre 20 a 40% do valor em estoque.

Se, por um lado, o investimento em estoque pode ser visto como um capital apresado - absorve grande parte do capital de giro da empresa e não agrega valor aos

produtos - por outro, minimizar as faltas e satisfazer os clientes é primordial para o sucesso da organização.

De fato, a alta produtividade operacional está atrelada à continuidade do processo produtivo; desta forma paradas e falhas não esperadas devem ser evitadas ao máximo, e uma vez ocorrendo, precisam ser reparadas rapidamente.

Não obstante possíveis multas e custos operacionais não planejados ocasionados pela parada de um equipamento, a falta de uma peça de reposição incorre em prejuízos intangíveis à imagem da empresa (CORRÊA; DIAS,1998).

Sendo a reposição de peças indispensável para assegurar a continuidade do processo produtivo, é primordial que se desenvolvam políticas de estoques que assegurem uma quantidade de peças adequada para atender a determinados níveis de desempenho. Tais políticas, como será detalhado a seguir, podem não ser obtidas através dos métodos tradicionais de gestão de itens de consumo (SILVA, 2009).

1.2 Motivação

Primeiramente, cabe dizer que o presente estudo foi motivado pela observação das dificuldades diárias e dos altos custos despendidos por uma grande empresa petrolífera, resultantes de uma rotina marcada pela falta de critérios claramente definidos e ausência de uma sistemática prática ao lidar com estoques de peças de reposição.

A cadeia de valor do petróleo se inicia na Exploração e Produção (E&P), passando pelo refino e terminando nas etapas de marketing e vendas, envolvendo inúmeros serviços dedicados de transporte e armazenagem. A relação entre os elos da cadeia é marcada pela dinâmica acerca da comercialização de energia, no qual se encontra inserida (BRAGA, 2004).

Portanto, para o setor petrolífero, a cadeia logística é de suma importância em todas as etapas produtivas. E, como o petróleo é a energia mais utilizada na atualidade, também é fundamental que sejam desenvolvidas, estudadas e utilizadas técnicas para auxílio à tomada de decisões da cadeia logística.

Dado o alto valor econômico da matéria-prima do petróleo e dos derivados, bem como dos custos operacionais de estocagem, a correta estimativa dos níveis de estoque

que manterão uma segurança operacional no abastecimento das unidades produtivas é um fator vital.

Portanto, entre as decisões de grande importância acerca da cadeia de abastecimento do petróleo, surge a necessidade de definir a política de gestão de estoques das peças sobressalentes.

Deve-se ainda adicionar à complexidade do sistema a natureza estocástica e sazonal dos mercados, dificultando sobremaneira a definição da política de gestão a ser implementada, a qual deve levar em consideração os impactos das incertezas futuras.

Neste ambiente, é comum a adoção de modelos sistêmicos, capazes de auxiliar a determinação do nível de estoque de cada produto que seja capaz de atender às exigências de mercado e particularidades das empresas, considerando inclusive crescimentos anuais e demandas futuras.

Apesar de todo o avanço tecnológico observado no setor, pouca evolução ocorreu na gestão de peças de reposição, e ainda são verificados custos muito elevados com estoques de peças sobressalentes de raro consumo. Além disso, é marcante a descentralização do estoque destas peças.

No ambiente petrolífero, é fácil perceber que as decisões acerca do estoque de peças de reposição privilegiam o serviço ao cliente, ou seja, mesmo com custo de aquisição alto e com demanda irregular, as peças fundamentais ao processo produtivo não podem faltar.

Com um intuito de entender e colocar em perspectiva as questões que norteiam essa problemática, surgiram as primeiras pesquisas que marcaram o início deste trabalho.

1.3 Contextualização na literatura

Em função de seu caráter estratégico, a administração de estoques sempre foi um importante foco dos universos acadêmico e empresarial (ROSA; MAYERLE; GONÇALVES, 2010; WANKE, 2012).

Além do grande impacto que representa no resultado contábil de uma empresa, em função dos significativos volumes de capital envolvidos, a gestão de estoque

eficiente procura assegurar a maior disponibilidade de produto ao cliente final ao menor custo possível, fortalecendo a empresa frente à competitividade dos mercados (MACHLINE, 1981).

Entre 1950 e 1994, mesmo com a adoção de teorias clássicas de gestão de estoques por parte das empresas, pode-se dizer que as principais decisões relacionadas a este universo foram impulsionadas pelas condições econômicas do país, marcadas pela instabilidade econômica e alta taxa de inflação.

Entre 1950 e 1980, a taxa média de inflação estava entre 25% e 30% ao ano. Dos anos 80 até a adoção do Real, a taxa média anual foi superior a 600%, passando dos 1.000% em 1989 e chegando a quase 2.500% em 1993 (MALAN, 2012).

Segundo Machline (1981), no período entre 1960 e 1964, houve substancial investimento em estoques. Atraídas pela possibilidade de se obter grandes lucros pela simples acumulação - somente deixando o estoque parado, as empresas acabaram acumulando excessos, e a falta de critério na tomada de decisão trouxe perdas.

De 1964 a 1979, ainda segundo o mesmo autor, as empresas tentaram reduzir seus estoques. Porém, abandonaram de forma abusiva o princípio de manter estoques de reserva, enxugando de forma demasiada seus estoques. Em 1980, algumas empresas perceberam que seria de novo vantajoso investir em estoques, pois os juros estavam baixos em comparação com a elevação dos demais preços.

Assim sendo, procurou-se ilustrar que períodos de inflação elevada geraram sobressaltos, alterações entre momentos de crises e euforia. E, desta forma, proporcionaram entraves à escolha do modelo de gestão de estoques mais apropriado, impedindo uma projeção da demanda futura adequada, em função das dificuldades em se medir alguns dados importantes das empresas, como crescimento, lucros e custos (MACHLINE, 1981).

Com o término dos grandes ciclos inflacionários, as organizações passaram por um período de forte pressão por redução de estoques. Grandes empresas migraram para modelos de estoques enxutos, com redução dos acúmulos nos pontos de vendas e o compartilhamento de um estoque central completando o cenário.

Atualmente, à necessidade de se garantir a maior disponibilidade de produto ao cliente final ao menor custo possível, somam-se os complexos desafios inerentes ao aumento das exigências dos consumidores do mundo contemporâneo, principalmente no que se refere a respostas rápidas e à diferenciação dos produtos. Esta última é responsável pela proliferação das unidades de manutenção dos estoques (*SKUs*), administrados, conferindo maior irregularidade ao padrão da demanda (REGO; MESQUITA, 2011).

Neste momento, expostas as questões acima, cabe afirmar-se que o comportamento da demanda é um dos principais fatores que contribui para o aumento da complexidade dos modelos de gestão de estoque (WANKE, 2012).

Além de Wanke (2012), cujo objetivo era justamente o de explorar o padrão de demanda como principal fator interveniente na gestão de estoques, muitos outros autores, como: Love (1979), Silver, Pyke e Peterson (1998), Eaves e Kingsman (2004), Bai (2005), Syntetos, Boylan e Croston (2005) e Boylan, Syntetos e Karakostas (2008), também destacam esse fato em suas publicações.

Isto explica os entraves em se utilizar os métodos tradicionais de gestão de estoques para a administração de peças de reposição; como a grande maioria destes itens possui baixo giro, com demanda irregular e intermitente, a tarefa de prever a demanda futura é árdua, imputando uma grande complexidade em se desenvolver modelos de estoque para controlá-los (SILVA, 2009).

1.3.1 Teoria clássica de gestão de estoque

A teoria clássica de gestão de estoques fundamenta-se em princípios matemáticos, estatísticos e econômicos, estando portanto sujeita a algumas condições de ambiente, tais como: estabilidade monetária, previsibilidade e relacionamentos racionais entre os participantes (MACHLINE, 1981).

Rego (2006), que estudou a lacuna entre a teoria e a prática de gestão de estoques, afirma que os modelos básicos de gestão de estoques empregados nas empresas costumam ser os mesmos há décadas.

De toda forma, em sua essência, esta disciplina procura sempre responder três questões-chave relativas aos estoques: quando pedir, quanto pedir e quanto manter em estoques de segurança (Namat; Chen, 1999; SILVA, 2009; WANKE, 2012).

Wanke (2011) bem define a gestão de estoques como o conjunto de decisões que coordenam a demanda existente com a oferta de produtos e materiais, de modo que sejam atingidos os custos e os níveis de serviços especificados, não se esquecendo de se observar as características do produto, da operação e da demanda.

Diante desta lógica, que conduz a gestão de estoques, a demanda pode ser classificada como: determinística ou probabilística, de distribuição conhecida ou desconhecida e, ainda, ser independente ou dependente (CORRÊA; CORRÊA, 2005; REGO, 2006; SILVA, 2009; WANKE, 2012).

Segundo Rego (2006), demandas determinísticas usualmente estão associadas à derivação da demanda de outros itens, atribuindo uma dependência em sua previsão; já demandas probabilísticas se relacionam com as decisões de consumo dos elementos do mercado e, portanto, a gestão de estoques destes itens tem como ponto de partida a previsão de demanda futura.

Os modelos clássicos de gestão de estoque, que serão apresentados no próximo capítulo deste estudo, buscam otimizar os custos envolvidos nas operações (REGO, 2006), de forma que o problema fundamental está em estimar os parâmetros dos custos (GARDNER, 1980). Além disso, a distribuição de probabilidade de demanda por itens deve ser estimada antes de ser utilizada no processo de decisão.

Isto posto, o momento de escolha do modelo a ser adotado deve ser cercado de critérios, fazendo-se uso de um ferramental sólido e que possibilite uma avaliação dos ganhos coerente com a prática.

Wanke (2012), conclui que o processo decisório pode ser embasado em análises de cenários, simulações e análises de custos incrementais (veja também SILVA, 2009; ROSA; MAYERLE; GONÇALVES, 2010; REGO; MESQUITA, 2011); ou ter como base quadros conceituais qualitativos, também tidos como abordagens de classificação, que consideram a importância das características dos produtos, da operação e da demanda (HUISKONEN, 2001).

1.3.2 Considerações sobre a gestão de peças de reposição.

Apesar do desenvolvimento consistente e consagrado da teoria clássica para a gestão de estoque de itens de consumo, poucos autores dedicaram seus estudos aos desafios inerentes à gestão de peças de reposição, e a literatura sobre o assunto tende a ser mais escassa (BOTTER; FORTUIN, 2000; SILVA, 2009; REGO; MESQUITA, 2011; WANKE, 2012).

No final da década de 1990, relevantes trabalhos, propondo diferentes objetivos possíveis para a modelagem do problema, foram publicados. Gomes e Wanke (2005) citam algumas abordagens, como: a determinação do último pedido (HILL *et al.*, 1999), do intervalo ótimo de revisão (SHIBUYA *et al.*, 1998) e o foco na criticidade dos itens (DEKKER *et al.*, 1998).

Em seu estudo de caso, Botter e Fortuin (2000) propõem um quadro conceitual para responder as perguntas básicas de controle de estoque de peças de reposição. O estudo foi desenvolvido em uma grande empresa multinacional de dispositivos eletrônicos utilizados na indústria, com dois armazéns e cerca de 50.000 itens de reposição em estoque.

Os conceitos reunidos no quadro foram então programados em uma planilha, e esta ferramenta resultante permitiu a análise de três cenários, diferindo entre si quanto ao percentual de centralização (50, 80 e 100%). Em todos os cenários, o nível de serviço ao cliente exigido foi de 95%. A análise revelou que a ferramenta desenvolvida era capaz de atingir um nível de serviço desejado com custos muito mais baixos do que os que estavam sendo empregados na prática.

Alguns anos depois, Wanke (2005) publica o artigo onde apresenta uma metodologia para segmentar as peças de reposição consumíveis em termos de suas características principais: consumo médio e coeficiente de variação do consumo. A empresa estudada era uma fabricante de equipamentos e implementos agrícolas, instalada no Brasil.

As reposições foram apuradas com base na distribuição Gama, e, para cada item, os níveis de reposição foram definidos de acordo com a probabilidade de não faltar produto em estoque, e, posteriormente, empregados como previsões probabilísticas de consumo (WANKE, 2005).

Wanke (2005) testou a metodologia com o uso da planilha MS-Excel e do pacote estatístico SPSS. Uma vez confrontados os valores obtidos com os dados reais, foi possível determinar o erro médio absoluto de previsão (MAD), relacionar níveis de estoque a medidas de nível de serviço (*fill rate*) e medir o nível de estoque. Os resultados apontaram ganhos significativos.

Wanke (2012) observa um ponto de paridade na literatura disponível, e que talvez retarde o desenvolvimento de um modelo teórico consolidado e de ampla utilização sobre o tema: a dificuldade em se encontrar abordagens puramente teóricas, uma vez que a maior parte dos trabalhos se direciona para estudos de caso com aplicabilidade prática. Trabalhos como os de Yeh (1997), Sandvig e Allaire (1998), Botter e Fortuin (2000) e Wanke (2005) desenvolvem abordagens realistas, testadas em empresas específicas.

Um ponto que tem se tornado recorrente nas abordagens relacionadas aos estoques de sobressalentes é a utilização de cadeias de Markov. Gomes e Wanke (2005), explicam que as cadeias de Markov são um caso particular de processo estocástico com tempo discreto.

A principal propriedade das cadeias de Markov, e que tem atraído diversas áreas da engenharia e de operações a empregá-las, é que os estados anteriores são irrelevantes para a predição dos estados seguintes, desde que o estado atual seja conhecido.

Utilizando as cadeias de Markov, Smidt-Destombes *et al.* (2006) desenvolveram um modelo para a política de gestão de uma fábrica cujas máquinas dependem de uma determinada peça para funcionar, sendo que a probabilidade de falha desta peça é a mesma em todas as máquinas. O modelo mede a razão entre o tempo de reparo e o tempo total da operação, e, desta forma, é possível analisar a prioridade de reparo em contraposição com o nível de serviço do sistema.

Gomes e Wanke (2005) também apresentaram uma abordagem para gestão de estoques de peças de reposição com base em cadeias de Markov. Nesse estudo, feito para demandas aderentes à distribuição de Poisson, é feita uma comparação da simulação convencional com uma heurística para a determinação do ponto de pedido e do máximo estoque desejado, sendo conhecidos o custo da falta, do excesso e de ressurgimento. Possibilitando, desta forma, a análise dos *trade-offs* básicos.

Outro ponto relevante é o fato da maior parte dos trabalhos abordar apenas os itens consumíveis. Desta forma, não abrangem a totalidade dos sobressalentes, uma vez que as peças de reposição podem ser classificadas em duas categorias distintas: reparáveis e consumíveis, o que também impacta na seleção dos modelos de estoque mais adequados (SILVER; PYKE; PETERSON, 1998; BOTTER; FORTUIN, 2000).

Ainda segundo os autores, os itens reparáveis são aqueles recuperáveis sob o ponto de vista técnico e econômico. Podem ser reparados em caso de falha, sendo disponibilizados novamente no estoque. Em contrapartida, os itens consumíveis são aqueles que, em caso de falha, são definitivamente descartados.

Finalizando, a gestão das peças de reposição também pode ser analisada pelo aspecto do serviço ao cliente, e não apenas pelo aspecto de custos. Para muitas empresas que enfrentam um ambiente de maior competitividade, a satisfação dos clientes é crucial (FIGUEIREDO *et al.*, 2003).

Nestes casos, não se trata de uma decisão sob o ponto de vista financeiro e operacional, mas sim de serviço ao cliente, e sob este prisma peças fundamentais ao processo produtivo não podem faltar, mesmo que o custo de aquisição seja muito elevado e o risco de obsolescência, alto.

1.3.3 Considerações sobre o giro baixíssimo

Wanke (2012) observa algum crescimento na literatura relacionada à problemática dos itens de baixo e baixíssimo consumo, e, como já foi dito, o comportamento da demanda é o fator determinante para o aumento da complexidade no desenvolvimento de modelos de gestão de estoque para as peças de reposição.

Como o presente trabalho gira em torno da problemática da gestão de peças de baixíssimo giro, cabe esclarecer que será utilizada a definição de Tavares e Almeida (1983) para este perfil de demanda. Segundo estes autores, são consideradas de baixíssimo consumo as peças que apresentam consumo médio inferior a uma unidade por ano.

Para esta situação, Tavares e Almeida (1983) apresentaram um modelo, desenvolvido para demandas que sigam a distribuição de Poisson, que permite

determinar se uma peça deve ser mantida em estoque ou se é melhor não manter nenhuma peça, solicitando o ressuprimento contrapedido.

O modelo binário, proposto pelo autor, orienta a escolha entre estas opções através da comparação dos custos de falta, excesso e colocação de pedidos, dado um determinado nível de serviço.

Em seu trabalho, Silva (2009) desenvolve uma metodologia embasada na demanda e no tempo de resposta de fornecimento estocásticos. Neste trabalho, o autor utilizou uma abordagem da demanda individual (Single Demand Approach – SDA) definida por Krever *et al.* (2005) para o cálculo do valor esperado e variância da demanda durante o tempo de resposta de fornecimento (LTD).

Em seus modelos de estoque, o autor utiliza como premissa as distribuições estatísticas de Poisson, Laplace, Gama e Normal, em combinação com a otimização do custo total para a modelagem da LTD e determinação do ponto de ressuprimento, quantidade de pedido e estoque de segurança.

Utilizando dados reais e processo de simulação, os modelos de estoque foram testados e o desempenho de cada um deles foi comparado e avaliado. Em relação ao uso da distribuição Normal, os resultados mostraram um desempenho superior dos demais modelos (Laplace, Gama e Poisson).

O modelo proposto de Laplace obteve ganhos significativos em níveis de serviço, *fill rate* e, principalmente, redução dos níveis de estoque. Os benefícios para a empresa em se utilizar este modelo sujeito a um processo de otimização de custo são abordados na conclusão do trabalho.

Wanke (2012), propõe um quadro conceitual para gestão de estoques segmentado de acordo com as características dos itens, e conclui que, independentemente do coeficiente de variação da demanda, sempre devem ser empregados modelos binários para a gestão de estoques de itens de baixíssimo giro.

Os conceitos relacionados no quadro de Wanke (2012) ainda foram por ele testados em uma empresa brasileira. E, com o auxílio de uma ferramenta em VBA para Excel, foi possível verificar que, para o caso em questão, a manutenção de uma peça

em estoque para cada item demonstrou ser a mais adequada. Fato este derivado dos expressivos custos de indisponibilidade e penalidade.

Ainda de acordo com os autores citados nesta seção, a gestão de estoques de itens de reposição não deve seguir os modelos tradicionais, em função de seu perfil irregular de demanda ser insuficiente para se estimar a distribuição de probabilidade com a precisão necessária.

1.4 Justificativa

Como visto, as características das peças de reposição, e todas as demais condições relativas ao tema discursadas previamente, indicam que a escolha de um modelo de gestão de estoques é particularmente crítica (COHEN; LEE, 1990; COHEN; ZHENG; AGRAWAL, 1997; MUCKSTADT, 2004; KUMAR, 2005; REGO, 2006; WANKE, 2012).

Estes fatores se acentuam em indústrias nas quais os custos com estoques de peças de reposição de raro consumo são muito elevados, comum em setores como o petrolífero, o siderúrgico, o automobilístico, o aéreo e o naval, entre outros.

Neste cenário, existe um grande hiato entre a prática e a teoria de gestão de estoques (REGO, 2006) e muitas organizações não aproveitam todas as oportunidades existentes no gerenciamento de peças de reposição, deixando de obter ganhos.

Portanto, a obsolescência do estoque de peças de reposição, a falta de critérios na definição da política de estoque e de algoritmos para o cálculo dos parâmetros de estoque, têm levado as empresas a manterem níveis de estoques inadequados para garantir um certo nível de serviço (SILVA, 2009).

Desta forma, o presente trabalho propõe uma metodologia que permita uma tomada de decisão mais consciente por parte dos gestores, com base nas conclusões obtidas e possibilidades observadas, sempre com foco nas estratégias que norteiam o gerenciamento do estoque.

A justificativa do presente trabalho reside no fato de que existem muitas oportunidades na política para a gestão de estoques para peças de reposição, e a formulação de uma metodologia alternativa poderá trazer benefícios econômicos e propiciar uma tomada de decisão mais adequada.

Serão beneficiadas com o estudo as diversas empresas que enfrentam diariamente o dilema de manter elevados custos de estoque de itens de reposição com baixíssimo consumo e correr o risco de parada do processo produto.

Este desafio, porém, se superado, pode representar grande oportunidade de aumento da rentabilidade das empresas, através da otimização da gestão dos estoques, o que será certamente mais fácil caso haja um bom entendimento das peculiaridades inerentes.

