

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

TIAGO SANCHES KERNBICHLER

APLICAÇÃO DE MODELO DE REVISÃO PERIÓDICA MULTIPERÍODO COMO
POLÍTICA DE PLANEJAMENTO DE ESTOQUES NO SETOR DE PEÇAS PRIMÁRIAS
SUBCONTRATADAS NA INDÚSTRIA AEROESPACIAL

SÃO CARLOS (SP)

2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

TIAGO SANCHES KERNBICHLER

APLICAÇÃO DE MODELO DE REVISÃO PERIÓDICA MULTIPERÍODO COMO
POLÍTICA DE PLANEJAMENTO DE ESTOQUES NO SETOR DE PEÇAS PRIMÁRIAS
SUBCONTRATADAS NA INDÚSTRIA AEROESPACIAL

Texto apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Reinaldo Morabito Neto

SÃO CARLOS (SP)

2016

Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da Biblioteca Comunitária UFSCar
Processamento Técnico
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

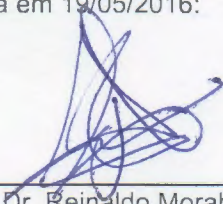
K39a Kernbichler, Tiago Sanches
Aplicação de modelo de revisão periódica
multiperíodo como política de planejamento de estoques
no setor de peças primárias subcontratadas na
indústria aeroespacial / Tiago Sanches Kernbichler. -
- São Carlos : UFSCar, 2016.
98 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de
São Carlos, 2016.

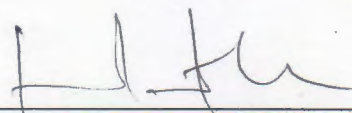
1. Gestão e planejamento de estoques. 2. Modelo
de revisão periódica. 3. Problema do jornaleiro
multiperíodo. 4. Subcontratação. 5. Indústria
aeroespacial. I. Título.

Folha de Aprovação

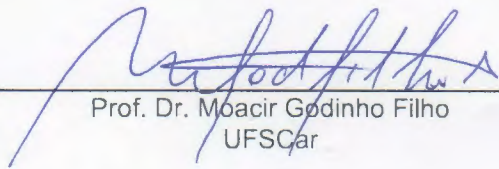
Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Tiago Sanches Kernbichler, realizada em 19/05/2016:



Prof. Dr. Reinaldo Morabito Neto
UFSCar



Prof. Dr. Miguel Cezar Santoro
USP



Prof. Dr. Moacir Godinho Filho
UFSCar

*Aos meus pais pelo amor incondicional.
Aos meus avós, Chico (in memoriam) e Angela (in memoriam), pelo carinho e confiança no
meu sucesso antes mesmo que eu pudesse acreditar.
A minha esposa Karla pelo companheirismo, paciência, apoio total e irrestrito durante todo
este trabalho.*

“Aqueles que não pararam, avançaram tanto que jamais poderão ser alcançados. Não parem, avancem sempre, acreditando que vocês podem ser melhores”
Ozires Silva

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Reinaldo Morabito, que acreditou neste projeto desde o início e foi fundamental para o meu desenvolvimento acadêmico, extraindo o pesquisador que existe em mim. Prof. Reinaldo, você foi um verdadeiro orientador, guiando cada passo deste trabalho e ajudando a transpor os obstáculos quando estes surgiam, sempre com extrema tranquilidade e confiança, muito obrigado.

A minha esposa Karla, por acreditar junto comigo neste sonho, tendo paciência, carinho e motivação para me fazer seguir em frente quando não tinha mais forças para seguir sozinho. Esta conquista é nossa.

Aos meus pais, Alice e Erasmo, que sempre incentivaram a busca pelo conhecimento. Vocês são modelos de vida. Acreditem, os acertos foram muito maiores que os erros, e mesmo nestes reside um aprendizado ainda maior. Amo vocês.

Aos meus avós, Angela e Chico, palavras não traduzem o que vocês significam na minha vida, obrigado por tudo.

Aos meus irmãos, que desde cedo me mostraram que a vida não seria fácil, me tornando mais apto a enfrenta-la, mesmo sem saberem.

Ao Prof. Miguel Santoro, pelas excelentes críticas e sugestões durante o exame de qualificação, que tornaram este trabalho melhor. É uma honra ter este trabalho avaliado por tão brilhante pesquisador.

Ao Prof. Moacir Godinho Filho, pelas importantes contribuições também durante o exame de qualificação, e pelas aulas antes e durante o mestrado, que trouxeram um novo fôlego para minha carreira durante uma crise profissional.