Além disso, o trabalho será de grande contribuição para a ainda carente literatura sobre o tema, que agora passa a receber mais atenção dos autores, uma vez que apresenta um modelo inovador em termos de gerenciamento de estoque de baixíssimo giro, possibilitando a definição de estratégias ótimas em termos de custo de operação em longo prazo.

1.5 Objetivos específicos

O presente trabalho tem por objetivo apresentar um modelo de gestão de estoques para peças de reposição de baixíssimo giro, por meio de uma classe de processos markovianos, denominada Processos Markovianos Determinísticos por Partes (DAVIS, 1993). Trata-se de uma abordagem distinta em relação aos atuais modelos disponíveis na literatura, e previamente utilizada em problemas de produção (*e.g.*, ARRUDA, 2002).

A modelagem utilizada faz-se valer do fato de que o tempo de resposta de fornecimento (*lead time*) está, na realidade, ligado ao processo produtivo do fornecedor. Dessa forma, um modelo de produção e estoque (P&E) com tempo de conclusão aleatório pode representar o processo, desde que a distribuição do tempo de conclusão do modelo P&E considerado coincida com a distribuição do tempo de resposta de fornecimento.

Isso posto, a modelagem por meio de Processos Markovianos Determinísticos por Partes parece ser bastante adequada, pois leva em consideração tanto os saltos aleatórios relativos à chegada de demanda ou de itens previamente solicitados junto ao fornecedor, como também um custo de *setup* que, no modelo considerado, representa o custo de pedido do processo.

Além disso, a solução do problema de P&E é bastante simples para o caso de um único item, o que a torna ainda mais atrativa para o problema estudado.

Assim, a dissertação contribui com uma modelagem que é uma novidade em termos de gerenciamento de estoque de baixo giro, e que permite analisar não apenas nível de fornecimento, como também obter estratégias ótimas em termos de custo de operação em longo prazo. Além disso, o modelo resulta em um algoritmo simples e fácil de implementar e em políticas de reposição simples e intuitivas.

1.6 Limitações do Estudo

Segundo Botter, Fortuin (2000), as principais categorias para classificar as peças de reposição são: itens reparáveis ou itens consumíveis ou descartáveis. Esta classificação será apresentada e discutida no Capítulo 3.

Porém, cabe aqui dizer que o presente estudo é limitado à análise das peças de reposição descartáveis, e, portanto, não será considerada a possibilidade de uma nova disponibilização para o estoque de uma peça que tenha passado por um processo de recuperação.

Além disso, o modelo aborda problemas de estoque de um único item, com demanda descrita por um processo de Poisson e tempos de resposta de fornecimento distribuídos exponencialmente. Trabalhos futuros podem contemplar a extensão do modelo para outras distribuições de tempo de resposta de fornecimento.

1.7 Estrutura do Trabalho

O presente capítulo tem caráter introdutório, apresentando a motivação, a contextualização na literatura, o objetivo, as justificativas, as limitações e a apresentação do escopo do estudo.

No próximo capítulo encontram-se os conceitos e as referências teóricas sobre os principais aspectos associados à gestão de estoques, com enfoque nos temas diretamente relacionados ao objeto do estudo. Desta forma, introduz-se ao conteúdo do estudo, os elementos que dão suporte à tomada de decisão e auxiliam a resposta aos principais dilemas de domínio da administração de estoques

Já no Capítulo 3, essas questões são abordadas para o caso específico das peças de reposição, uma vez que os modelos vistos não são aplicáveis à sua gestão.

No capítulo seguinte é apresentado o sistema estudado, para o qual se propõe um modelo de gestão de estoque por meio de uma classe de processos markovianos denominada Processos Markovianos Determinísticos por Partes.

No Capítulo 5, são apresentados e analisados os experimentos de maior relevância realizados. E, finalmente, o último capítulo do trabalho apresenta as conclusões obtidas da análise realizada no capítulo anterior.

Capítulo 2

Fundamentos da Gestão de Estoques

Neste capítulo, encontram-se conceitos e referências teóricas sobre os principais aspectos associados à gestão de estoques, com enfoque nos temas diretamente relacionados ao objeto do estudo.

2.1 Estoques

Monks (1989) define estoques como recursos ociosos que possuem valor econômico. Segundo Moreira (1996), entende-se por estoque quaisquer quantidades de bens físicos que sejam conservados, de forma improdutiva, por algum intervalo de tempo.

Para Ballou (2003), estoques são pilhas de matérias-primas, insumos, componentes, produtos em processo e produtos acabados que aparecem em numerosos pontos por todos os canais logísticos e de produção da empresa.

Correa (2004) afirma que estoques são acúmulos de materiais entre fases dos processos de transformação, que conferem um grau de independência entre as fases. Finalmente, para Slack *et al.* (2009), estoques são acúmulos armazenados de recursos materiais em um sistema de transformação.

Independentemente da diferença semântica entre as definições apresentadas acima, o que foi exposto pode ser equalizado e traduzido em três razões primordiais para a manutenção de estoques.

A primeira delas, tida como a mais tradicional, é o fato de que estoques funcionam como amortecedores entre a oferta e a demanda, e atuam como reguladores do fluxo logístico. Desta forma, viabilizam a ocorrência de velocidades diferentes de

entrada e de saída de materiais, assim como minimizam incertezas acerca destes fluxos. Esta função primordial é conhecida como estoque pulmão, ou *buffer*.

A segunda razão para sua manutenção, é que os estoques assumem um papel estratégico quando existe algum risco de caráter extraordinário de ausência de oferta de certo produto. Neste caso, o estoque será consumido como uma resposta contingencial, para amenizar os impactos decorrentes da indisponibilidade de um produto no mercado.

Finalmente, existem ocasiões em que os estoques são utilizados como agentes especulativos. As empresas compram produtos quando o preço de mercado está baixo, para depois se desfazer dos estoques quando o valor de mercado dos produtos subir.

As funções descritas acima - estoque pulmão, estoque estratégico e estoque especulativo - são os papéis clássicos desempenhados pelo estoque. Entretanto, ainda existem outras razões para a estocagem, como: a redução de custos de transporte, a redução de custos de produção, etc.

2.2 Classificação dos estoques

Segundo Ballou (2003), a categorização dos tipos de estoque consiste em cinco formas distintas:

- a) ***Estoque no canal:*** estoques que estão em trânsito entre os pontos de estocagem ou de produção, uma vez que o deslocamento não é instantâneo. Quanto maiores as distâncias, e, quanto mais lenta a velocidade de movimentação, maiores são os estoques no canal.
- b) ***Estoque de especulação:*** são estoques com finalidades financeiras e não logísticas. Os estoques são formados em momentos de baixa para venda no momento de subida dos preços.
- c) ***Estoque regular:*** como o próprio nome sugere, são necessários para satisfazer a demanda regular, suprimindo as vendas entre dois fornecimentos sucessivos.
- d) ***Estoque de segurança:*** mantido para minimizar as incertezas na demanda e no tempo de reabastecimento.
- e) ***Estoque obsoleto, morto ou reduzido:*** parte do estoque que é extraviada ou que se deteriora, seja por vencimento, obsolescência ou estrago.

2.3 Competências da gestão de estoques

As organizações necessitam de um esforço considerável para administrar todas as suas operações e atividades. Competem à equipe de gestão de estoques todos os esforços administrativos e gerenciais para planejar, organizar e controlar de forma eficiente os estoques da empresa, sempre priorizando a manutenção de níveis ótimos de estoques dos itens armazenados.

Lopes (2002) ressalta a importância da determinação e da conservação dos níveis ideais de estoque, tendo em vista que os excessos podem ocasionar um alto custo e as faltas resultam perdas em vendas e comprometem o bom atendimento ao cliente.

A gestão de estoques envolve uma série de ações, tais como (MARTINS; ALT, 2006): assegurar que os estoques sejam bem utilizados; verificar se a localização é adequada, em relação aos setores usuários dos estoques; garantir que os estoques sejam manuseados corretamente; e assegurar o controle dos níveis de estoques.

Uma vez executada de forma hábil, a gestão de estoques traz um conjunto de benefícios – como a redução de custos e a diminuição de rupturas – que confere um diferencial competitivo poderoso para a empresa.

Existem modelos que podem ser adotados pela empresa para o controle apropriado dos estoques. Estes padrões auxiliam a tomada de decisões, como a definição do momento correto de se pedir, a quantidade ideal ser comprada, o nível de segurança a ser mantido em estoque, e o nível de serviço a ser prestado (DROHOMERETSKI *et al*, 2009).

O conjunto desses elementos caracteriza a política de estoques da empresa. E, para dar visibilidade aos resultados e avaliar os efeitos da política adotada, os gestores dispõem de várias técnicas consolidadas.

Desta forma, a empresa poderá atender as expectativas de seus clientes mantendo um baixo custo operacional e beneficiando-se da relação entre investimentos, riscos e retornos (LOPES, 2002).

2.4 Principais custos de estoque

Toda e qualquer decisão relativa ao gerenciamento de estoques de uma empresa tem um nível de serviço e um custo associados. Mesmo quando se decide por não comprar ocorre este desdobramento, pois existe um custo relativo ao que se deixa de lucrar, e o impacto da ausência que é sentida pelos clientes.

Por outro lado, quando a empresa mantém estoques que não são necessários ocorre um desaproveitamento de estoque, o que vai significar um desperdício tanto em espaço físico como em capital investido.

Portanto, o propósito é estocar de forma eficiente, identificando sempre as razões que indicam a necessidade de estoques e evitando estoques em excesso, que geram desperdícios (PALMISANO *et al*, 2004).

Usualmente, o investimento em estoque de uma empresa fabricante de bens de consumo é alto, podendo superar 25% do total dos bens da organização (VOLMANN *et al*, 2006).

Segundo Slack *et al* (2009), temos os seguintes custos de estoque:

- Custo de colocação do pedido;
- Custos de desconto de preços;
- Custos de falta de estoque;
- Custos de capital de giro;
- Custos de armazenagem;
- Custos de obsolescência;
- Custos de ineficiência de produção.

Ainda segundo o autor, existem duas questões que devem ser analisadas sobre os custos acima listados: a primeira é se o custo é direta ou indiretamente proporcional ao tamanho do pedido; e a segunda é sobre quem recai cada custo, pois pode não ser a mesma empresa que incorre com os custos, como ocorre com estoques consignados.

Outros autores preferem classificar esses custos agrupando-os em três áreas principais (GARCIA *et al*, 2006):

- Custos de manutenção de estoques;

- Custos de pedido;
- Custos de falta.

Em se tratando de peças de reposição, objeto desse estudo, é interessante detalhar esses três custos, que estão diretamente relacionados à política de gestão de estoques adotada.

2.4.1 Custos de manutenção de estoques

Os custos de manutenção de estoques possuem dois componentes principais: custos de armazenagem e custos de oportunidade.

Os custos de armazenagem são custos proporcionais às quantidades armazenadas e ao tempo que os materiais são estocados. Tais como os custos despendidos com a área física, taxa de seguro, perdas, obsolescência, e outros.

É usual considerar neste item o custo de oportunidade do capital, muitas vezes tido como o custo mais relevante dentre todos os custos associados à gestão de estoques. Este custo traduz o quanto a empresa deixou de ganhar por ter o capital investido em estoques, em vez de investir em outra atividade econômica, e também é chamado custo do capital.

Outra interpretação comum é apreciar o custo de manutenção de estoque de um item como uma pequena parte do seu valor unitário (GARCIA *et al.*, 2006).

2.4.2 Custos do pedido

Os custos de pedido são os custos relativos a uma nova encomenda, podendo ser custos fixos ou variáveis. Os custos fixos são aqueles associados ao envio da encomenda, ao recebimento dessa mesma encomenda, e à inspeção. O exemplo principal de custo variável é o preço unitário de compra dos artigos encomendados (GARCIA *et al.*, 2006).

2.4.3 Custos da falta

De difícil mensuração, os custos de falta são todos os custos associados à falta de estoques para o atendimento da demanda em um dado período de tempo. Como exemplos podem ser citados: pagamento de multas contratuais, perdas de venda,

deterioração de imagem da empresa, perda de fatia de mercado, e utilização de planos de contingência (GARCIA *et al.*, 2006).

Enquanto o pagamento de uma multa contratual, por exemplo, possui um valor, na maioria das vezes um percentual, previamente acordado e de estimativa simples, a avaliação e a contabilização financeira da deterioração da imagem da empresa é muito subjetiva, seus impactos não são imediatos e, muitas vezes, são ignorados.

2.4.4 Cálculo do custo total do estoque

Considerando-se o problema como determinístico, o cálculo do custo total de estoque é obtido pela soma dos custos de manutenção de estoques e dos custos do pedido.

Sendo:

- Q : tamanho do pedido;
- D : demanda;
- C_T : custo total;
- C_m : custo unitário de manutenção de estoques;
- C_p : custo de pedido;
- Q_{seg} : estoque de segurança.

E, considerando que um item é pedido na quantidade Q e que a sua demanda é de D unidades por mês, o custo total mensal C_T é dado por:

$$C_T = C_p \frac{D}{Q} + C_m \left(\frac{Q}{2} + Q_{seg} \right). \quad (2.1)$$

Sendo que, a primeira parcela corresponde ao custo do pedido multiplicado pela frequência de entregas; e a segunda parcela corresponde ao custo de manutenção de estoques, que por sua vez é obtido pela multiplicação do custo unitário de manutenção de estoques pelo estoque médio ($Q/2$) acrescido do estoque de segurança.

2.5 Níveis de estocagem

Os níveis de estocagem representam uma importante decisão logística. Do ponto de vista dos vendedores, as empresas deveriam ter estoques suficientes para atender imediatamente a todos os pedidos da clientela. Contudo, isto teria um custo muito alto.

O custo do estoque aumenta a uma taxa crescente, à medida que o nível de atendimento ao cliente se aproxima de cem por cento. Portanto, a administração precisa saber em quanto as vendas e lucros aumentariam, se fossem mantidos estoques maiores e prazos de entrega menores, para tomar uma decisão embasada em quantos itens manter em estoque.

A decisão sobre em que nível manter o estoque de produtos da empresa também é uma decisão de política de estoque, pois existem razões tanto a favor quanto contra a manutenção de estoques. Cabe à direção da empresa avaliar os prós e os contras, e decidir que política é mais alinhada com a estratégia corporativa.

Como existem diferentes categorias e tipos de produtos, assim como estoques de matéria-prima, estoques intermediários e de produtos acabados, é usual que a empresa adote não apenas uma, mas um conjunto de estratégias que resultarão no nível de estoques.

Na verdade, as principais razões para a manutenção de estoques (apresentadas no início do capítulo) estão diretamente relacionadas com o serviço ao cliente e as economias de custo obtidas com a redução de estoques derivam indiretamente dele.

Por um lado, a redução de estoques é vantajosa, pois permite a diversificação de produtos e a utilização da mesma quantidade de recursos de uma forma mais produtiva. Além disso, manter estoques baixos confere maior liquidez para a empresa, já que itens parados não agregam valor. De fato, alguém terá que arcar com o custo do financiamento do capital de giro investido em materiais, que na maior parte das vezes acaba recaindo sobre o cliente.

Uma grande vantagem do estoque reduzido é o fato de permitir uma reposição rápida a qualquer mudança na linha de produção. Por último, com a redução de estoque limitamos os custos com armazenagem, seguro e perdas por manuseio ou obsolescência.

Por outro lado, não é possível ignorar as restrições existentes na cadeia de abastecimento, entre a capacidade produtiva instalada e a demanda de mercado. Da mesma forma, persistem as causas das incertezas e flutuações na oferta e na demanda. É sabido também que a falta de material pode comprometer o atendimento, reduzindo o faturamento e induzindo o cliente a procurar alternativas na concorrência.

Para alcançar o sucesso, otimizando os recursos investidos e promovendo a rotação de estoques, é preciso muito conhecimento do negócio da empresa e dos produtos comercializados. Assim como também são necessários instrumentos gerenciais que auxiliem a tomada de decisão para as três questões fundamentais no gerenciamento do sistema: como pedir, quanto pedir e quando pedir.

2.6 Principais técnicas empregadas em gestão de estoques

A seguir são apresentadas algumas das mais conceituadas técnicas, modelos e políticas de gestão de estoques, largamente empregadas no meio empresarial e vastamente difundidas e comentadas no meio e acadêmico.

2.6.1 Curva ABC

Diante do desafio de coordenar a movimentação de uma grande quantidade de itens com as exigências de produção, torna-se primordial classificar os itens de acordo com a sua importância relativa no estoque. Neste contexto, o conceito de curva ABC é amplamente utilizado para auxiliar o controle do estoque e reduzir custos (SHAPIRO, 2001; CORRÊA; CORRÊA, 2004).

Esse método, antigo e eficaz, baseia-se no raciocínio do diagrama de Pareto desenvolvido pelo economista italiano Vilfredo Pareto (1848-1923). É através da classificação da curva ABC que conseguimos determinar o grau de importância dos itens, permitindo assim diferentes níveis de controle com base na importância relativa do item.

Dessa forma, os gerentes de estoque podem concentrar seus esforços em controlar itens mais significativos do estoque. Silver, Pyke e Peterson (1998) apresentam a seguinte relação para a classificação:

- **Itens classe A:** compreende cerca de 20% dos itens e representa 80% do valor total do estoque, ou seja, são os itens de mais alto valor.

- **Itens classe B:** são usualmente os 30% seguintes, que representam algo em torno de 10% do valor total, ou seja, são os itens de valor médio.
- **Itens classe C:** compreendem cerca de 50% do total de itens e cerca de 10% do valor estocado, ou seja, são os itens de valor baixo.

Para o sistema ABC é usual que as empresas utilizem informações de uso e valor para efetuar a classificação, mas é possível também classificar os itens com base em outros critérios, como ruptura, incertezas de fornecimento e obsolescência.

2.6.2 Indicadores de desempenho

Os principais indicadores de controle de desempenho são:

- **Giro do estoque:** demonstra a rotatividade do mesmo, ou seja, quanto tempo cada item do estoque permanece na empresa antes de ser vendido. Este indicador apresenta o que aconteceu no passado, sendo medido pela divisão do custo da mercadoria vendida, pelo custo do estoque médio do período calculado.
- **Cobertura do estoque:** é a indicação do período de tempo que o estoque consegue cobrir as vendas futuras. A cobertura é um indicador de extrema importância, sendo facilmente obtido pela divisão do estoque em um dado momento, pela previsão de venda futura.
- **Nível de serviço:** este indicador apresenta a disponibilidade dos produtos comercializados pela empresa no ponto de vendas. É obtido pela divisão do número de itens em estoque, pelo número de itens comercializados.

O uso desses indicadores possibilita que as empresas administrem melhor seus estoques, atendendo as expectativas de seus clientes, mantendo um baixo custo operacional e beneficiando-se da relação entre investimentos, riscos e retornos (LOPES, 2002).

2.6.3 Técnicas de previsão de demanda

Como discutido no Capítulo 1, o comportamento da demanda é um dos principais fatores que contribui para o aumento da complexidade dos modelos de gestão de estoque (WANKE, 2012).

Segundo Chopra e Meindl (2003), as técnicas de previsão podem ser: qualitativas (quando baseadas no julgamento humano), temporais (métodos estatísticos baseados no histórico de demanda) e causais (quando a demanda é altamente correlacionada com outros fatores).

Rego (2006) afirma que as séries temporais são mais adequadas à gestão de estoques de peças de reposição, uma vez que reduzem a necessidade de julgamento humano e podem ser computacionalmente exploradas.

Os principais modelos de previsão baseados em séries temporais são (REGO, 2006 citando: Makridakis *et al*, 1998; Chase *et al*, 2001; Chopra; Meindl, 2003):

- ***Média móvel:*** utiliza a média das últimas observações como estimativa da nova demanda;
- ***Suavização exponencial simples:*** atribui peso maior à última observação e pesos decrescentes (de forma exponencial) para as demais;
- ***Suavização exponencial com tendência (Holt):*** método similar à suavização exponencial simples, todavia possibilita a estimativa da influência de tendências;
- ***Suavização exponencial com tendência e sazonalidade (Winter):*** método similar ao Holt, porém possibilita o acréscimo da estimativa de sazonalidades além da tendência - já presente no método anterior;
- ***Regressão Linear:*** previsão baseada na estimativa da reta ajustada sobre os dados, por meio do método dos mínimos quadrados.

As previsões de demanda apresentadas são tipicamente utilizadas para tomadas de decisão de curto prazo, muitas vezes para o próximo ciclo de reposição, sendo refeitas após nova leitura de demanda (REGO, 2006). São métodos de revisão periódica, que serão apresentados ainda neste capítulo.

2.6.4 Lote econômico de compras

Uma abordagem freqüentemente utilizada para a decisão de quanto pedir é a do lote econômico de compras, doravante denominado LEC.

Esta técnica, desenvolvida F. W. Harris em 1915, busca o melhor equilíbrio entre as vantagens e desvantagens de manter estoque, e possui alguns pressupostos, a saber:

- Demanda relativamente constante e conhecida;
- Itens comprados em lotes e não de forma contínua;
- Custos conhecidos;
- Tempos de reposição baixos.

Sendo assim, sempre que um pedido é colocado, uma quantidade fixa Q é pedida. O pedido de reabastecimento chega instantaneamente. A demanda do item é fixa e perfeitamente previsível, com taxa de D unidades por mês. Quando a demanda acaba com o total do estoque, outro pedido de Q chega, e assim por diante.

Sob estas circunstâncias, o estoque médio será $Q/2$, o intervalo de tempo entre as entregas será Q/D , e a frequência de entregas será recíproca ao intervalo de tempo, ou seja, igual a D/Q .

Assim, o custo total obtido será a soma dos custos de manutenção (C_m) e de pedido (C_p), ou seja, idêntico ao apresentado na equação (2.1), porém nesta metodologia é desconsiderado o estoque de segurança (seu valor é zero). Portanto, o custo total será dado pela seguinte expressão:

$$C_T = C_m \frac{Q}{2} + C_p \frac{D}{Q}. \quad (2.2)$$

Desta forma, como a taxa de mudança dos custos totais é dada pela primeira derivada de C_T com relação a Q , e como o ponto de custo mais baixo ocorrerá quando a derivada for zero, é possível rearranjar a expressão, obtendo a expressão:

$$LEC = \sqrt{\frac{2 \cdot C_p \cdot D}{C_m}}. \quad (2.3)$$

A abordagem do LEC é de grande robustez, sendo um dos modelos mais empregados na gestão financeira de estoques. Entretanto, o modelo é sujeito a críticas com relação ao custo real de manutenção de estoques, ao custo real de colocação de pedidos e ao uso como instrumento prescritivo.

O ponto de ressuprimento corresponde ao nível de estoque que, ao ser atingido, indica a necessidade de reabastecimento do estoque. Ou seja, seu estudo apóia a tomada de decisão sobre quando fazer um novo pedido.

Quando a abordagem LEC foi apresentada, partiu-se do pressuposto que os pedidos chegavam instantaneamente, e que a demanda era constante e previsível. Neste cenário, a decisão de quando colocar um pedido para reabastecer o estoque é evidente: o pedido deve ser colocado quando o estoque atingir zero.

Mas na realidade, existe um lapso temporal entre o pedido e a sua chegada ao estoque, conhecido como tempo de resposta de fornecimento (*lead time*). Assim, o ponto de ressuprimento é o ponto no qual o estoque vai cair para zero menos o tempo de resposta de fornecimento do pedido. E, a quantidade em estoque no momento do pedido é denominada nível de ressuprimento.

Além disso, existem incertezas associadas, uma vez que tanto a demanda quanto o tempo de resposta de fornecimento não são perfeitamente previsíveis. Portanto, os pedidos devem ser feitos com certa antecedência, considerando estes fatores.

Nesta situação, no momento do pedido teremos um estoque ainda presente maior do que o nível de ressuprimento necessário. A diferença entre esses valores corresponde ao estoque de segurança, que aumenta quanto mais cedo for feito o pedido.

2.6.5 Modelos de gestão de estoques

Os modelos apresentados a seguir auxiliam as decisões de quando e quanto pedir, tendo como ponto de partida para seu desenvolvimento os conceitos apresentados na formulação do lote econômico de compras e na gestão de um item em local único (LEE; NAHMIA, 1993).

Como mencionado na seção 1.2.1 do presente trabalho, a demanda pode ser classificada como determinística ou probabilística. Portanto, neste momento, cabe dizer que será dado enfoque aos modelos aplicáveis a demandas probabilísticas, uma vez que o modelo desenvolvido neste trabalho segue esta linha de estudo.

Os modelos aplicáveis à gestão de estoques sob demandas probabilísticas podem ser (REGO, 2006):

- **Modelos de revisão contínua:** quando a posição de estoques é monitorada continuamente e, ao se atingir determinado nível de estoque, um novo pedido é disparado;
- **Modelos de revisão periódica:** quando a posição de estoques é verificada apenas em intervalos de tempo fixos. Os pedidos podem ser feitos quando se chega ao instante de revisão, ou comparando-se a posição do estoque com um nível estabelecido.

Além de revisão contínua e periódica, as políticas de estocagem diferem nos parâmetros utilizados para a tomada de decisão de quando o pedido deve ser feito e qual seu tamanho (SILVER; PYKE; PETERSON, 1998). Sendo assim, antes de apresentar os modelos é importante definir a nomenclatura que será utilizada:

- s : ponto de pedido em quantidade;
- S : nível máximo de estoque desejado em quantidade;
- Q : tamanho do lote fixo em quantidade;
- T : intervalo de tempo fixo entre as revisões do estoque (tempo);
- L : tempo decorrido entre o pedido e o recebimento (tempo).

a) Modelos de revisão contínua: (s, Q) e (s, S)

Existem dois sistemas de revisão contínua vastamente empregados: um baseado no ponto de pedido e na quantidade fixa, conhecido como (s, Q) ; e outro orientado pelo ponto de pedido e pelo máximo estoque desejado, conhecido como (s, S) .

Segundo Rego (2006), no sistema (s, Q) um pedido na quantidade fixa Q é feito sempre que o estoque cai ao nível s , ou abaixo. O sistema pode ser entendido como tendo duas gavetas para a armazenagem de um item. A primeira gaveta atende a demanda até que se esgota, então, no momento em que a segunda gaveta é aberta para atender a demanda, um pedido na quantidade Q é realizado. Ao chegar, o pedido completa primeiramente o segundo compartimento, sendo o restante colocado no primeiro.

Ainda segundo o autor, o sistema (s, S) tem um funcionamento semelhante ao (s, Q) , porém a quantidade pedida ao se atingir o ponto de pedido é variável, calculada sempre para elevar o estoque ao nível máximo S .

b) Modelos de revisão periódica: (T, S) e (T, s, S)

No sistema de revisão periódica (T, S) , a cada intervalo de revisão T um novo pedido é feito, sendo a quantidade pedida calculada de forma que recoloca o estoque no nível máximo S (SILVER; PYKE; PETERSON, 1998).

Já o sistema (T, s, S) é uma combinação dos sistemas (s, S) e (T, S) , de forma que periodicamente é avaliada a necessidade de um novo pedido, que só será feito se nesta época o estoque estiver igual ou inferior ao ponto de pedido s (SILVER; PYKE; PETERSON, 1998).

2.7 Posicionamento dos estoques

É preciso também definir qual a política de posicionamento dos estoques na cadeia de suprimentos. Assim como nas decisões anteriores, as empresas devem basear sua estratégia objetivando a minimização do custo total e o atendimento ao nível de serviço estabelecido. Neste sentido, existem duas alternativas a serem avaliadas: centralizar ou descentralizar os estoques.

No primeiro caso, os estoques ficarão posicionados de forma avançada, próximo ao ponto de venda, se antecipando à demanda, caracterizando a política descentralizada. Esta forma de gestão permite a utilização de transportes consolidados, mas é muito dependente de boas previsões de vendas.

A seguir, se encontram listados os principais fatores que contribuem para a descentralização de estoques:

- Baixo valor agregado;
- Pequena troca de informações em tempo real entre clientes e fornecedores;
- Baixa incerteza da demanda;
- Grandes economias com consolidações de cargas.

No segundo caso, os estoques ficaram recuados, mais distantes do ponto de venda, caracterizando a política centralizada. Neste modelo, é preciso agilidade, resposta rápida às vendas, o que acarreta na utilização intensiva de transporte, mas proporciona baixa dependência de previsões de demanda.

Abaixo, se encontram listados os principais fatores que contribuem para a centralização de estoques:

- Alto valor agregado;
- Alto grau de obsolescência;
- Acesso à informação em tempo real;
- Baixa previsibilidade da demanda;
- Baixo giro;
- Inflexibilidade no processo de fabricação;
- Pouca economia de escala no transporte;
- Pequena margem de contribuição.

Uma prática comumente empregada em políticas de resposta rápida é o adiamento logístico (*postponement*), pelo qual a empresa mantém seus estoques centralizados até o último instante possível, enviando imediatamente os produtos para os clientes ou consumidores finais tão logo sejam colocados os pedidos.

A determinação da melhor política para cada empresa está condicionada a uma análise de diversos fatores externos e internos à empresa que influenciam seu posicionamento logístico. Segundo Wanke (2003), são três os principais fatores a serem considerados: dimensionamento da rede de instalações, localização dos estoques e política de transportes.

A determinação do número de armazéns, suas localizações e suas áreas de atendimento são questões englobadas pelo dimensionamento da rede. O grau de centralização, ou seja, a quantidade de produto em cada local, diz respeito à localização dos estoques. Por fim, as decisões acerca do modal mais adequado e consolidações de cargas são englobadas pela política de transportes.

A forma de articulação desses três fatores conjugados irá nortear a decisão sobre a melhor estratégia de posicionamento que deve ser adotada, objetivando a minimização do custo total e o atendimento do nível de serviço almejado.

2.8 Planejamento do fluxo

O fluxo da cadeia de suprimentos, na nomenclatura logística, pode ser puxado ou empurrado. A decisão de coordenação do fluxo de produtos é de grande importância

para posicionamento logístico, afetando todas as demais questões abordadas neste trabalho.

O sistema é dito puxado quando todas as etapas da cadeia de abastecimento, principalmente a produção, estão orientadas a partir dos pedidos dos clientes, ou seja, o fluxo é ativado pelo elo mais próximo ao cliente e o sistema deve estar organizado para oferecer uma resposta rápida às demandas.

O sistema é dito empurrado quando ocorre a situação inversa, ou seja, a cadeia está orientada a partir da produção, ou seja, o fluxo é acionado pelo elo mais próximo da produção, e os produtos e serviços são levados até o cliente.

Conforme visto, a coordenação está relacionada ao estágio da cadeia responsável pelo acionamento do sistema e para a tomada de decisão a cerca de que fluxo adotar devem ser analisados dois fatores: visibilidade da demanda (sabemos quando e o que o cliente quer?) e tempos de ressuprimento e distribuição (o cliente pode esperar?).

É necessário observar que para a adoção de sistemas puxados precisamos que os tempos de ciclo e de distribuição sejam inferiores aos tempos de resposta exigidos pelos clientes finais.

Assim como nas questões abordadas anteriormente, cabe à administração avaliar o impacto conjunto da visibilidade da demanda, e tempos de ressuprimento e decidir qual alternativa é indicada para a sua empresa.

O fluxo produtivo da cadeia de suprimentos exerce forte influência sobre as demais decisões primordiais, que foram apresentadas anteriormente. A decisão de coordenação de fluxos é a principal decisão dentro da estratégia de posicionamento logístico, afetando todas as demais decisões.

Capítulo 3

Caracterização das Peças de Reposição

No capítulo anterior, foram introduzidos elementos que dão suporte à tomada de decisão e auxiliam a resposta aos principais dilemas de domínio da administração de estoques, como os modelos tradicionais utilizados para a gestão de insumos, produtos acabados e em processamento. Neste capítulo, essas questões são abordadas para o caso específico das peças de reposição, uma vez que os modelos vistos não são aplicáveis à sua gestão.

3.1 Peças de reposição

Uma peça de reposição é comumente definida como “um bem destinado a substituir um bem que corresponde para restabelecer a função requerida de origem.”. Esta definição pode ser adicionada de duas notas: “o bem original pode ser reparado posteriormente; o bem especialmente afetado e/ou permutável para um equipamento determinado frequentemente é designado por peça de substituição específica”.

De forma objetiva, uma peça de reposição é uma peça utilizada para substituir uma peça quebrada, ou que não esteja funcionando bem. Esta simples definição acarreta na implicação clara e direta de que a peça de reposição é um componente fundamental e que, em algum momento, será mandatória para suprir uma necessidade do processo produtivo.

De fato, a reposição é imprescindível para assegurar a continuidade da produção, mas apenas isto não garante o sucesso produtivo; portanto é necessária a ampliação do conceito: para garantir o fluxo produtivo é indispensável que exista uma manutenção periódica, e para tal são necessárias peças de reposição, pessoal qualificado, ferramentas, entre outros.

Além disso, uma manutenção adequada deve possuir um caráter preventivo devidamente associado a um caráter corretivo, sendo necessário que se tenham disponíveis peças para a reposição.

3.2 Desafios da gestão do estoque de peças de reposição

Apesar de sua importância para o sucesso produtivo, algumas características das peças de reposição tornam a gestão de seus estoques um grande desafio (ROSA; MAYERLE; GONÇALVES, 2010; WANKE, 2012).

Todavia, a análise das particularidades a respeito dessas peças é fundamental, pois leva à compreensão do motivo pelo qual os modelos tradicionais de gestão não podem ser empregados, assim como facilita a busca por novos modelos que ultrapassem essas dificuldades.

Os maiores desafios na administração desses itens estão vinculados às seguintes características dos estoques de reposição (WANKE, 2003):

- elevados custos de aquisição;
- longos tempos de reposta de fornecimento (*lead-time*);
- giro baixíssimo.

Outras dificuldades somam-se a estas, tais como (DROHOMERETSKI *et al*, 2009):

- consumo irregular;
- alto risco de obsolescência;
- indisponibilidade pode causar consequências graves para a empresa;
- volume considerável de capital parado, investido em estoque.

Desta forma, muitas empresas passam a gerenciar seus estoques de reposição sob a ótica do nível de serviço, ou seja, mesmo com custo de aquisição muito alto e com demanda irregular, as peças fundamentais ao processo produtivo não podem faltar (FIGUEIREDO *et al.*, 2003).

Este posicionamento simplifica a tomada de decisão, mas aumenta significativamente a complexidade da gestão física dos itens, sendo possível uma

grande empresa ter mais de 500 mil peças de reposição diferentes em estoque (SILVER; PYKE; PETERSON, 1998).

A despeito de todos os desafios apresentados, existem dois importantes pontos de paridade com a gestão de produtos acabados ou insumos (WANKE, 2002):

- os sintomas dos problemas são os mesmos: falta ou excesso de estoque;
- a missão da gestão de estoques também é similar: manter níveis de estoque reduzidos, mas que não comprometam a disponibilidade dos itens.

Portanto, toda essa sintomática, com desafios e paridades, impulsiona o desenvolvimento de métodos mais apropriados, alternativos aos que foram apresentados no capítulo anterior.

3.3 Classificação das peças de reposição

Como mencionado no Capítulo 1, uma das classificações empregadas para as peças de reposição, amplamente utilizada na literatura, é apresentada por Botter e Fortuin (2000). Segundo os autores, as peças sobressalentes podem ser classificadas em itens reparáveis ou itens consumíveis.

Os primeiros englobam as peças de reposição que são técnica e economicamente recuperáveis, ou seja, em caso de falha, a peça antiga é substituída por uma nova e enviada para um centro de reparo, sendo posteriormente disponibilizada em estoque (BOTTER; FORTUIN, 2000).

É importante observar que o fato de um item ser reparável gera implicações e desdobramentos na gestão de estoque do item. Desta forma, as quantidades em processo de condicionamento devem ser deduzidas das quantidades a serem ressupridas no futuro (Sherbrooke, 1968; Kim *et al.*, 1996).

Em contrapartida, os itens consumíveis, também chamados de descartáveis, correspondem às peças que não são técnica nem economicamente recuperáveis. Em caso de falha, a peça antiga é simplesmente descartada (BOTTER; FORTUIN, 2000).

Como dito anteriormente, a presente dissertação não avalia a possibilidade de nova disponibilização para estoque de uma peça recuperada, portanto o termo peças de reposição refere-se aos itens classificados como descartáveis.

Outra consideração cabível para o estudo, é que o conceito de peça de reposição também irá englobar subconjuntos ou sistemas completos de peças, como por exemplo, equipamentos indispensáveis à operação que sejam mantidos em estoque.

Desta forma, neste trabalho estes serão tratados por peça de reposição, mesmo que de fato sejam um conjunto de peças. Exemplificando, o termo peça de reposição poderá se referir a um simples parafuso ou até mesmo um sistema formado por um conjunto completo de válvulas.

3.4 Caracterização das peças de reposição

Para fins de administração de estoque, é necessária maior profundidade na segmentação das peças do que a classificação apresentada. E, existindo um enorme variedade de peças, é muito importante essa diferenciação para uma melhor tratamento do estoque armazenado.

Para Wanke (2010), as peças de reposição devem ser agrupadas pela determinação de variáveis e faixas de observação das mesmas. Segundo o autor, as variáveis tradicionalmente utilizadas são: consumo histórico médio, tempo de reposta de ressurgimento (*lead time*), variabilidades no tamanho da demanda, variabilidade no tempo médio entre demandas e variabilidade no *lead-time*.

Observa-se, porém, que as três características consideradas usualmente para a seleção da política de estoques de reposição são:

- tempo de resposta de ressurgimento (*lead time*);
- custos de aquisição; e
- perfil de consumo.

De forma genérica, pode-se dizer que os tempos de resposta do ressurgimento são longos, pois algumas peças são muito específicas, não sendo comum que os fornecedores as mantenham em estoque. Outras vezes são importadas, de grande dimensão ou difíceis de transportar (BOTTER; FORTUIN, 2000).

Os custos de aquisição são elevados, e, como já foi dito anteriormente, uma típica empresa fabricante de bens de consumo tende a manter altos valores imobilizados em peças de reposição (SANDVIG; ALLAIRE, 1998).

Por fim, tem-se o perfil de consumo das peças de reposição. Sua análise é um ponto delicado e primordial para a distinção entre a grande variedade de peças estocadas.

Silva (2009), afirma que as peças de reposição possuem um padrão de demanda de baixo giro, errático e intermitente, caracterizado por demandas não frequentes, de tamanho variável, ocorrendo em intervalos irregulares.

Para Wanke (2002), a classificação de acordo com o giro facilita o desenvolvimento de técnicas de gestão apropriadas. O autor propõe a seguinte segmentação:

- **Peças de consumo em massa:** são peças que possuem consumo superior a 300 (trezentas) unidades por ano.
- **Peças de baixo giro:** são peças que possuem consumo entre 1 (uma) e 300 (trezentas) unidades anuais (média de aproximadamente uma unidade diária).
- **Peças de baixíssimo giro:** são peças que possuem consumo inferior a 1 (uma) peça por ano.

Em linhas gerais, as peças de reposição de diversos sistemas logísticos e de produção poderiam ser classificadas apenas como de baixo ou de baixíssimo giro, sendo raras as peças de reposição de consumo em massa (WANKE, 2002).

3.5 Gestão de estoques de peças de reposição

Nesta seção, serão apresentadas algumas técnicas de gestão de estoques específicas para as peças de reposição.

Para oferecer uma visão completa da administração desses itens, optou-se por mencionar brevemente os itens de reposição com consumo em massa, mesmo que tenham pouca representatividade no universo dos sobressalentes e não sejam o foco deste estudo.

3.5.1 Peças de consumo em massa

Como citado anteriormente, as empresas e os acadêmicos usualmente referem-se às peças de reposição como itens de baixo ou baixíssimo giro e alto custo de aquisição (WANKE, 2002). Todavia, é possível encontrar no estoque de sobressalentes algumas peças de alto giro, e, geralmente, de baixo custo comparativo.

O fato é que esses itens, de consumo em massa, não imprimem grandes desafios adicionais à equipe de gestão. Com consumo anual superior a 300 unidades, sua administração se aproxima muito dos modelos tradicionais para insumos, produtos acabados e em processamento, vistos no capítulo anterior.

De acordo com Rosa, Mayerle e Gonçalves (2010), destaca-se para esses itens, usualmente de demanda regular, o modelo clássico (s, Q) que tem como parâmetros o ponto de pedido s e o tamanho do lote Q , discutido no capítulo precedente.

Para o cálculo do estoque de segurança utiliza-se a distribuição de probabilidade Normal. Essa distribuição é a mais importante dentre as distribuições contínuas e a mais comumente utilizada na literatura, principalmente para itens de alto giro (SILVA, 2009).

É inteiramente descrita por seus parâmetros de média e desvio padrão, ou seja, de posse destes, consegue-se determinar qualquer probabilidade em uma distribuição normal.

O dimensionamento de estoque de segurança utilizando a distribuição normal é fundamentado na probabilidade da demanda por um item, estocado por um período de tempo, assumir valores dentro de um intervalo determinado (RIBEIRO *et al*, 2006).

O valor da necessidade estimada estará em torno de uma média esperada, podendo variar para mais ou para menos de acordo com o desvio padrão da distribuição (RIBEIRO *et al*, 2006).