Aos amigos, pela paciência e compreensão nas ausências em diversos compromissos ao longo dos últimos anos.

Aos funcionários da secretária de pós-graduação do DEP-UFSCar, Robson, Natália e Larissa, pelo sempre pronto atendimento, atenção e cordialidade, auxiliando nas questões de prazos, notas e matrículas.

RESUMO

Este trabalho estuda a aplicação de um modelo analítico de revisão periódica de estoques, baseado no problema do jornaleiro multiperíodo (*Multiperiod Newsboy Problem*), como uma alternativa efetiva para determinação da política de planejamento de estoques do setor de peças primárias subcontratadas da indústria aeroespacial. No Brasil, a indústria aeroespacial é responsável por grande parte das exportações do país e compete globalmente com outras cadeias aeroespaciais num cenário cada vez mais turbulento e exigente por entregas rápidas, com altos níveis de qualidade e baixos custos. O objetivo deste trabalho é estudar e propor essa alternativa para otimizar o planejamento de estoques por meio de uma abordagem quantitativa, aplicada no setor de peças primárias da indústria aeroespacial, para um grupo de peças com características específicas, principalmente as de alto valor para demanda anual. O intuito desta abordagem é equilibrar os altos custos de estoque com os altos níveis de serviço exigidos por esta indústria, e responder de forma eficiente às expectativas dos *stakeholders*, com desempenho superior aos modelos atualmente utilizados no setor e auxiliar de forma mais precisa e sistematizada a tomada de decisão no nível tático-operacional. Os resultados obtidos mostram o potencial do método para melhorar o desempenho desses sistemas de gestão e planejamento de estoques.

Palavras-chaves: Gestão e planejamento de estoques. Modelo de revisão periódica. Problema do jornaleiro multiperíodo. Subcontratação. Indústria aeroespacial.

ABSTRACT

This dissertation studies the application of a periodic review inventory model based on the multiperiod newsboy problem, as an effective alternative to reach a well balanced inventory planning policy of subcontractors primary parts area of the aerospace industry. In Brazil, the aerospace industry is responsible for a large amount of the country exports and this industry competes with other globally aerospace supply chains in a scenario increasingly turbulent and demanding for fast deliveries, with high quality levels and low cost. The purpose of this work is to study and propose this alternative for optimizing the inventory planning by means of a quantitative approach, applied in a primary parts sector of the aerospace industry, it will focus in a specific group of items with high annual demand value. The main objective of this approach is to balance the high inventory costs with a high service level demanded in this industry, and efficiently respond the stakeholders expectations, with superior performance of the usual models adopted by this industry, and give a better support to the decision makers in a tactical-operational level. The result obtained show the potential of the method to improve the performance of these inventory management and planning systems.

Keywords: Management and inventory planning. Periodic review model. Multiperiod newsboy problem. Subcontracting. Aerospace industry.

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. OBJETIVO.....	2
1.2. JUSTIFICATIVA.....	4
1.3. MÉTODO DE PESQUISA.....	7
1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	9
2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA NA INDÚSTRIA AERONÁUTICA.....	10
2.1. CONTEXTO ATUAL DA INDÚSTRIA AEROESPACIAL.....	10
2.2. CADEIA DE SUPRIMENTOS AERONÁUTICA E O ELO ESTUDADO.....	10
2.3. OBJETO DO ESTUDO.....	14
2.4. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	20
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	24
3.1. GESTÃO DE ESTOQUES.....	24
3.1.1. IMPORTÂNCIA E TIPOS DE ESTOQUES.....	24
3.1.2. PRINCIPAIS MODELOS DE GESTÃO DE ESTOQUES.....	27
3.1.3. LOTE ECONÔMICO DE COMPRA.....	30
3.1.4. OUTRAS ABORDAGENS.....	33
3.2. PROBLEMA DO JORNALEIRO.....	35
3.3. PROBLEMA DO JORNALEIRO – CASO MULTIPERÍODO.....	40
3.4. APLICAÇÕES DO PROBLEMA DO JORNALEIRO.....	45
4. APLICAÇÃO DA ABORDAGEM E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	52
4.1. COLETA E TRATAMENTO DOS DADOS.....	53
4.2. APLICAÇÃO DO PROBLEMA DO JORNALEIRO MULTIPERÍODO.....	55
4.3. MODELO ADOTADO PELA EMPRESA.....	69
4.4. COMPARAÇÃO ENTRE O MODELO PROPOSTO E MODELO DA EMPRESA - SIMULAÇÕES E RESULTADOS.....	72
5. CONCLUSÕES E PESQUISAS FUTURAS.....	83
5.1. PERSPECTIVAS PARA PESQUISAS FUTURAS.....	84
REFERÊNCIAS.....	85
APÊNDICE A - PROGRAMA EM VBA PARA SIMULAÇÃO MONTE CARLO ENTRE OS MODELOS ESTUDADOS.....	89