Segundo Silva (2009), para se obter os parâmetros desta distribuição, primeiramente, deve-se determinar para uma demanda D o valor esperado $E(D)$ e a variância da demanda durante o tempo de resposta de fornecimento $Var(D)$, utilizando as equações abaixo.

$$E(D) = \lambda.E(d).E(L), \quad (3.1)$$

$$Var(D) = \lambda.E(L).Var(d) + \lambda.E(L).E(d)^2 + \lambda.E(d)^2, \quad (3.2)$$

em que:

- λ é o número esperado de demandas individuais por unidade de tempo;
- d é a variável aleatória que representa as demandas individuais;
- L é a variável aleatória que representa o tempo de ressuprimento.

Posteriormente, calcula-se o ponto de ressuprimento s , dado pela expressão:

$$s = D + k.\sigma, \quad (3.3)$$

sendo σ o desvio padrão da distribuição, obtido pela extração da raiz quadrada da variância $Var(D)$ e k o fator de segurança para um determinado nível de serviço teórico, obtido diretamente das tabelas da distribuição Normal Padrão $N(0,1)$.

Já o valor de Q é obtido pelo cálculo do lote econômico de compras, discutido no item (2.5.4) do presente estudo.

3.5.2 Peças de baixo giro

A distribuição Normal não é indicada para a modelagem da demanda de itens de baixo giro. E, para superar essa questão, muitos autores assumem que a demanda desses itens é aderente à distribuição de Poisson (SILVER; PYKE; PETERSON, 1998; WANKE, 2010).

Por ser discreta, a distribuição de Poisson fornece informações úteis para a administração, tal como a probabilidade de ocorrência de um determinado nível de consumo, tomando-se como base sua média histórica (WANKE, 2012).

Outra característica importante, que a diferencia da distribuição Normal, é que a distribuição de Poisson pressupõe independência entre eventos, ou seja, o consumo em um determinado período não é afetado pelo consumo no período anterior (WANKE, 2012).

Desta forma, Silva (2009) sugere a utilização do modelo (s, Q) para a gestão de estoques de baixo giro, sendo Q calculado pelo lote econômico de compras (ver 2.5.4), e s obtido pela função de densidade de probabilidade para a distribuição de Poisson.

A distribuição de Poisson é dada por (WASSERMAN, 2004):

$$P_x(t) = \frac{(\lambda * t)^x e^{-\lambda t}}{x!}, \quad (3.4)$$

em que:

- x : é o consumo de peças de reposição por intervalo de tempo cuja probabilidade se deseja estimar;
- t : é o intervalo de tempo a ser considerado;
- λ : é a taxa de consumo histórico por unidade de tempo; e
- $P_x(t)$: probabilidade de haver x solicitações durante o intervalo de tempo t .

Pode-se demonstrar que a duração de vida média dos bens que obedecem a esta distribuição é igual à $1/\lambda$. Este tempo é o tempo médio entre falhas, que segue uma distribuição exponencial (PORRAS; DECKER, 2008).

No entanto, Yeh (1997) destaca que o uso da distribuição de Poisson é restrito para as situações em que a variância da demanda $V(D)$ esteja situada dentro de um intervalo determinado por uma variação de 10% ao redor da média $E(D)$, ou seja:

$$0,9 * E(D) < VAR(D) < 1,1 * E(D). \quad (3.5)$$

Fora deste intervalo, e se o período com demanda nula for superior a 30% do total, alguns autores sugerem o uso da distribuição Gama como uma alternativa à distribuição de Poisson para os itens de baixo consumo.

Nessas condições, é válido considerar o intervalo de tempo decorrido entre duas demandas consecutivas diferentes de zero como uma variável importante para a modelagem.

A distribuição Gama é definida por dois parâmetros α e β que são, respectivamente, o parâmetro de forma e o parâmetro de escala (KEATON, 1995). O parâmetro de forma, α , é um parâmetro de distribuição contínua que determina o formato da distribuição, num sentido distinto. O parâmetro de escala, β , expressa o grau de espalhamento, ou a variação dos valores da variável aleatória, que comprime ou expande a distribuição.

A função de densidade de probabilidade de X , sendo X uma variável aleatória com distribuição Gama, é dada por (WASSERMAN, 2004):

$$f(x) = \frac{(\alpha x)^{\beta-1} \alpha e^{-\alpha x}}{(\beta-1)!}, \quad 0 \leq x < \infty \text{ e } \beta \text{ inteiro.} \quad (3.6)$$

O valor esperado e a variância de X são dados por:

$$E(x) = \alpha\beta, \quad (3.7)$$

$$Var(x) = \alpha\beta^2. \quad (3.8)$$

As expressões acima podem ser rearranjadas, de forma que é possível extrair os parâmetros da distribuição Gama:

$$\alpha = \frac{E(x)^2}{Var(x)}, \quad (3.9)$$

$$\beta = \frac{Var(x)}{E(x)}. \quad (3.10)$$

Para determinar os parâmetros s e Q da política (s, Q) , Silva (2009) propõe obter o valor inicial de Q pelo lote econômico de compras.

Posteriormente, calcula-se s resolvendo a equação:

$$P(s) = \frac{Qh}{pD}, \quad (3.11)$$

sendo:

- h - o custo arbitrário de manutenção (R\$/unidade);
- p - o custo unitário de ruptura (R\$/unidade).

O ponto de ressuprimento é obtido da probabilidade cumulativa $F(s)$ substituindo a função de densidade de probabilidade $f(x)$ pela distribuição Gama com parâmetros α e β , de forma que:

$$P(s) = 1 - F(s). \quad (3.12)$$

Então, com o valor de s é possível determinar o número esperado de unidades não atendidas por ciclo $n(s)$ utilizando a equação para a distribuição Gama (TYWORTH; GANESHAN, 2000).

$$n(s) = \alpha\beta(1 - G_1(s)) - s(G_0(s)), \quad (3.13)$$

sendo:

- G_1 - função de distribuição cumulativa de Gama $(\alpha + 1, \beta)$
- G_0 - função de distribuição cumulativa de Gama (α, β)

O valor de Q será determinado pela equação (3.14), considerando a minimização do custo total.

$$Q = \sqrt{\frac{2D[K + pn(s)]}{h}}. \quad (3.14)$$

Como o valor de Q retorna-se a equação (3.12) e continuam-se as iterações até que ocorra a convergência dos valores ótimos para s e Q .

3.5.3 Peças de baixíssimo giro

Por fim, têm-se os itens para os quais o presente trabalho apresenta uma modelagem alternativa: as peças de reposição de baixíssimo giro. Como definido, possuem consumo inferior a uma peça por ano, portanto os métodos vistos até o momento não fornecem amparo adequado para a tomada de decisões.

Nestas condições, a grande questão dos administradores do estoque é decidir se, a cada ocorrência de demanda, devem fazer um novo pedido ao fornecedor ou utilizar peças mantidas em estoque (SILVA, 2009).

Para avaliar esta decisão, alguns autores, como Tavares e Almeida (1983) e Wanke (2003) propõem modelagens de controle do estoque baseadas na análise dos custos totais.

Popp (1965) apresentou um modelo para itens de giro médio e baixo, baseado em custos totais, que foi o ponto de partida para outros importantes trabalhos. Neste modelo, os custos de manutenção de estoque e os custos de aquisição são calculados e comparados para a tomada de decisão.

Tavares e Almeida (1983) apresentaram uma versão mais simples e restritiva, considerando que a decisão a ser tomada é de não estocar ou estocar apenas uma unidade. Dessa forma, foi desenvolvido um modelo binário, baseado no custo total, que pode ser considerado precursor para peças de reposição de baixíssimo giro.

O modelo proposto pelos autores utiliza a distribuição de Poisson para obtenção da demanda e considera a colocação de pedido emergencial, com tempo de resposta inferior ao usual, sempre que houver ruptura.

É também calculada a chamada demanda limite, abaixo da qual não se deve manter o item em estoque. Essa é obtida pela divisão do custo de manutenção de estoque por unidade de tempo pelo custo incremental de se fazer um pedido emergencial para se suprir a falta. O valor limite é então comparado com a demanda histórica obtida por Poisson.

Wanke (2012) resume o modelo de Tavares e Almeida (1983), afirmando que o custo total associado à política de não manter a peça de reposição em estoque (C_{TO}) pode ser calculado da seguinte forma:

$$C_{TO} = \lambda * C_{TR} + C_{IP}, \quad (3.15)$$

em que:

- λ - consumo histórico médio (peças/ano);
- C_{TR} - custo total de ressuprimento do item/ colocação do pedido (R\$); e
- C_{IP} - custo de indisponibilidade e penalidade relativo à ruptura (R\$).

Com esta definição, Wanke (2012) sugere a adoção de uma política alternativa, ou seja, a empresa mantém uma unidade em estoque até que o consumo ocorra, devendo ser avaliada a fração de tempo esperada com estoque (F_{TC}), dada por:

$$F_{TC} = \frac{1}{1 + \lambda * R}, \quad (3.16)$$

em que R é o tempo de ressuprimento.

O valor esperado de ocorrências durante a fração de tempo esperada sem estoque é dada por $\lambda * (1 - F_{TC})$. Desta forma, o autor afirma que é possível obter o custo total

associado à decisão de manter sempre uma peça em estoque (C_{T1}), levando-se em consideração a possível ocorrência de outra solicitação durante o tempo de resposta, além de suas implicações em termos dos custos de ressuprimento e dos custos de indisponibilidade e penalidade, conforme a expressão abaixo (WANKE, 2012):

$$C_{T1} = \left[\frac{1}{1 + \lambda * R} * C_{AQ} * i \right] + [C_{TR} * \lambda] + \left[C_{IP} * \lambda * \left(1 - \frac{1}{1 + \lambda * R} \right) \right], \quad (3.17)$$

sendo i o custo de oportunidade ao ano.

As parcelas da equação representam, respectivamente, o custo de oportunidade de manter uma peça de reposição em estoque, o custo total de ressuprimento e o custo de indisponibilidade e penalidade. A política mais vantajosa é obtida pela comparação de C_{T0} e C_{T1} , optando-se pelo menor custo.

Silver, Pyke e Peterson (1998) também aprimoraram o modelo apresentado por Popp (1965), permitindo algumas variações, e avaliaram o modelo de Tavares e Almeida (1983), afirmando que seus resultados trazem boas referências, e, mesmo violando algumas premissas do modelo original, são bastante úteis para a tomada de decisão (SILVA, 2009).

3.6 Quadro Conceitual

Wanke (2012) consolidou grande parte das questões discutidas na seção anterior em um quadro conceitual apresentado a seguir, que orienta a gestão de estoques de acordo com a demanda e seu coeficiente de variação.

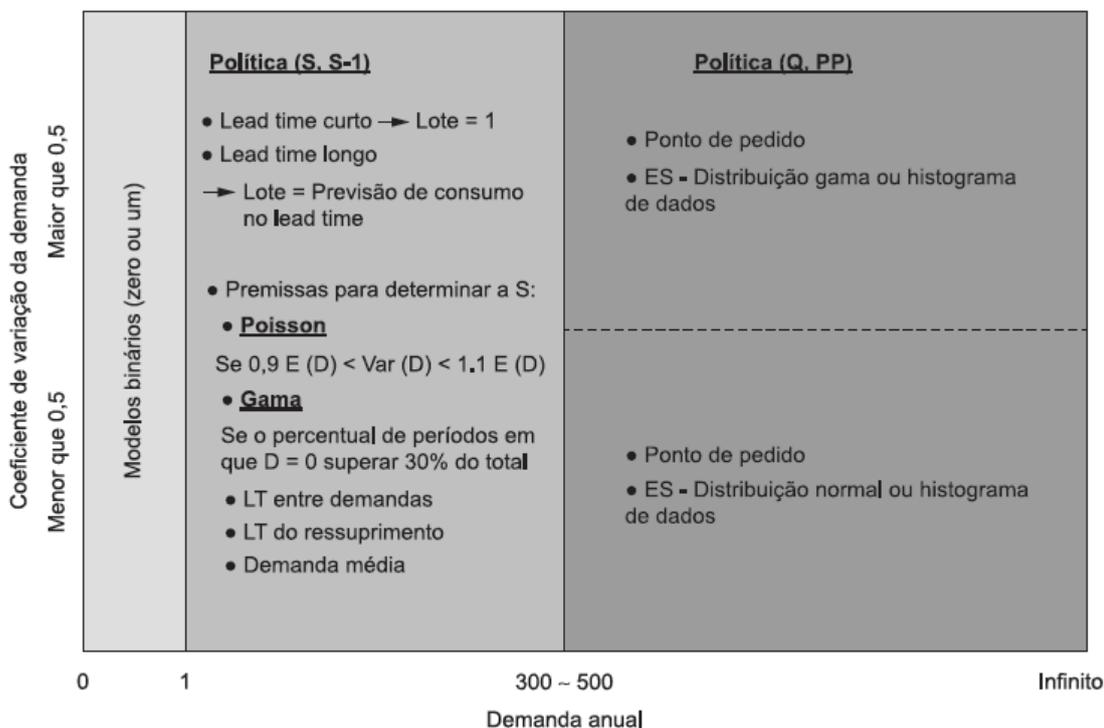


Figura 3.1: Quadro Conceitual (WANKE, 2012)

Mais especificamente, para cada quadrante da demanda anual e do coeficiente de variação da demanda do item, o quadro apresenta as funções de distribuição de probabilidade de maior aderência, assim como o modelo de gestão de estoque mais adequado, incorporando as considerações teóricas descritas nas seções anteriores (WANKE, 2012).

3.7 Considerações

Discutidas essas questões e apresentado o modelo de Tavares e Almeida (1983), ao qual o presente trabalho propões um modelo alternativo, cabe dizer que a adoção de um modelo binário restringe as possibilidades e possíveis configurações do estoque dessas peças. E, como será visto no próximo capítulo, em algumas situações esta não é a alternativa mais econômica.

Da mesma forma, em algumas situações nos deparamos com estoques iniciais existentes diferentes de 0 e 1, e novamente encontra-se uma dificuldade na adoção deste modelo.

Ademais, para os casos em que for vantajoso de alguma forma manter estoques ou déficits maiores, o modelo binário tende a ser sub-ótimo. Portanto, o trabalho propõe um método para obter o custo ótimo em longo prazo, assim como a estratégia de estoques associada a esse custo.

Capítulo 4

Modelagem

Neste capítulo é apresentado o sistema estudado, para o qual se propõe um modelo de gestão de estoque por meio de uma classe de processos markovianos denominada Processos Markovianos Determinísticos por Partes.

Primeiramente, o sistema é apresentado de forma abreviada. Na sequência, após algumas definições necessárias, a formulação do problema é descrita e seus componentes são detalhados com maior profundidade.

4.1 Considerações iniciais sobre o modelo

O modelo que será apresentado é uma alternativa para a gestão de estoques de peças de reposição de baixíssimo giro, desenvolvido com o uso de uma classe de processos markovianos, denominada Processos Markovianos Determinísticos por Partes (DAVIS, 1993).

Trata-se de uma abordagem distinta em relação aos atuais modelos disponíveis na literatura, e previamente utilizada em problemas de produção (e.g., ARRUDA, 2002).

A modelagem utilizada faz-se valer do fato de que o tempo de resposta de fornecimento (*lead time*) está, na realidade, ligado ao processo produtivo do fornecedor. Dessa forma, um modelo de produção e estoque (P&E) com tempo de conclusão aleatório pode representar o processo, desde que a distribuição do tempo de conclusão do modelo P&E considerado coincida com a distribuição do tempo de resposta de fornecimento.

Isso posto, a modelagem por meio de Processos Markovianos Determinísticos por Partes leva em consideração tanto os saltos aleatórios relativos à chegada de

demanda ou de itens previamente solicitados junto ao fornecedor, como também um custo de *setup* que, no modelo considerado, representa o custo de pedido do processo.

A solução do problema de P&E é bastante simples para o caso de um único item, o que a torna sua aplicação ainda mais atrativa para o problema estudado.

4.2 O sistema estudado

Considere um sistema responsável pela gestão do estoque das peças de reposição de uma empresa do setor do petróleo.

As solicitações de reposição de peças chegam em instantes aleatórios. Desta maneira, forma-se uma sequência com os instantes de chegadas no sistema das necessidades de reposições. Sendo assim, é possível obter a demanda acumulada até um determinado instante por meio do somatório dos pedidos realizados neste período.

Os pedidos são atendidos com o estoque disponível do item na empresa, adquirido do fornecedor usualmente em unidades ou pequenas quantidades. A compra de poucas unidades ocorre em função do baixo giro e do alto custo de aquisição dessas peças de reposição.

Neste sistema, considera-se que o fornecedor não possui estoque de peças de reposição (também em função do baixo giro e alto custo dessas peças), portanto inicia seu processo de fabricação apenas quando recebe um pedido de novas peças.

O processo produtivo do fornecedor evolui a uma taxa de progressão de atendimento do pedido, e demanda um tempo apropriado para sua produção. Um pedido é finalizado quando a progressão do tempo de produção chega a dado valor, de forma que é possível obter a produção acumulada até um determinado instante por meio do somatório da produção neste período.

Portanto, a quantidade de itens em estoque ou sob encomenda é obtida pela diferença entre a produção e a demanda. O sistema será estável se toda a demanda por reposições for suprida em tempo finito.

Pode-se considerar as mudanças na quantidade estocada como saltos do processo, que ocorrem nos instantes de chegada de demanda e também nos instantes de

conclusão de um novo lote de itens. O processo possui também uma medida de probabilidade de saltos.

Com estas informações, o gestor do sistema precisa decidir se realiza ou não novas compras, que por sua vez irão acarretar no início, ou não, do processo de fabricação de novas peças.

Tais decisões são consideradas intervenções no processo produtivo, e o conjunto dessas decisões caracteriza a estratégia ou política de produção, definida pela sequência de instantes de intervenção.

A política ótima para a solução deste sistema é uma política tipo *bang-bang*, ou seja, ou paralisa-se a produção ou fabrica-se com o esforço máximo de produção (ARRUDA, 2002).

Portanto, pode-se considerar a divisão do espaço dos estados possíveis do sistema em dois subconjuntos, de produção e de paralisação, e que as intervenções transferem o sistema de um subconjunto para o outro.

Assume-se que as políticas de intervenção admissíveis são markovianas, portanto têm conhecimento completo do estado (estoque e esforço de produção) e do subconjunto em que este se encontra (produção ou paralisação).

Para cada estratégia de produção, associamos um custo de operação do sistema. Por conseguinte, o objetivo é minimizar o custo esperado de operação do sistema em horizonte infinito.

4.3 A demanda

A demanda do sistema é formada por solicitações de reposição de peças unitárias que chegam em instantes aleatórios, formando um processo de Poisson com taxa $\delta > 0$. Considera-se σ_i , $i = 1, 2, 3, \dots$ a sequência de instantes de chegada no sistema desses pedidos de reposição.

Sendo $I_{\{\sigma_i \leq t\}}$ a função indicadora do conjunto σ_i , que indica se houve ou não demanda naquele instante, a demanda acumulada até um determinado instante t é definida pelo processo $t \rightarrow d_t$, dado por:

$$d_t = \sum I_{\{\sigma_i \leq t\}}, \quad t \geq 0. \quad (4.1)$$

4.4 A produção

As peças são usualmente compradas dos fornecedores em unidades ou em pequenas quantidades. A quantidade de peças de um item solicitadas em um pedido de compras será representada por K . O tempo de produção do fornecedor evolui a uma taxa normalizada $u_t \in [0,1]$, $\forall t \geq 0$. A progressão do atendimento do pedido é representada pelo processo contínuo $t \rightarrow \xi_t$, definido como:

$$\xi_t = \int_{\theta}^t u_s ds, \quad (4.2)$$

Na expressão acima, $\theta \in [0, t)$ é o instante de conclusão da produção do pedido anterior. Um pedido é finalizado quando a progressão do tempo de produção chega a um certo valor dado por Γ ; logo, $0 \leq \xi \leq \Gamma, \forall t \geq 0$. Note que Γ denota o tempo de resposta de fornecimento do pedido.

Para cada item fabricado, assume-se que $\Gamma \in [0, \infty)$ é uma variável aleatória exponencialmente distribuída a uma taxa $1/\gamma$. A figura abaixo, retirada de Arruda (2002), exemplifica a trajetória do processo $t \rightarrow \xi_t$, na qual Γ_i representa o tempo de resposta de de produção do i -ésimo pedido.

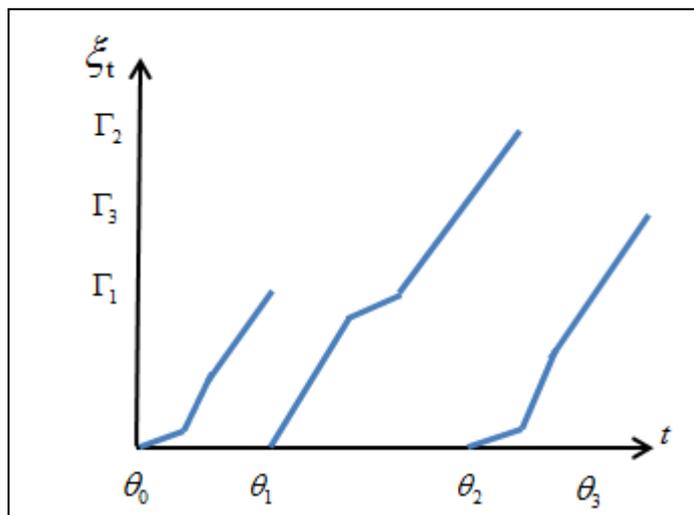


Figura 4.1: Trajetória do processo ξ_t (ARRUDA, 2002)

A produção acumulada até um determinado instante t , representada pelo processo discreto $t \rightarrow q_t$ obedece à seguinte equação:

$$q_t = \sum_i K I_{\{\theta_i \leq t\}} , \quad t \geq 0. \quad (4.3)$$

Portanto, a quantidade de itens em estoque ou sob encomenda é expressa pelo processo discreto $t \rightarrow \eta_t$ assim definido:

$$\eta_t = q_t - d_t , \quad t \geq 0. \quad (4.4)$$

O sistema será estável, se a todo instante $t \geq 0$ a demanda por reposições for suprida em tempo $t < \infty$.

4.5 Os saltos do processo

Seja $\bar{N} = \{N^-, \dots, N^+\} \subset Z$ um conjunto enumerável, sendo que N^- representa o menor nível de estoque do sistema e N^+ representa o máximo estoque admitido para o sistema. O processo $t \rightarrow z_t = (\eta_t, \xi_t)$ toma valores em um conjunto $S: \bar{N} \times R_+$ e apresenta uma trajetória determinística intercalada por saltos aleatórios, que ocorrem quando da solicitação de reposição de uma peça ou da entrega de um pedido por parte do fornecedor.

Considerando que é aplicada ao sistema uma taxa de produção normalizada $u_t = a, a \in [0,1]$, para todo instante $t \geq 0$, a taxa total de saltos do processo é expressa por:

$$\lambda(a) = \delta + \gamma a , \quad (4.5)$$

O processo possui também uma medida de probabilidade de saltos:

$$\mu(z', z | u = a) = \frac{\delta}{\lambda(a)} P(z' - z = \omega) + \frac{\gamma a}{\lambda(a)} I_{\{z - z' = K\}} , \quad (4.6)$$

na qual considera-se que o processo salta de z' para z .

A figura 5.1 mostra uma trajetória típica do processo (η_t, ξ_t) para $K=1$. Note que nos instantes de conclusão θ_i , o processo salta de $(\eta_{\theta_i^-}, \Gamma)$ para $(\eta_{\theta_i^-} + K, 0)$, ao passo que nos instantes de chegada de pedidos o processo salta de $(\eta_{\sigma_i^-}, \xi_{\sigma_i^-})$ para $(\eta_{\sigma_i^-} - \omega_i, \xi_{\sigma_i^-})$.

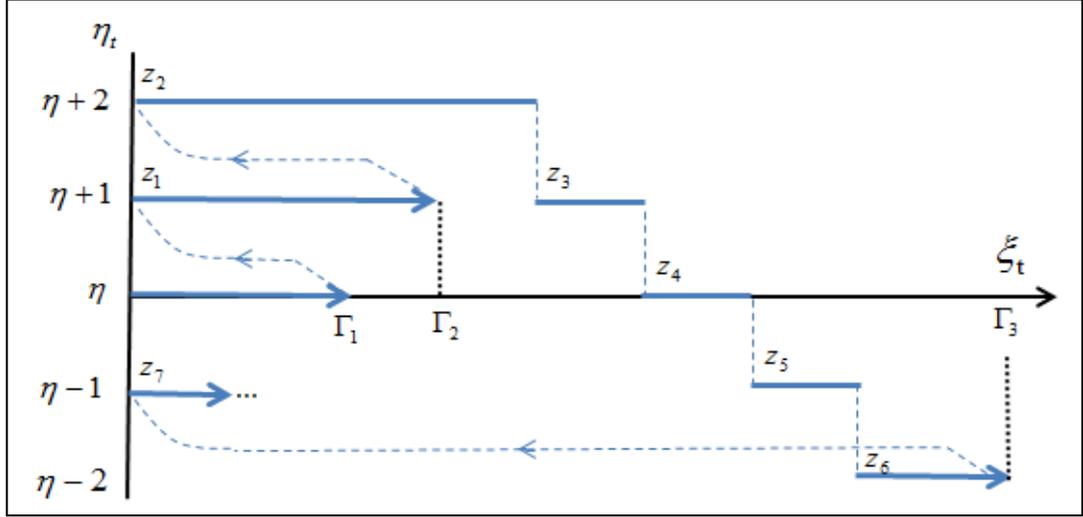


Figura 4.2: Trajetória do processo (η_t, ξ_t) (ARRUDA, 2002).

4.6 O controle impulsional

Considera-se que a variável u_t definida na seção 4.4 assume os valores do conjunto $\{0,1\}$. Esta política é chamada de *bang-bang* e ocorre pois é sempre ótimo produzir à máxima taxa ou parar o processo produtivo (ARRUDA, 2002). Na prática, isso significa que estamos dividindo o espaço de estados S do processo $t \rightarrow z_t$ em duas cópias idênticas representadas por S' e S'' .

Considera-se que o processo $t \rightarrow z_t$ evolui ora no subconjunto $S' := \bar{N} \times [0, \Gamma)$ (sempre que $u_t = 1$), ora no subconjunto $S'' := \bar{N} \times [0, \Gamma)$ (para todo $u_t = 0$). Portanto, não é sem razão que S' é denominado subconjunto de produção, enquanto S'' é chamado de subconjunto de paralisação. O espaço de estados do processo é dado por $S = S' \cup S''$.

Supõe-se também que o tomador de pedidos tem a capacidade de intervir no sistema, transferindo-o de S' para S'' , ou vice-versa, em instantes quaisquer, formando

uma sequência τ_i de instantes aleatórios que representam as intervenções de controle no sistema. As intervenções devem, contudo, ser penalizadas.

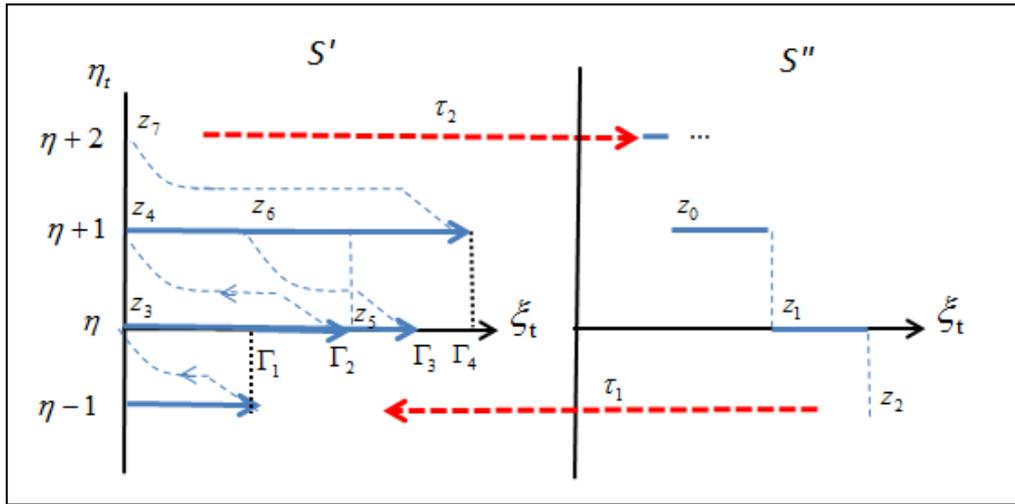


Figura 4.3: Trajetória típica do problema de controle impulsional (ARRUDA, 2002)

A figura 4.3 mostra uma trajetória típica do processo $t \rightarrow z_t = (\eta_t, \xi_t)$. No subconjunto S' o processo $t \rightarrow z_t$ salta nos instantes de chegada de demanda e também nos instantes de conclusão de um novo lote de itens.

No subconjunto S'' , o processo $t \rightarrow z_t$ apresenta apenas saltos por demanda, permanecendo de outra forma no mesmo estado até o próximo evento do tipo de demanda ou intervenção. Observe também que o processo $t \rightarrow z_t$ é transferido de S' para S'' e vice-versa nos instantes τ_1 e τ_2 , respectivamente.

Define-se uma estratégia de produção pela sequência de instantes de intervenção $\pi = \{\tau_1, \tau_2, \dots\} \in \Pi$, sendo Π a classe de todas as políticas de intervenção factíveis. Assume-se que as políticas de intervenção admissíveis são markovianas, portanto têm conhecimento completo do estado (η_t, ξ_t) e do subconjunto em que este se encontra (S' ou S'').

Para cada estratégia de produção π associamos certo custo de operação para o sistema. O decisor busca a estratégia de intervenções que minimize o custo esperado de operação do sistema em horizonte infinito.

4.7 Os custos operacionais do sistema

As decisões de controle devem ser tomadas de modo a minimizar o custo esperado de operação do sistema. Neste estudo, o custo é formado pelos seguintes elementos:

- **Custo de aquisição:** o custo de aquisição β é o valor que o fornecedor cobra pela produção de cada quantidade K de itens por unidade de tempo, considerando uma margem de lucro e gastos diretamente ligados à taxa de produção, tais como treinamento, despesas com empregados, aquisição de matéria-prima, manutenção de equipamentos etc.
- **Custo do pedido:** o custo do pedido dado pela função $g : S \rightarrow R_+$ engloba todos os custos referentes a uma nova encomenda: o envio da encomenda, receber essa mesma encomenda e inspeção. O modelo de estudo foi analisado com três funções de custo do pedido, o que nos permite avaliar situações nas quais esse custo é muito baixo, ou até mesmo nulo, e situações em que esse custo é representativo.
- **Custo de armazenagem:** o custo de armazenagem é dado por $L(\eta)$ onde $\eta \rightarrow L(\eta)$ é uma função convexa representativa do custo de estoque ($\eta > 0$) ou déficit ($\eta \leq 0$) de itens, que considera os custos proporcionais às quantidades armazenadas. Tais como os custos despendidos com a área física, taxa de seguro, perdas, obsolescência, e, no caso da falta de estoque, são os valores relativos ao não atendimento da demanda em um dado período de tempo. No presente trabalho, o custo de armazenagem utilizado é proporcional ao custo do produto.

4.8 Formulação do problema de controle impulsional

Como visto, $u_t \in \{0,1\}, \forall t \geq 0$, o espaço de estados S é formado pela união de subconjuntos idênticos (S' e S''), que representam as regiões de produção ($u_t = 1$) e de paralisação ($u_t = 0$), respectivamente.

O processo $t \rightarrow z_t$ toma valores em $S = S' \cup S''$ e apresenta trajetória determinística intercalada por saltos aleatórios, que ocorrem por ocasião da chegada de demanda ou da conclusão de um lote de itens do produto fabricado. A taxa total de saltos do processo é dada por:

$$\lambda = \begin{cases} \delta + \gamma, & \forall z \in S' \\ \delta, & \forall z \in S'' \end{cases} \quad (4.7)$$

Assim, considera-se a sequência ordenada de instantes de saltos do processo $\{T_k, k = 0, 1, \dots\}$, cuja distribuição de probabilidade entre saltos é expressa pela seguinte equação:

$$P(T_{k+1} - T_k > t) = e^{-\lambda t}, \quad t > 0. \quad (4.8)$$

Entre saltos, o processo $t \rightarrow z_t = (\eta_t, \xi_t) \in S$ obedece a uma trajetória determinística representada pela seguinte função:

$$\varphi(t, z) = \begin{cases} (\eta, t + \xi), & T_k \leq t \leq T_{k+1} & \forall z \in S' \\ (\eta, \xi), & T_k \leq t \leq T_{k+1} & \forall z \in S'' \end{cases} \quad (4.9)$$

O processo $t \rightarrow z_t$ possui também uma medida de probabilidade de saltos definida como:

$$\mu(z', z) = \frac{\delta}{\lambda} \mathbf{I}_{\{z' - z = 1, z \in S''\}} + \frac{\gamma}{\lambda} \mathbf{I}_{\{z - z' = K, z \in S'\}}, \quad (4.10)$$

assumindo-se que o processo salta de z' para z .

O problema é caracterizado pelas intervenções que transferem o processo z_t de S' para S'' ou vice-versa, pagando-se por isso o custo instantâneo $g: S \rightarrow R_+$. Cabe lembrar que as intervenções ocorrem em instantes aleatórios τ_i .

Entre os instantes de intervenção, é considerado o custo da evolução do processo $h: S \rightarrow R_+$, que é a função em que são considerados os custos de aquisição e estocagem, definida por:

$$h(\eta) := L(\eta) + \beta \mathbf{I}_{\{\eta \in S\}} \quad \forall \eta \in S. \quad (4.11)$$

Na equação (4.13), o escalar $\beta > 0$ representa o custo de aquisição do produto por unidade de tempo. O acúmulo do custo de aquisição durante o tempo de entrega resulta no custo de aquisição de um lote de produtos.

Assim sendo, o custo total de fabricação será variável e dependente do tempo de fabricação do item. Como o tempo de fabricação é exponencial e tem taxa γ , o valor esperado do custo de aquisição é dado por β/γ .

Para cada política de intervenção factível $\pi = \{\tau_1, \tau_2, \dots\} \in \Pi$, associamos uma função valor $V : \bar{N} \times [0, \infty) \rightarrow R$ definida por:

$$V(z) := \inf_{\pi \in \Pi} E_z^\pi \left\{ \int_0^\infty e^{-\alpha s} h(z_s) + \sum_{i=1}^\infty e^{-\alpha \tau_i} g(z_{\tau_i^-}) \right\}, \quad (4.12)$$

sendo α a taxa de desconto e $z = z_0$ o valor inicial do processo $t \rightarrow z_t$.

Nessa função encontra-se uma primeira parcela relativa aos custos da evolução do processo, que por sua vez considera custos de aquisição e estocagem; e uma segunda parcela que considera os custos decorrentes das intervenções envolvidas no processo, representada por $g : S \rightarrow R^+$.

A solução deste problema consiste em dividir o problema geral em uma série de problemas de um único salto ou uma única intervenção (o que ocorrer no menor horizonte) para depois recuperar a solução geral do problema fazendo o número de saltos e intervenções tender a infinito. Apresenta-se, na sequência, a formulação desse processo de solução para o problema estudado.

4.9 Operador de um salto ou uma intervenção

Primeiramente, definem-se dois operadores; um fornece o custo relativo a uma intervenção, o outro fornece o custo até a ocorrência de um salto no processo. Para se escolher a melhor decisão (intervenção ou espera pelo primeiro salto, sem intervenção), pode-se calcular os dois operadores e escolher o de menor custo. Sendo o menor custo o da opção de espera pelo salto, adota-se este caminho para o processo, caso contrário

intervém-se instantaneamente no processo. E assim, a trajetória com menor custo para o processo vai sendo definida.

O operador para um salto no processo, seja ele por demanda ou pela chegada de um pedido, é dado por:

$$R_1[\phi](\eta) := E_z \left\{ \int_0^{T_1} e^{-\alpha s} h(\eta_s) ds + e^{-\alpha T_1} \phi(\eta_{T_1}) \right\}. \quad (4.13)$$

A primeira parcela da equação é relativa ao custo de evolução do processo até a ocorrência do primeiro salto e a segunda parcela representa o custo futuro associado ao estado para o qual o processo salta.

Posteriormente, avalia-se o custo para o caso de uma intervenção. Utiliza-se o mesmo operador apresentado acima, porém, ao invés de calcular para a posição de estoque η no subespaço em que se encontra, calculamos o custo da mesma posição de estoque para o outro subespaço, ou seja, o subespaço de destino no caso de uma intervenção. Designa-se por $\bar{\eta}$ o estoque η no subespaço de destino.

Além disso, é necessário acrescentar ao operador o custo de intervenção $g(\eta)$, portanto o operador para os casos de uma intervenção será:

$$R_2[\phi](\eta) := R_1[\phi](\bar{\eta}) + g(\eta). \quad (4.14)$$

Como dito anteriormente, para definir a trajetória de menor custo, observa-se o mínimo entre os dois operadores, definido como $P[\phi] : S \rightarrow R$ na equação abaixo.

$$P[\phi](\eta) := R_1[\phi](\eta) \wedge R_2[\phi](\eta). \quad (4.15)$$

4.10 Cálculo dos operadores

Para o problema estudado, considera-se que o lote de fabricação é unitário ($K=1$). Desta forma, o cálculo do termo à direita da igualdade na Eq. (4.13) é efetuado fazendo-se uso dos Lemas 3.1 e 3.2 (ver Apêndice A) de Arruda (2002), chegando-se à expressão abaixo:

$$R_1[\phi](\eta) := \frac{1}{\lambda} \{h(\eta) + \lambda Q[\phi](\eta)\}. \quad (4.16)$$

Sendo:

$$Q = \frac{\delta}{\lambda} \phi(\eta - 1) + \frac{\gamma}{\lambda} \phi(\eta + 1) \}, \quad (4.17)$$

e,

$$\hat{\lambda} = \alpha + \lambda. \quad (4.18)$$

Cabe lembrar que λ foi definido na Eq. (4.7).

4.11 Retornando ao problema original

Para calcular a função valor, definida na Eq. (4.12), e encontrar a solução do problema original, utiliza-se o algoritmo definido abaixo:

$$V_{k+1}(\eta) := R_1[V_k](\eta) \wedge \{V_k(\bar{\eta}) + g(\eta)\}, \quad (4.19)$$

iniciando com um dado V_0 arbitrário. O algoritmo converge quando $\|V_{k+1}(\eta) - V_k(\eta)\| < tol$, sendo tol uma tolerância definida a priori (ver Apêndice A). O valor assim obtido coincide com a solução de ponto fixo do operador $P[V]$, que satisfaz à expressão:

$$V^*(\eta) = R_1[V^*](\eta) \wedge \{V^*(\bar{\eta}) + g(\eta)\}. \quad (4.20)$$

De forma que a política extraída desse algoritmo será a política ótima. Indicando para os casos em que o mínimo é $R_1[V^*](\eta)$ a permanência no subespaço em que se encontra, e, para os casos em que o mínimo é $V^*(\bar{\eta}) + g(\eta)$ a troca de subespaço.

4.12 Considerações sobre o programa principal

O algoritmo apresentado foi programado com o auxílio do ferramenta Matlab 7.0, e, neste momento, cabem algumas considerações sobre o programa principal, que contribuem para a compreensão do modelo.

Inicialmente, informa-se os valores da taxa de desconto (α), custo de produção (β), taxa da demanda (δ), taxa de produção (γ) e tolerância (tol). Posteriormente, o

programa solicita o vetor de estados e as funções que serão utilizadas para o cálculo do custo de intervenção e de permanência.

Após realizar os cálculos dos custos, o programa avalia as possíveis intervenções com mudanças entre os subespaços. E, de forma bem simplificada, na linguagem de programação tem-se que o *loop* ocorre da seguinte forma:

Para todo $\eta \in N^+$, iniciar $V_0(\eta)$

Estabelecer valor para a variável tol

Erro = 0

k = 0

Enquanto (Erro > tol)

- Erro = 0

- Para todo $\eta \in N^+$, calcular

$V_{k+1}(\eta) := R_1[V_k](\eta) \wedge \{V_k(\eta) + g(\eta)\}$

dev = | $V_{k+1}(\eta) - V_k(\eta) |$

Erro = max(Erro, dev)

k < k+1

Fim Enquanto

No Subespaço S'

Para todo $\eta \in N^+$

$u(\eta) = 1$

Se $V_{k+1}(\eta) \leq R_1[V_{k+1}](\eta)$

$u(\eta) = 0$

No Subespaço S''

Para todo $\eta \in N^{+}$

$$u(\eta) = 0$$

$$\text{Se } V_{k+1}(\eta) \leq R_1[V_{k+1}](\eta)$$

$$u(\eta) = 1$$

4.13 Considerações sobre o modelo

A modelagem apresentada, que é uma novidade em termos de gerenciamento de estoque de baixíssimo giro, permite analisar não apenas nível de fornecimento, como também obter estratégias ótimas em termos de custo de operação em longo prazo.

Note que a obtenção de estratégias de custo ótimo em problemas de estoques de baixo giro para funções de custo convexas, e não somente lineares, é também uma inovação do presente trabalho.

Outra vantagem é a adoção de um modelo que não restringe as possibilidades e possíveis configurações do estoque dessas peças, em contraposição aos modelos binários disponíveis.