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Impactos em cada elo da cadeia de suprimentos pelas tendências apontadas na indústria aeroespacial – adaptado de Deloitte (2013).....	6
Figura 1.2 - Modelo de Pesquisa - Adaptado de Mitroff <i>et al.</i> (1974)	8
Figura 2.1 – Arranjo da cadeia aeroespacial	11
Figura 2.2 - Exemplo de Peças Primárias Subcontradas e suas aplicações nas aeronaves - Fonte site da empresa Fastwork(Produtos)	13
Figura 2.3- Exemplo de Peças Primárias Subcontradas e suas aplicações nas aeronaves - Fonte site da empresa Fastwork(Produtos)	14
Figura 2.4 – Proporção dos setores de atuação da área estudada	15
Figura 2.5- Exemplos de peças usinadas – Classe A	17
Figura 2.6 - Exemplos de peças Classe B - Usinadas.....	18
Figura 2.7 - Exemplos de peças Classe C - Conformadas.....	19
Figura 2.8 - Exemplos de uma peça de material composto	20
Figura 3.1– Exemplo de estoque de ciclo, adaptado de Slack <i>et al.</i> (2002).....	25
Figura 3.2– Representação de um sistema de estoque	26
Figura 3.3 – Uma classificação dos modelos de estoque, adaptado de Lustosa <i>et al.</i> (2008) .	28
Figura 3.4 – Nível de Estoque ao longo do Tempo (adaptado de Axsäter (2006))	32
Figura 3.5– Nível de Estoque ao longo do tempo admitindo faltas (adaptado de Axsäter)	33
Figura 3.6 – Analogia utilizando um fluído para um sistema clássico de produção-estoque (Retirado de Schwartz e Rivera (2010)).....	34
Figura 4.1 – Figura esquemática do processo de coleta e análise dos dados.....	53
Figura 4.2 – Exemplo do comportamento da demanda ao longo do tempo e recorte realizado para estudo.....	55
Figura 4.3 – Representação gráfica da distribuição de um dos itens estudados utilizando a distribuição normal.....	56
Figura 4.4– Tabela do software <i>Easyfit</i> com os três testes de aderência e suas respectivas posições. Na esquerda a tela do <i>software</i> , na direita a tradução.....	57
Figura 4.5 – Valores de demanda plotados graficamente para o item 2 da Tabela 4.3	59
Figura 4.6 – Análise de Sensibilidade – Custo da Falta X Tamanho do R^*	62
Figura 4.7 – Análise de Sensibilidade – Variação do Custo X Nível de Serviço	63

Figura 4.8 – Demanda prevista ao longo do tempo (<i>forecast</i>) de alguns dos itens estudados.	68
Figura 4.9– Tela de interface para entrada dos dados para comparação dos modelos	74
Figura 4.10 – Resumo dos dados simulados destacando o período de warm up.....	76

Lista de Quadros e Tabelas

Quadro 3.1 - Classificações dos modelos de estoque, adaptado de Santoro (2006)	29
Quadro 3.2 – Exemplo do resultado da busca realizada	46
Tabela 4.1– Tabela do software <i>Easyfit</i> ilustrando os testes de hipótese para valores de alfa. Na esquerda a tela original do <i>software</i> , na direita a tradução.....	58
Tabela 4.2 – Valores da demanda média do item 2 da Tabela	59
Tabela 4.3– Tabela com os dados expostos na Figura 4.7, comparando os custos com o nível de serviço.....	65
Tabela 4.4– Resumo dos valores calculados	69
Tabela 4.5 – Médias dos custos de cada um dos modelos calculadas de cada rodada de 1.032.668 iterações – repetidas 50 vezes	77
Tabela 4.6 – Resultados obtidos após simulações para todos os itens analisados.	80

Lista de Símbolos

- D - demanda
- P - custo de colocação de pedido / *setup*
- H - custo de carregamento de estoque de uma unidade por período
- Q^* - tamanho ótimo do lote calculado
- C^* - custo total ótimo do pedido
- C - custo unitário variável de aquisição (produzir ou comprar)
- V - custo da falta por unidade
- $f(D)$ - função densidade de probabilidade D , assumida como conhecida
- R - ponto de reposição calculado
- I - estoque inicial do período
- K - custo médio do período
- $G(R)$ - soma dos custos de manter estoques e custos de faltas em função do ponto de reposição
- N - número de períodos
- μ - média
- σ - desvio padrão
- α - fator de desconto
- SS - estoque de segurança (*safety stock*)
- t - taxa anual de juros
- τ - *lead time*