Em alguns casos pode ser mais vantajoso de alguma forma manter estoques ou déficits maiores, e nessas situações o modelo binário apresentará uma solução sub-ótima. Da mesma forma, em algumas situações nos deparamos com estoques iniciais existentes diferentes de 0 e 1, e novamente encontra-se uma dificuldade na adoção deste modelo.

Portanto, o método proposto possibilita a obtenção de uma política de estoques associada ao custo ótimo em longo prazo, para funções custo e níveis de estoques diversos, sendo um modelo mais abrangente.

Capítulo 5

Experimentos Numéricos

O presente capítulo aborda a aplicação prática dos conceitos e do modelo, apresentados nos capítulos anteriores. Desta forma, o objetivo principal deste capítulo é apresentar os valores resultantes dos experimentos de maior relevância realizados, assim como a análise dos resultados encontrados, o que permite provar a validade da teoria e do modelo proposto nesse estudo.

5.1 Experimentos numéricos

Para ilustrar a aplicação do algoritmo, proposto no capítulo anterior, foram selecionados nove experimentos numéricos. Os algoritmos foram rodados em Matlab 7.0, utilizando um computador Positivo Premium D7600.

Os parâmetros utilizados nos experimentos numéricos estão descritos na tabela 5.1, e sua terminologia segue as definições apresentados no Capítulo 4. O valor utilizado para a taxa de desconto foi de 0,3% ao mês. A taxa de demanda foi testada com valores entre 3 e 5 unidades por mês e, a taxa de produção, 5 unidades por mês. A tolerância considerada em todos os experimentos foi de 0,0001.

Quanto aos custos, foram utilizadas quatro funções para analisar os impactos dos custos de armazenagem. Uma das funções simula situações em o custo da falta sofre uma penalização maior que o custo do excesso. As outras três funções, apesar de penalizarem excesso e falta da mesma forma, possuem diferentes ordem de grandeza, sendo uma das funções quadrática.

Para a melhor compreensão e análise, gráficos representando cada uma das funções do custo de armazenagem utilizadas serão apresentados ainda neste item do trabalho.

Para o custo de aquisição foram utilizados valores entre 0 (zero) e 500 (quinhentos) reais por período. Durante o período de experimentação, observou-se que valores próximos a R\$500/mês inviabilizam a produção na maior parte dos experimentos, tornando demasiadamente cara a compra de novos produtos.

Finalmente, o custo de intervenção ou *setup*, cujo valor é cobrado por intervenção, foi testado de três formas diferentes. Nos experimentos iniciais, procurou-se focar no custo de armazenagem, portanto o valor utilizado foi zero.

No grupo seguinte de experimentos utilizou-se R\$10 por intervenção, porém somente para os casos em que a produção estivesse paralisada e a decisão fosse de intervir no modelo, iniciando a produção. De modo que o valor cobrado pela intervenção pode ser interpretado como o custo de pedido.

No último conjunto de experimentos utilizou-se um valor mais alto, R\$30 por intervenção, para qualquer intervenção. Desta forma, procurou-se ilustrar duas situações em que estes custos podem incorrer: custos de pedidos, nos casos em que a produção está paralisada e a decisão é de intervir iniciando a produção; e multas contratuais por paradas não acordadas no processo produtivo, nos casos em que se está produzindo e a decisão é de intervir no processo paralisando a produção.

Nos experimentos realizados, considerou-se que o espaço de dados é dado por $S = \{-200, \dots, 200\} \times [0, \infty)$. Além disso, em função do baixo giro e do alto custo de aquisição das peças de reposição, como exposto no item 4.2, o tamanho do lote utilizado em cada um dos casos é de 1 unidade.

Para fins de cálculo, considerou-se que nenhuma falha ocorre quando o estoque está em seu limiar inferior de -200 unidades. Por se tratar de um valor alto de déficit, isso não altera a política ótima na vizinhança do estoque nulo, que é de particular interesse no problema.

Adotou-se como $u = 1$ a representação da política de não intervenção para $z \in S'$, e intervenção para $z \in S''$; de forma análoga $u = 0$ representa a política de não intervenção para $z \in S'''$, e intervenção para $z \in S'$.

Tabela 5.1: Casos numéricos

Parâmetros	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D	Caso E	Caso F	Caso G	Caso H	Caso I
Taxa de desconto α	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Custo de produção (R\$/mês) β	0	600	50	0	5	5	5	5	5
Taxa de demanda (unid/mês) δ	5	4	4	5	4	4	4	4	4
Taxa de produção (unid/mês) γ	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Custo de amaz. (R\$/mês) $L(\eta)$	-175 η se $\eta \leq 0$ 87,5 η se $\eta > 0$	100 η	η^2	-175 η se $\eta \leq 0$ 87,5 η se $\eta > 0$	10 η	η^2	-175 η se $\eta \leq 0$ 87,5 η se $\eta > 0$	10 η	η^2
Custo de setup (R\$/interv) $g(\eta)$	0	0	0	10 se $z \in S'$ 0 se $z \in S''$	10 se $z \in S'$ 0 se $z \in S''$	10 se $z \in S'$ 0 se $z \in S''$	30	30	30
Tolerância (tol)	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04

Para a melhor compreensão e análise, as funções do custo de armazenagem utilizadas encontram-se a seguir:

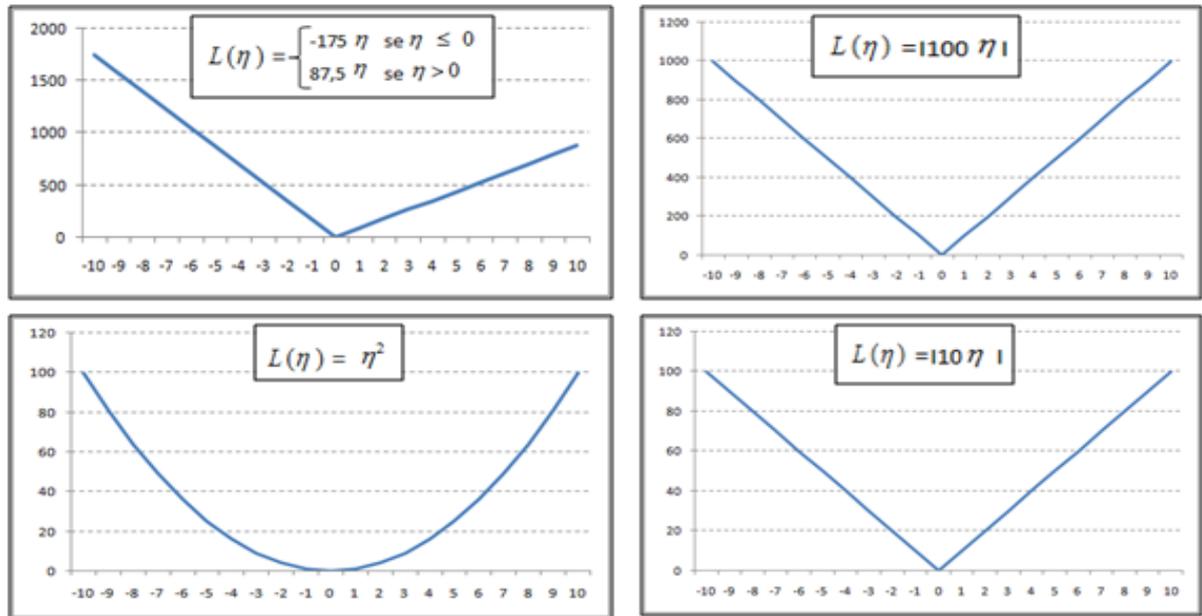


Figura 5.1: Funções do custo de armazenagem

5.2 Resultados

A seguir encontram-se os principais resultados que resumem a política de intervenção ótima decorrente da experimentação dos dados apresentados na tabela 5.1. As figuras 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10 apresentam as políticas de controle ótimas obtidas para os casos A, B, C, D, E, F, G, H e I respectivamente.

Em todas as figuras, o eixo horizontal traz as quantidades (η) em estoque e a política que deve ser adotada para este nível de estoque. Mostra-se o controle u nos subespaços $S_0 = S''$ (paralisação) e $S_1 = S'$ (produção).

A política ótima representada deve ser compreendida da seguinte forma: o eixo horizontal superior, em que $u=1$, representa um ambiente de produção, e neste caso deve-se adotar uma política de não intervenção caso já se esteja produzindo ($z \in S_1$), ou intervenção caso se esteja paralisado ($z \in S_0$).

Já o eixo horizontal inferior, em que $u=0$, representa um ambiente de paralisação. Neste caso deve-se adotar uma política de não intervenção caso já se esteja paralisado ($z \in S_0$) ou intervenção caso se esteja produzindo ($z \in S_1$).

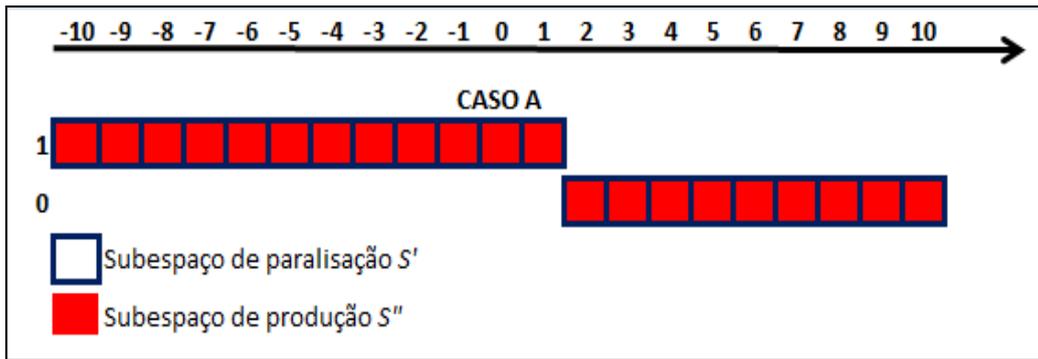


Figura 5.2: Caso A

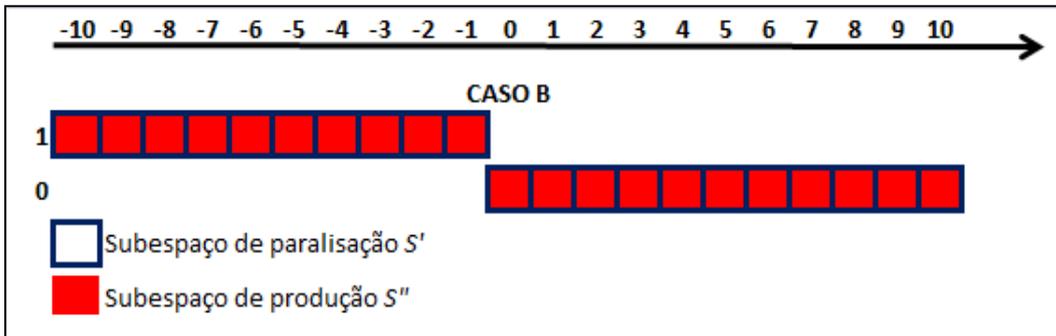


Figura 5.3: Caso B

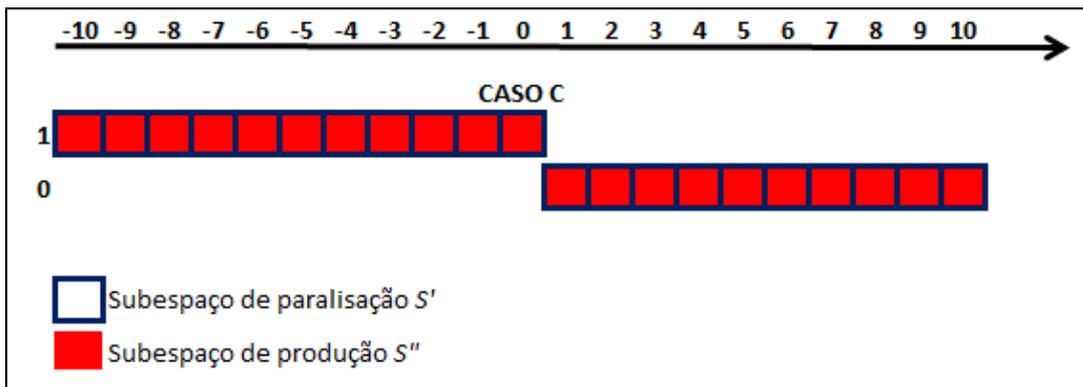


Figura 5.4: Caso C

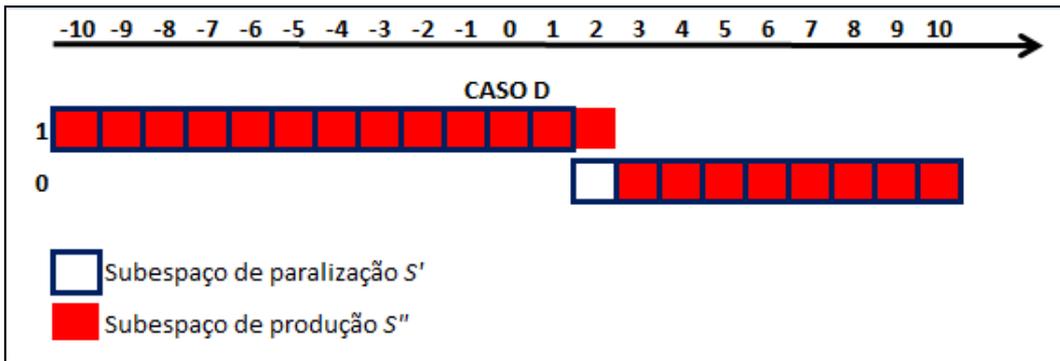


Figura 5.5: Caso D

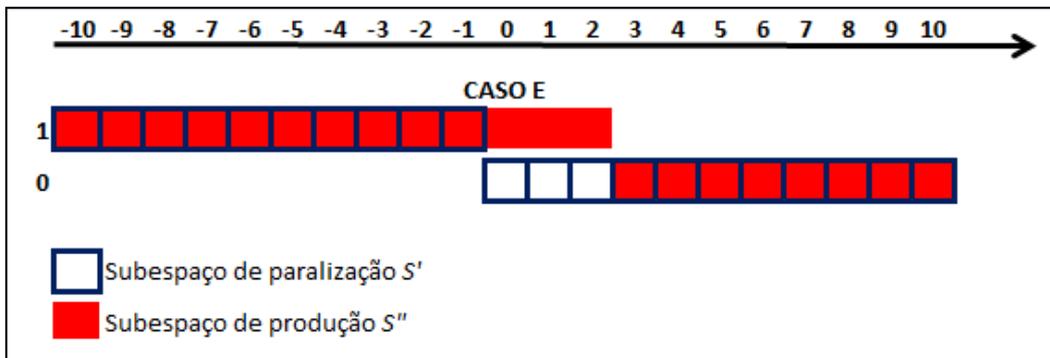


Figura 5.6: Caso E

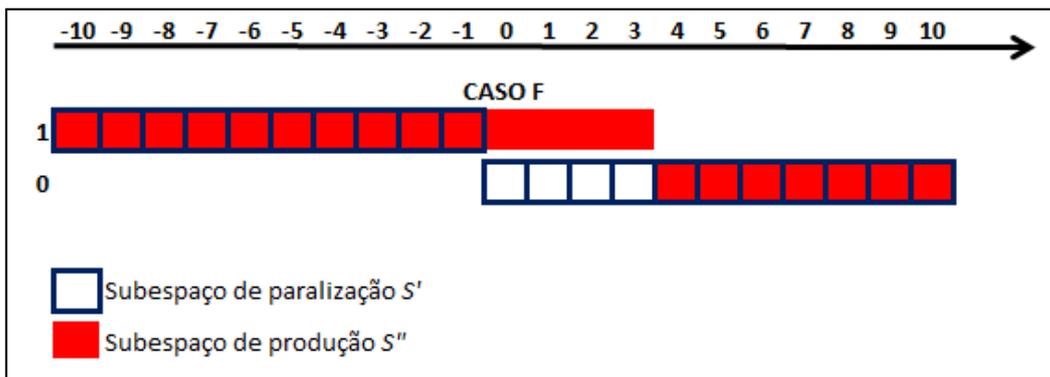


Figura 5.7: Caso F

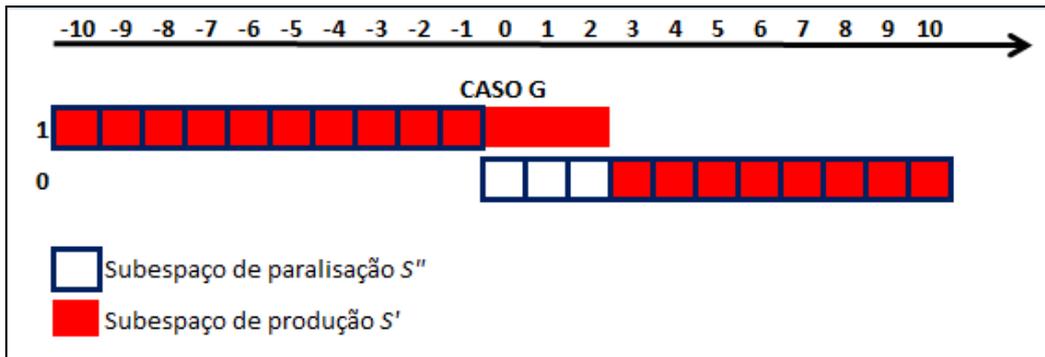


Figura 5.8: Caso G

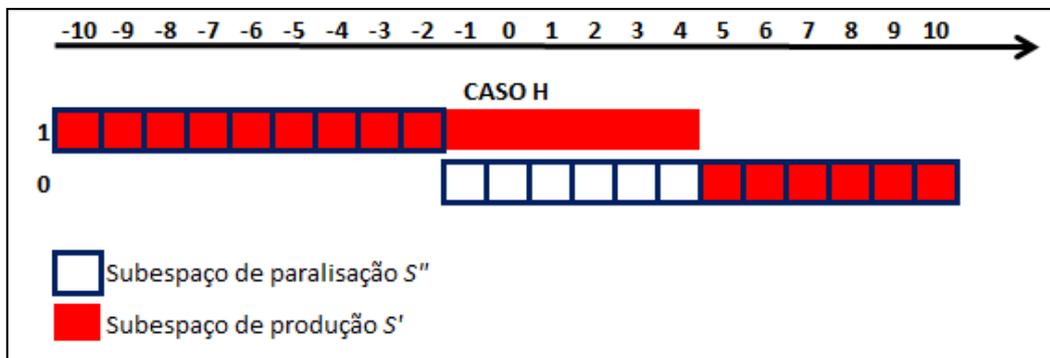


Figura 5.9: Caso H

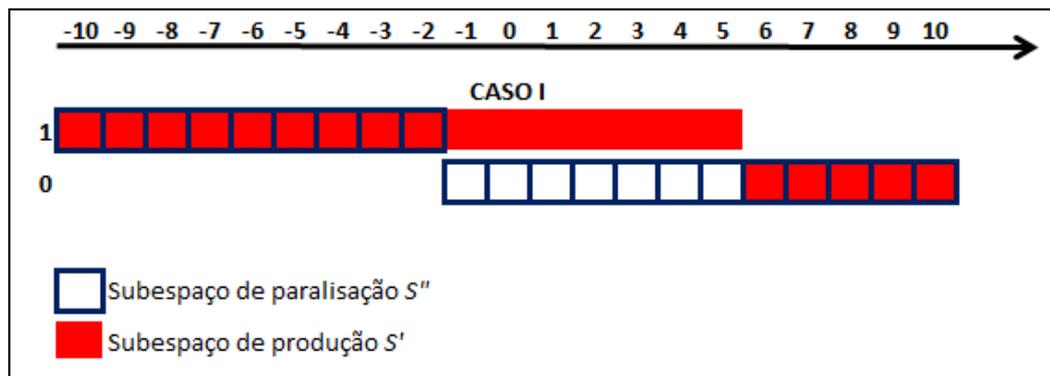


Figura 5.10: Caso I

5.3 Análise dos resultados

Nos três primeiros casos, o modelo foi testado para situações em que não existe penalidade pela troca de subespaços, ou seja, para casos em que a função de intervenção assume o valor zero.

Observa-se que nesses casos (*A*, *B* e *C*), não havendo um custo que penalize a paralisação ou ativação da produção, existe um único nível de estoque em que ocorre a transferência de S_0 para S_1 e de S_1 para S_0 .

Como resultado, a mesma política é indicada para os dois subconjuntos, ou seja, a política ótima para estes casos consiste em sempre permanecer em S_1 abaixo de um certo nível de estoque calculado, e sempre permanecer S_0 acima deste mesmo valor.

No Caso *A*, pode-se observar no gráfico que para estoques iguais ou inferiores a uma unidade deve-se sempre permanecer ou migrar para o subespaço de produção. Já para estoques iguais ou superiores a duas unidades deve-se permanecer ou migrar para o subespaço de paralisação. Já no Caso *B*, o subespaço de produção é o caminho para estoques inferiores a uma unidade negativa (déficit de um item) e o de paralisação para estoques superiores a zero unidade. Finalmente, no último dos três casos nos quais não é considerado o custo de *setup*, o Caso *C*, a produção é indicada para níveis de estoques inferiores a zero unidade e a paralisação para casos em que este valor seja superior a uma unidade. Essa diferença no momento em que ocorre a transição, observada para os Casos *A*, *B* e *C*, é derivada de outros parâmetros testados, analisados a seguir.

No Caso *A*, utilizou-se a mesma taxa de demanda e de produção; o custo de produção foi zerado e a função do custo de armazenagem empregada é mais onerosa para a falta do que para a manutenção de estoques. Portanto, para os casos em que o estoque assume o valor de uma unidade deve-se manter ou migrar para o subespaço de produção, evitando assim a ruptura de estoques.

Já para o Caso *B*, foi empregada uma taxa de demanda levemente diferente da taxa de produção; foi considerado um custo de produção expressivo e a função do custo de armazenagem empregada, nesse caso, não diferencia falta e excesso, penalizando-os na mesma proporção em relação à quantidade estocada. Desta forma, havendo um custo

de produção considerável, opta-se por deixar faltar uma unidade quando o estoque está zerado, e só então iniciar a produção.

Para o Caso *C* a função do custo de armazenagem empregada considera o estoque ao quadrado; e o custo de produção é bem conservador se comparado ao valor empregado no Caso *B*. A alteração no custo de produção foi significativa pois, com o emprego desta função quadrática para o custo de armazenagem, valores maiores de custo de produção paralisavam a produção para qualquer nível de estoque.

Nos Casos *D*, *E* e *F*, o modelo foi testado com penalidade apenas para intervenções que iniciem o processo de produção, ou seja, casos em que o sistema esteja paralisado e decida-se pela troca de subespaço. Já os estados em que o sistema esteja produzindo e decida-se por intervir parando a produção, estes continuaram sem penalização.

Isso faz bastante sentido no problema estudo, uma vez que é mais comum a existência de um custo de pedido associado à solicitação de uma nova ordem, mas não é tão comum uma penalidade por não se efetuar um novo pedido em seguida à entrega de um item previamente solicitado.

Como esperado, nos três casos analisados o resultado mostrou diferentes políticas de intervenção para os dois subespaços.

Comparando-se os gráficos 5.2 e 5.5 (respectivamente Casos *A* e *D*), observa-se que no Caso *A* pode-se adotar uma mesma política para os dois subespaços, já para o Caso *D*, em que a única alteração em relação aos parâmetros do Caso *A* é a adoção de um custo de intervenção para o início da produção, como explicado acima, é necessário adotar políticas diferentes.

A política ótima resultante, exposta no gráfico 5.5, indica que, para o subconjunto de paralisação, deve-se intervir no processo para estoques iguais ou inferiores a uma unidade, migrando para o subespaço de produção. Já para estoques iguais ou superiores a 2 unidades deve-se permanecer no subespaço de paralisação.

No subconjunto de produção, para estoques iguais ou inferiores a duas unidades deve-se permanecer no subconjunto de produção. Já para estoques iguais ou superiores a três unidades deve-se intervir, mudando para o subespaço de paralisação. A solução

encontrada confirma que o custo de intervenção influenciou no momento de intervenção no subespaço de produção, adiando a decisão de intervenção.

Embora haja algumas variações entre os parâmetros utilizados, a mesma comparação pode ser feita entre os gráficos 5.3 e 5.6 (Casos *B* e *E*), e 5.4 e 5.7 (Casos *C* e *F*).

Finalmente, para os Casos *G*, *H* e *I*, o modelo é testado para situações em que sempre exista penalidade pela troca de subespaços. Pode-se observar pelos gráficos 5.8, 5.9 e 5.10 que nestes casos, em função do alto custo de intervenção simulado, as decisões de intervir são adiadas em ambos os subespaços, o que resulta em uma superfície de comutação, na qual a melhor alternativa é continuar fazendo pedidos, se estiver produzindo, ou continuar paralisado, caso contrário.

Capítulo 6

Conclusões

Esse trabalho propôs uma nova metodologia para a solução de problemas de gerenciamento de estoques de peças de reposição de baixíssimo giro, para os quais os métodos tradicionais não fornecem amparo adequado na tomada de decisões.

O modelo apresentado, desenvolvido por meio de uma classe de processos markovianos denominada Processos Markovianos Determinísticos por Partes, já havia sido previamente aplicado com sucesso em problemas de produção (*e.g.*, ARRUDA, 2002).

O emprego da metodologia para estoque de reposição de baixíssimo giro mostrou-se bastante adequado, considerando tanto os saltos aleatórios relativos à chegada de demanda ou de itens previamente solicitados junto ao fornecedor, como também um custo de *setup* que, no modelo considerado, representou o custo de pedido do processo.

O horizonte de tempo infinito, inerente ao processo envolvido na metodologia empregada, é uma inovação na área, por isso não é usual a realização de comparações com os métodos tradicionais para descrever qual recai no menor custo.

Como visto, autores que se dedicaram ao tema, como Tavares e Almeida (1983), apresentaram soluções nas quais essa problemática se restringe em decidir entre manter ou não uma única peça em estoque, com modelos de controle do estoque binários baseados na análise dos custos totais.

Porém, a adoção de um modelo binário restringe as possibilidades e possíveis configurações do estoque dessas peças. E, como foi comprovado por experimentos, em algumas situações esta não é a alternativa mais econômica.

Da mesma forma, em algumas situações nos deparamos com estoques iniciais existentes diferentes de 0 e I , e novamente encontra-se uma dificuldade na adoção deste modelo.

Ademais, para os casos em que é vantajoso de alguma forma manter estoques ou déficits maiores, o modelo binário tende a ser sub-ótimo, uma vez que essa possibilidade não é contemplada pelo referido modelo. Portanto, o presente trabalho propõe um método para obter o custo ótimo em longo prazo, assim como a estratégia de estoques associada a esse custo.

Ainda em relação aos custos utilizados, outra vantagem que a modelagem apresenta em relação aos modelos disponíveis é a obtenção de estratégias de custo ótimo em problemas de estoques de baixo giro para as funções de custo convexas, e não somente lineares. Essa é também uma inovação do presente trabalho.

As soluções, obtidas através de propriedades e operadores de programação dinâmica, tornam mais simples o processo de busca de solução para problemas de um único item estocado. Em que pese não ter sido esse o objetivo do trabalho, é possível também a utilização da metodologia proposta para os problemas de múltiplos itens.

Assim, a dissertação contribui com uma modelagem que é uma novidade em termos de gerenciamento de estoque de baixíssimo giro, e que permite analisar não apenas o nível de fornecimento, como também obter estratégias ótimas em termos de custo de operação em longo prazo.

Além disso, a solução proposta é bastante simples para o caso de um único item, uma vez que o modelo resulta em um algoritmo de fácil implementação e em políticas de reposição simples e intuitivas. Tudo isto contribui ainda mais para sua aplicação em problemas como o estudado.

De tudo o que foi visto e analisado, pode-se concluir que a metodologia se mostrou prática, objetiva e eficaz, e resultou em políticas de gestão de estoques muito simples e de fácil implementação, o que pode ser considerado a maior virtude desse trabalho.

Através da abordagem proposta pode-se evitar custos desnecessários com falta e excessos de estoques, sendo esse o maior desafio da administração de estoques.

Desta forma, uma vez empregado, o presente estudo pode beneficiar as diversas empresas que enfrentam diariamente o dilema de manter elevados custos de estoque de itens de reposição com baixíssimo consumo ou correr o risco de parada do processo produtivo. Isto pode representar uma grande oportunidade de aumento da rentabilidade das empresas, através da otimização da gestão dos estoques.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARRUDA, E. F. **Investimento e produção de múltiplos itens em presença de incertezas**. Dissertação de mestrado: UNICAMP, 2002.
- BAI, L. **Inventory control and demand distribution characterization**. School of industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology, 2005.
- BALLOU, R. H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos**. 3ª Edição. São Paulo: Bookman, 2003.
- BRAGA, V. M. A **Logística como diferencial na indústria do petróleo: caso do downstream brasileiro**. Apostila do curso de gestão de petróleo e gás, Universidade Estácio de Sá, 2004.
- BOTTER, R.; FORTUIN, L. Stocking strategy for service parts: a case study. **International Journal of Operations & Production Management**, Bingley, UK, v. 20, n. 6, p. 656-674; 2000.
- BOYLAN , J. E.; SYNTETOS , A. A.; KARAKOSTAS , G. C. Classification for forecasting and stock control: a case study. **Journal of the Operational Research Society**, v. 59, p. 473-481; 2008.
- CHASE J. M., WILSON W. G., RICHARDS S. A. Foraging trade-offs and resource patchiness: theory and experiments with a freshwater snail community. **Ecology Letters**, v 4, p. 304-312, 2001.
- CHOPRA, S.; MEINDL, P. **Supply chain management: strategy, planning and operations**. Nova Iorque: Prentice Hall, 2003.
- COHEN, M. A.; LEE , H. L. Out of Touch with Customer Needs? Spare Parts and After Sales Service. **Sloan Management. Review**, v. 31-2, p. 55-66, 1990.
- COHEN, M. A.; ZHENG, Y. S.; AGRAWAL, V. Service parts logistics: a benchmark analysis. **IIE Transactions**, v. 29, p. 627-639, 1997.
- CORRÊA, H.; DIAS, G. De volta a gestão de estoques: as técnicas estão sendo usadas pelas empresas? In: **Simpósio de Administração da Produção, Logística e Operações Industriais**, São Paulo, 1998.

- CORRÊA, H. L.. **Administração da Produção e Operações: Manufatura e Serviços**. 1ª ed. São Paulo: Atlas, 2004.
- CORRÊA, H. L.; CORRÊA, C. A. **Administração de produção e de operações: manufatura e serviços: uma abordagem estratégica**. São Paulo: Atlas, 2005.
- DAVIS, M.H.A. **Markov Models and Optimizations**, London: Chapman and Hall, 1993.
- DEKKER, R.; KLEIJN, M. J.; DE ROOIJ, P. J. A spare parts stocking policy based on equipment criticality. **International Journal of Production Economics**, v. 56-57, p. 69-77, 1998.
- DROHOMERETSKI, E.; FALCI, F. S. M. G.; FAVARETTO, F. Modelo de gestão de estoques para peças de reposição: o caso de uma indústria de equipamentos para refrigeração da grande Curitiba. In: **Anais V EMEPRO**. Viçosa, MG. 2009.
- EAVES, A. H. C.; KINGSMAN, B. G. Forecasting for the ordering and stock-holding of spare parts. **Journal of the Operational Research Society**, v. 50, p. 431-437, 2004.
- FIGUEIREDO, K. F.; FLEURY, P. F.; WANKE, P. **Logística e gerenciamento da cadeia de suprimentos**. São Paulo: Atlas, 2003.
- GARCIA, E. S.; REIS, L. M. T. V.; MACHADO, L. R.; FERREIRA FILHO, V. J. M. **Gestão de estoques: otimizando a logística e a cadeia de suprimentos**. Rio de Janeiro: E-papers. Servicos Editoriais Ltda., 2006. Disponível em <"<http://www.books.google.com>>. Acesso em 23 de março 2012.
- GARDNER, E. S. Inventory Theory and The Gods of Olympus. **Interfaces**, v. 10, n. 4, p 41-45, 1980.
- GOMES, A. V. P.; WANKE, P. Modelagem da gestão de estoques de peças de reposição através de cadeias de Markov. **Gestão & Produção**, v. 15-1, p. 57-72, 2008.
- HILL, R. M.; OMAR, M.; SMITH, D. K. Stock replenishment policies for a stochastic exponentially-declining demand process. **European Journal of Operational Research**, v. 116, p. 374-388, 1999.

- HUISKONEN, J. Maintenance spare parts logistics: Special characteristics and strategic choices. **International Journal of Production Economics**, v. 71, p. 125-133, 2001.
- KEATON, M. Using the Gamma distribution to model demand when lead time is random. **Journal of Business Logistics**, v. 16, n. 1, p. 107-131, 1995.
- KIM, J.S.; SHIN, K.C.; YU, H.K. Optimal algorithm to determine the spare inventory level for a repairable-item inventory system. **Computers & Operations Research**, Oxford, UK, v. 23, n. 3, p. 289-297, 1996.
- KREVER, M. et al. Inventory control based on advanced probability theory, an application. **European Journal of Operational Research**, v. 162, p. 342-358, 2005.
- KUMAR, S. **Parts Management Models and Applications**. New York: Springer, p 222, 2005..
- LEE, H.L.; NAHMIAS, S. Single-Product, Single-Location Models, in: **Logistics of Production and Inventory**, editado por Graves, S.C., Rinnooy Kan, A.H.G. and Zipkin, P.H., North-Holland, Amsterdam, 1993.
- LOPES, R. D. **Previsão de autopeças: Estudo de caso em uma concessionária de veículos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) Florianópolis: UFSC, p 107, 2002.
- LOVE, S. **Inventory Control**. New York: McGraw-Hill, p 273, 1979.
- MACHLINE, C. Compras, Estoque e inflação, Rio de Janeiro, 1981. **Revista de Administração de Empresas**, v. 21, n. 2, 1981.
- MAKRIDAKIS, S.; Wheelwright, S. e Hyndman, R.J. **Forecasting Methods and Applications**. 3ª ed. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- MALAN, P. A maioria do Real e os próximos 18 anos. **Estadão Online**, 2012. Disponível em < "http://www.estadao.com.br"> Acesso em 08 de julho 2012.
- MARTINS, P. G.; Alt, P. R. C. **Administração de Materiais e Recursos Patrimoniais**. 2.ed. São Paulo: Saraiva, 2006.

- MONKS, J. G. **Administração da Produção**. São Paulo: McGraw Hill, 1989.
- MOREIRA, D. **Administração da Produção e Operações**. 2ª ed. São Paulo: Pioneira, 1996.
- MUCKSTADT, J. A. **Analysis and Algorithms for Service Parts Supply Chains**. New York: Springer, p 277, 2004.
- NAMIT, K.; CHEN, J. Solutions to the inventory model for gamma leadtime demand. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 29, n. 2, p. 138-154, 1999.
- PALMISANO, A.; MAÑAS, A. V.; MODIA, E. C.; MACHADO, M. C. **Gestão da qualidade: tópicos avançados**. São Paulo: Pioneira Thomson, 2004. 243 p.
- POPP, W. Simple and Combined Inventory Policies, Production to Stock or to Order. **Management Science**, v. 11-9, p. 868-873, 1965.
- PORRAS, E.; DEKKER, R. An inventory control system for spare parts at a refinery: An empirical comparison of different re-order point methods. **European Journal of Operational Research**, v. 184, n. 1, p. 101-132, 2008.
- RIBEIRO, P.; SILVA, L.; BENVENUTO, S. O uso de tecnologia da informação em serviços de armazenagem. **Produção**, v.16, n.3, p. 526-537, 2006.
- ROSA, H.; MAYERLE, S. F.; GONÇALVES, M. B. Controle de estoque por revisão contínua e revisão periódica: uma análise comparativa utilizando simulação. **Produção**, v. 20, n. 4, dez. 2010.
- REGO, J. **A lacuna entre a teoria de gestão de estoques e a prática empresarial na reposição de peças em concessionárias de automóveis**. Dissertação (Mestrado em Administração). Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, USP, 2006.
- REGO, J. R.; MESQUITA, M. A. Controle de estoque de peças de reposição em local único: uma revisão da literatura. **Produção**, v. 21, n. 4, p. 645-666, 2011.

- TAVARES, V.; ALMEIDA, L.T. A binary decision model for the stock control of very slow moving items. **Journal of Operational Research Society**, v. 34-3, p. 249-252, 1983.
- TYWORTH, J.; GANESHAN, R. A note on solutions to the Q_r inventory model for gamma lead time demand. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, 30 (6), p. 534-539, 2000.
- SANDVIG, J. C.; ALLAIRE, J. J. Vitalizing a service parts inventory. **Production and Inventory Management Journal**, Alexandria, US, v. 39, n. 1, p. 67-71, 1998.
- SHAPIRO, J. F. **Modeling the Supply Chain**. Pacific Grove, CA: Duxbury, 2001.
- SHERBROOKE, C.C. Metric: a multi-echelon technique for recoverable item control. **Operations Research**, Hanover, US, v. 16, p. 122-141, 1968.
- SHIBUYA, T.; DOHI, T.; OSAKI, S. Optimal continuous review policies for spare part provisioning with random lead times. **International Journal of Production Economics**, v. 55, n. 3, p. 257-271, 1998.
- SILVA, G. L. C. **Modelo de estoque para peças de reposição sujeitas à demanda intermitente e lead-time estocástico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Escola de Engenharia, UFMG, 2009.
- SILVER, E. A.; PYKE, D. F; PETERSON, R. **Inventory management and production planning and scheduling**. 3ª ed. New York: John Wiley & Sons, p.754, 1998.
- SLACK, N.; CHAMBERS, S. e JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. 3ª ed. São Paulo: Atlas, 2009.
- SMIDT-DESTOMBES, K.; HEIJDEN, M. C.; HARTEN, A. On the interaction between maintenance, spare part inventories and repair capacity for a k-out-of-N system with wear-out. **European Journal of Operational Research**, Oxford, UK, v. 174, p. 182-200, 2006.
- SYNTETOS, A. A.; BOYLAN, J. E.; CROSTON, J. D. On the categorization of demand patterns. **Journal of Operational Research Society**, v. 56, p. 495-503, 2005.

- VOLMANN, T. E., et al. **Sistemas de planejamento e controle da produção para o gerenciamento de cadeias de suprimento**, 5ª ed, Porto Alegre: Bookman, 2006.
- YEH, Q.-J. A practical implementation of gamma distribution to the reordering decision of an inventory control problem. **Production and Inventory Management Journal**, v. 37, n. 8, p. 51-57, 1997.
- WASSERMAN, L. **All of Statistics: A Concise Course in Statistical Inference**. New York: Springer, 2004.
- WANKE, P. **Gestão de estoques de peças de reposição de baixíssimo giro**. [Rio de Janeiro], 2002. Disponível em: <<http://www.ilos.com.br>>. Acesso em 25 de maio 2011.
- WANKE, P. **Gestão de estoques na cadeia de suprimento**. São Paulo: Atlas, 2003.
- WANKE, P. Metodologia para gestão de estoques de peças de reposição: um estudo de caso em empresa brasileira. **Revista Tecnológica**, p. 60-65, 2005.
- WANKE, P. **Gestão de estoques na cadeia de suprimentos: decisões e modelos quantitativos**. 3ª ed. São Paulo: Atlas, p. 367. 2011. (Coleção COPPEAD de Administração).
- WANKE, P. Quadro conceitual para gestão de estoques: enfoque nos itens. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 19, n. 4, p. 677-687, 2012.

Apêndice A

Resultados auxiliares do Capítulo 4

A.1 Lema 3.1 (ARRUDA, 2002): Assuma A_1 e os operadores definidos a seguir.

Designa-se por $B(S)$ o conjunto das funções limitadas em S . Assume-se, para o problema estudado, que a seguinte hipótese é satisfeita:

A_1 : g e $\psi \in B(S)$, $\psi(z) = \psi(\eta)$, $g(z_{\tau^-}, z_{\tau}) = g(\eta)$. Ou seja, a função ψ depende do nível de estoque η , mas não da variável de progressão ξ . Já a função g depende do nível de estoque e dos subconjuntos em que o processo se encontra no instante do salto e no instante imediatamente anterior ao salto.

Operadores:

$$R_t[\phi](\eta) := E_z \left\{ \int_0^{t \wedge T_1} e^{-\alpha s} h(\eta_s) ds + e^{-\alpha T_1} \phi(\eta_{T_1}) \mathbf{I}_{\{T_1 < t\}} \right. \\ \left. + e^{-\alpha t} (\psi(\eta) + g(\eta)) \mathbf{I}_{\{t \leq T_1\}} \right\} \quad (\text{A.1})$$

$$R_2[\phi](\eta) := E_z \left\{ \int_0^{T_1} e^{-\alpha s} h(\eta_s) ds + e^{-\alpha T_1} \phi(\eta_{T_1}) \right\} \quad (\text{A.2})$$

onde $\phi(\eta_{T_1})$ está associado ao primeiro salto por conclusão ou demanda. Então, $R_t[\phi](\eta)$ e $R_2[\phi](\eta)$, definidos acima satisfazem às seguintes equações:

$$R_t[\phi](\eta) := R_2[\phi](\eta)(1 - e^{-\hat{\lambda}t}) + e^{-\hat{\lambda}t} \{\psi(\eta) + g(\eta)\} \quad (\text{A.3})$$

$$R_2[\phi](\eta) := \frac{1}{\hat{\lambda}} \{h(\eta) + \lambda Q[\phi](\eta)\} \quad (\text{A.4})$$

onde $\hat{\lambda} = \alpha + \lambda_t$

Prova:

Desenvolvendo o primeiro termo da equação (A.1) e lembrando que T_1 apresenta distribuição exponencial, tem-se:

$$E_z \left\{ \int_0^{t \wedge T_1} e^{-\alpha s} h(\eta_s) ds \right\} = \int_0^t \lambda_i e^{-\lambda_i s} \left(\int_0^s e^{-\alpha r} h(\eta) dr \right) ds + e^{-\lambda_i t} \left(\int_0^t e^{-\alpha r} h(\eta) dr \right) \quad (A.5)$$

lembrando que $y = (\eta)$ permanece constante no horizonte do primeiro salto. Da primeira parcela da equação (A.5), tem-se:

$$\int_0^t \lambda e^{-\lambda s} \left(\int_0^s e^{-\alpha r} h(\eta) dr \right) ds = \int_0^t \lambda e^{-\lambda s} \left\{ \int_0^s \mathbf{I}_{\{r \leq s\}} e^{-\alpha r} h(\eta) dr \right\}$$

Assim, os limites de integração podem ser alterados para a forma:

$$\int_0^t \int_r^t \lambda_i e^{-\lambda_i s} ds \{ e^{-\alpha r} h(\eta) dr \}$$

Integrando a parcela relativa a λ , chega-se a seguinte expressão:

$$\begin{aligned} &= \int_0^t -e^{-\lambda s} \Big|_r^t e^{-\alpha r} h(\eta) dr \\ &= \int_0^t (e^{-\lambda s} - e^{-\lambda t}) e^{-\alpha r} h(\eta) dr \end{aligned}$$

Desse modo, a partir da equação (A.5), chega-se ao seguinte resultado:

$$E_z \left\{ \int_0^{t \wedge T_1} e^{-\alpha s} h(\eta_s) ds \right\} = \frac{1}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) (\eta) \quad (A.6)$$

onde $\hat{\lambda}_i = \alpha + \lambda_i$. Do segundo termo da equação (A.5) deriva-se a seguinte expressão:

$$\begin{aligned} E_z \{ e^{-\alpha T_1} \phi(\eta_{T_1}) \mathbf{I}_{\{T_1 \leq s\}} \} &= E_z \{ e^{-\alpha T_1} Q[\phi](\eta_{T_1}) \mathbf{I}_{\{T_1 \leq s\}} \} \\ &= \int_0^t \lambda_i e^{-\lambda_i s} Q[\phi](\eta) ds = (1 - e^{-\lambda t}) Q[\phi](\eta) \end{aligned} \quad (A.7)$$

Desenvolvendo a terceira parcela da equação (A.1), tem-se:

$$E_z \{ e^{-\alpha t} (\psi(\eta) + g(\eta)) \mathbf{I}_{\{t \leq T_1\}} \} = E_z \{ e^{-\alpha t} \mathbf{I}_{\{t \leq T_1\}} \} (\psi(\eta) + g(\eta))$$

$$= e^{-\lambda t} (\bar{\psi}(\eta) + g(\eta)) \quad (\text{A.8})$$

Substituindo (A.6), (A.7) e (A.8) em (A.5), conclui-se que:

$$R[\phi, \omega](\eta) = \int_0^t e^{-\lambda s} \{h(\eta) + \lambda Q[\phi](\eta) ds + e^{-\lambda t} \{\bar{\psi}(\eta) + g(\eta)\}$$

Resolvendo a integral acima chega-se ao resultado expresso em (A.3). Fazendo $t \rightarrow \infty$ na equação (A.3), chega-se ao resultado expresso em (A.4).

A.2 Lema 3.2 (ARRUDA, 2002): Assuma A_1 . Então, $R[\phi, \psi]$, definido como:

$$R[\phi](\eta) = R_1[\phi, \psi](\eta) \wedge R_2[\phi](\eta)$$

satisfaz a seguinte equação:

$$R[\phi, \omega](\eta) = \{\psi(\eta) + g(\eta)\} \wedge R_2[\phi](\eta), \quad z \in S \quad (\text{A.9})$$

Prova:

A combinação convexa expressa na equação (A.3) assume seu valor mínimo para $t=0$ ou $t \rightarrow \infty$. Logo, comparando-se as equações (A.3) e (A.4) obtém-se o resultado expresso em (A.9).

Dadas funções ϕ e $\psi \in B(S)$, a expressão algébrica em (A.9) determina unicamente o valor do operador $R[\phi, \psi]$.

A.3 Lema 3.4 (ARRUDA, 2002): $P: B(S) \rightarrow B(S)$ é um operador contrativo.

Prova: Define-se:

$$\rho = \frac{\lambda}{\hat{\lambda}}$$

e note que $0 < \rho < 1$, tendo em vista que $\hat{\lambda} = \alpha + \lambda$.

De acordo com o Lema 3.2, o operador $P[\phi]$ pode ser expresso pela seguinte relação:

$$P[\phi](\eta) := \{R_2[\phi](\eta) + g(\eta)\} \wedge R_2[\phi](\eta)$$

Assim, considerando o Lema 3.3, pode-se provar que $P[\phi]$ é um operador contrativo mostrando apenas que $R_2[\phi]$ é operador contrativo. Considera-se o seguinte desenvolvimento matemático:

$$R_2[\phi_0](\eta) - R_2[\phi_1](\eta) = \rho(\varphi[\phi_0](\eta) - \varphi[\phi_1](\eta))$$

portanto,

$$|R_2[\phi_0](\eta) - R_2[\phi_1](\eta)| \leq \rho \|\varphi[\phi_0] - \varphi[\phi_1]\|$$

assim,

$$\|R_2[\phi_0] - R_2[\phi_1]\| = \rho \|\phi_0 - \phi_1\|$$

Da relação acima, podemos concluir que $R_2[\phi]$ é um operador contrativo e a prova está concluída.

Apêndice B

Resultados auxiliares do Capítulo 5

B.1 Valores de V_1 obtidos nos experimentos realizados:

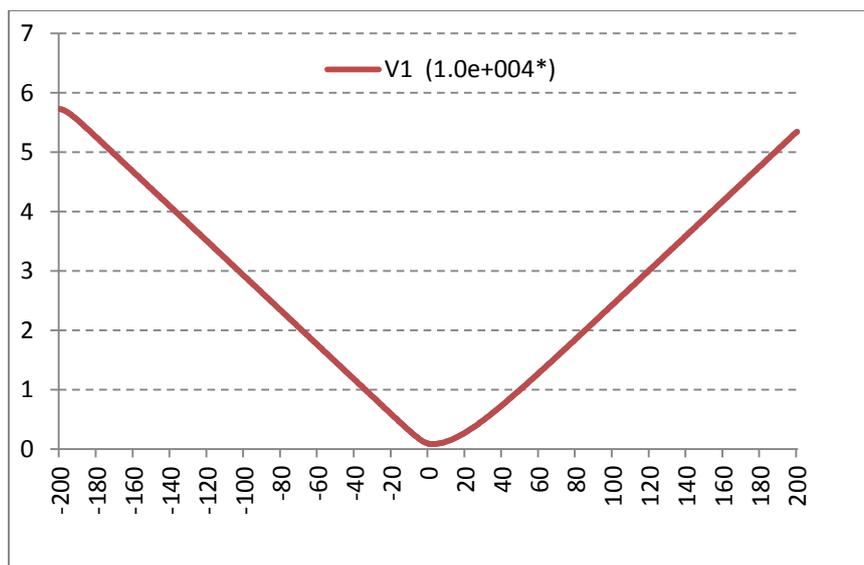


Gráfico B.1: Caso A

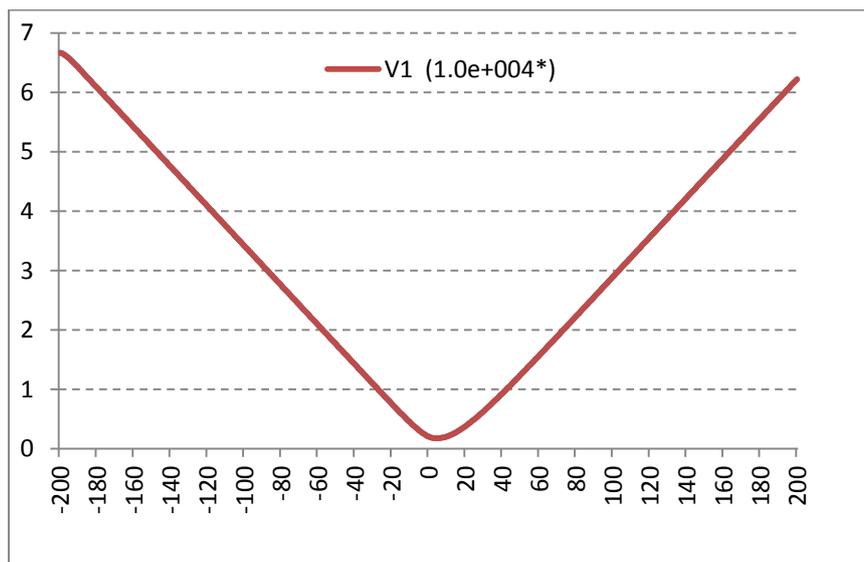


Gráfico B.2: Caso B

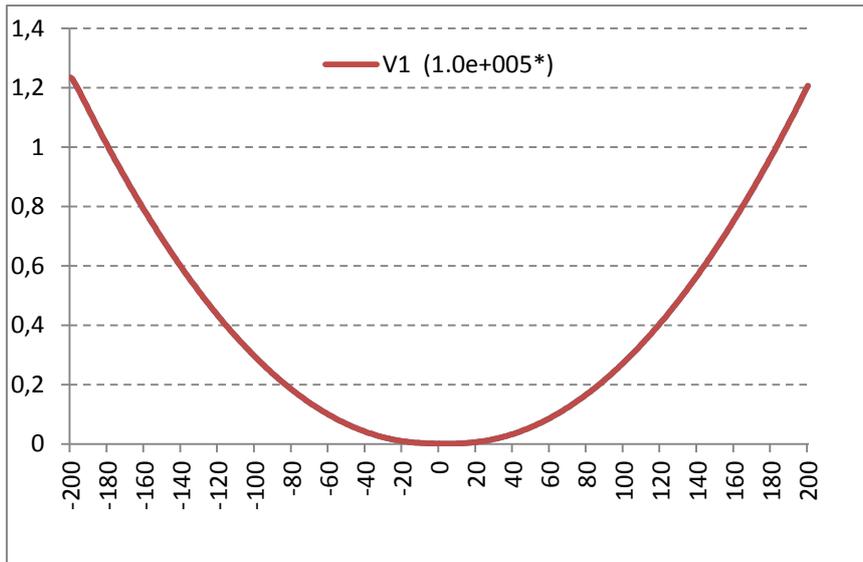


Gráfico B.3: Caso C

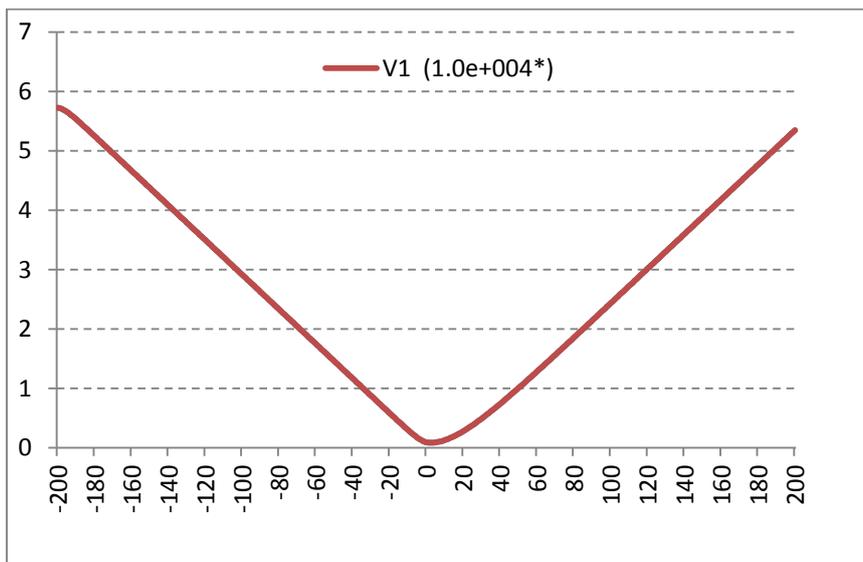


Gráfico B.4: Caso D

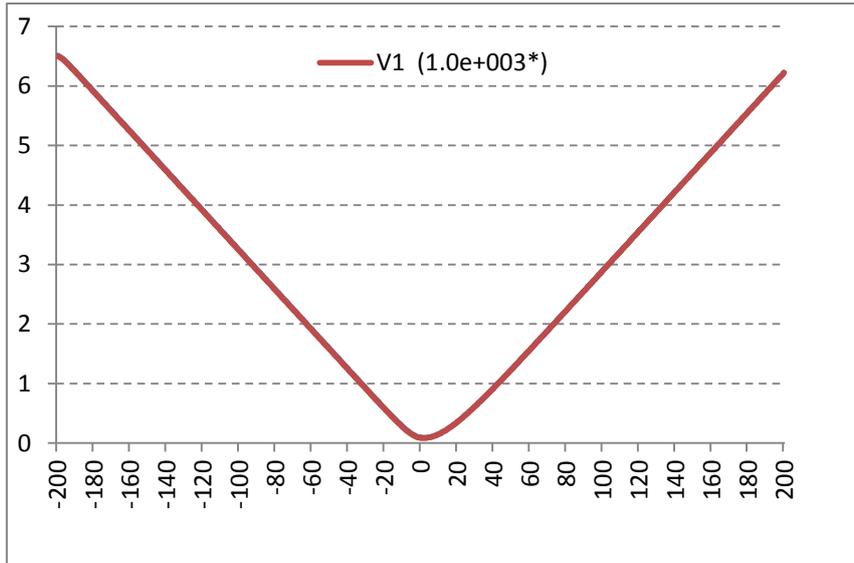


Gráfico B.5: Caso E

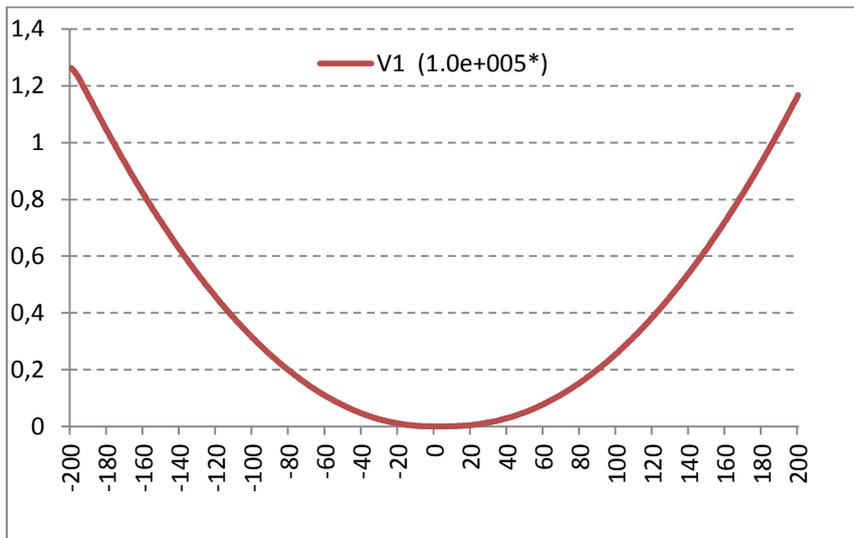


Gráfico B.6: Caso F

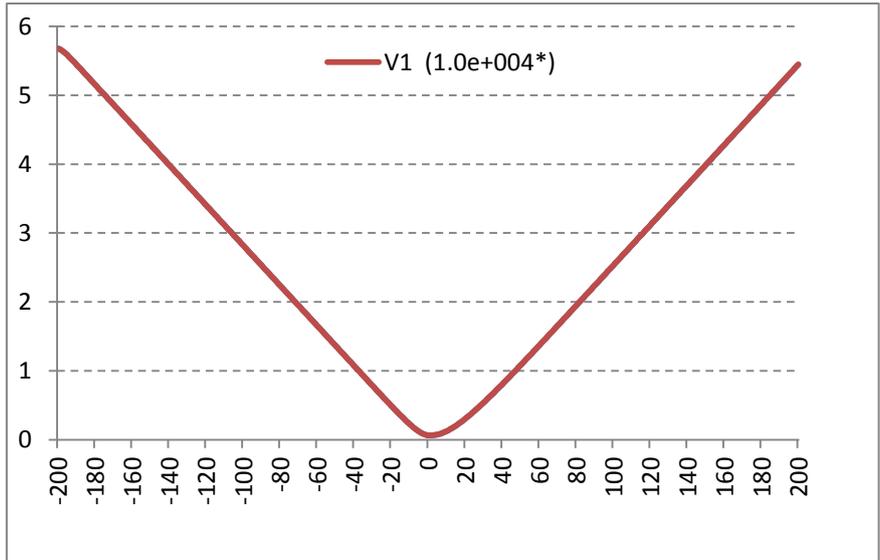


Gráfico B.7: Caso G

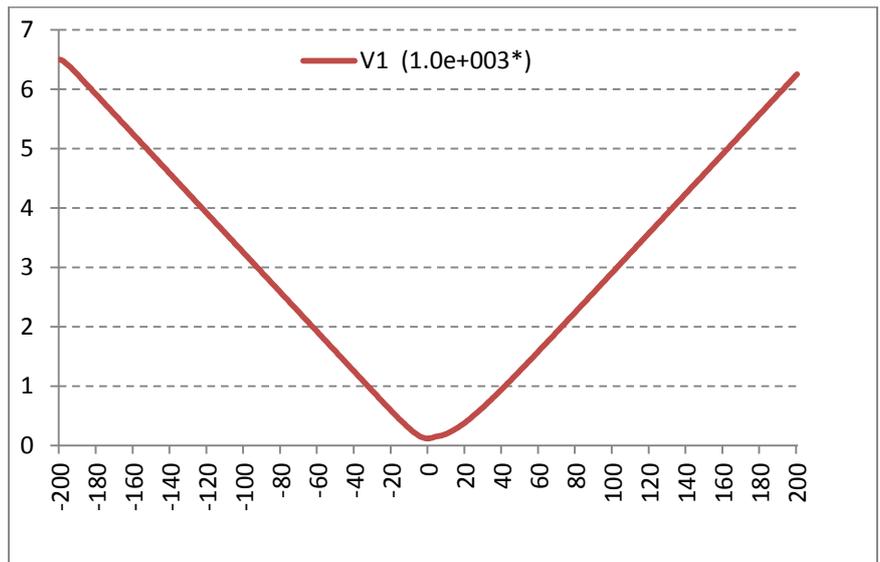


Gráfico B.8: Caso H

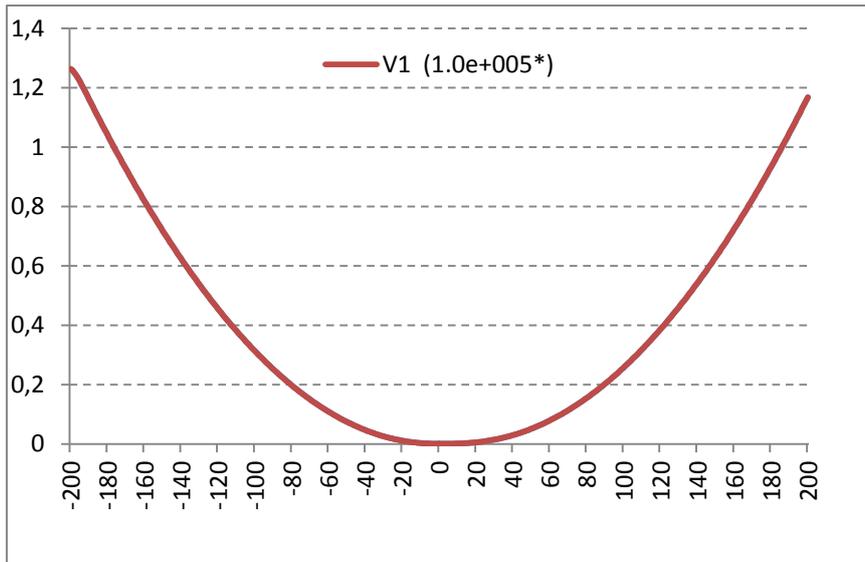


Gráfico B.9: Caso I