1. Introdução

A indústria aeroespacial brasileira é um setor de grande importância econômica para o Brasil, sendo um dos principais atores nas exportações do país. Como definido pela Associação das Indústrias Aeroespaciais do Brasil (AIAB), o setor aeroespacial pode ser dividido em três grandes grupos: aeronáutico, defesa e espacial. Aeronáutico é a parte que trata principalmente do projeto e fabricação de aeronaves. A área de defesa está ligada ao desenvolvimento de sistemas e aeronaves para funções militares de defesa. A área espacial refere-se ao projeto e fabricação de produtos enviados ao espaço, normalmente satélites dos mais variados tipos, desde comunicação até sensoriamento remoto para vigilância.

Segundo Montoro e Migon (2009), esta indústria como um todo é responsável anualmente por uma receita de aproximadamente US\$ 7 bilhões, sendo US\$ 5 bilhões exportados, e destes, cerca de 85% são valores do setor aeronáutico, ou seja, fabricação e comércio de aeronaves. Este valor ainda é pequeno comparado à participação (anual) da indústria de construção aeronáutica na economia mundial, que é estimada em mais de US\$ 270 bilhões, conforme descrito em Gargiulo (2008). No Brasil a indústria aeroespacial é responsável por mais de 26 mil empregos, um valor ainda pequeno quando comparado às duas maiores cadeias mundiais do setor aeroespacial, que empregam dez vezes este valor, cada uma. A empresa líder deste setor no Brasil responde anualmente por um valor entre 3 a 5 % do total das exportações brasileiras e contribui de forma bem positiva para a balança comercial brasileira.

O ambiente competitivo na indústria aeroespacial vem se tornando continuamente mais acirrado nos últimos anos, em razão, dentre outros fatores, da redução dos preços praticados pelos principais fabricantes desta indústria no mundo, das entradas de novos competidores e das crises econômicas mundiais afetando negativamente a demanda em todos os segmentos, ao lado da pressão cada vez maior dos acionistas por um retorno mínimo esperado. Neste cenário, toda a cadeia produtiva da indústria aeroespacial recebe a tarefa de reduzir seus custos para garantir margens de lucro. Mesmo os elos desta cadeia que tradicionalmente sempre adotaram uma política *make-to-stock*, como a área de peças primárias, por exemplo, precisam rever seus modelos para atingirem as expectativas dos

stakeholders e garantir as metas de estoque acordadas e conseqüentemente, os resultados operacionais desejados.

O grande desafio na indústria aeroespacial reside no fato de ser necessário um nível de serviço extremamente elevado em todos os elos da cadeia produtiva, por manufaturar produtos com longos *lead times*, e com muitas etapas produtivas que possuem ciclos relativamente curtos. Nesta cadeia, dentro de cada atividade o custo das faltas de peças, partes, materiais e componentes para o elo seguinte é sempre muito elevado, por se tratar de um produto de grande valor agregado. Assim, é preciso balancear de forma racional os níveis de estoque dos itens necessários à produção dos produtos, maximizando o atendimento ao menor custo possível e preservando a competitividade da cadeia.

1.1. Objetivo

O setor de peças primárias é um dos primeiros elos da cadeia aeronáutica, sendo imediatamente posterior a matéria-prima, e assim, sofre de forma aguda o efeito *chicote* da demanda. O fenômeno do efeito chicote descrito por Forrester (1961), em seu trabalho seminal sobre dinâmica de sistemas, pode ser descrito como sendo um impacto negativo sobre a regularidade e estabilidade dos pedidos ao longo de uma cadeia de suprimentos, aumentando a variação na demanda ao longo da cadeia, sendo menor nos elos mais próximos ao consumidor final e maior nos elos primários.

As necessidades calculadas de materiais e peças, especialmente neste elo, oscilam constantemente, antecipando e postergando a cada período as demandas, mesmo quando utilizada a explosão por MRP. MRP é a sigla de *Material Requirement Planning*, que, conforme descrito em Godinho e Fernandes (2006), é um dos sistemas de planejamento e controle da produção mais importantes e utilizados. O MRP permite que, com base na decisão de produção dos produtos finais, seja determinado quais itens (semiacabados, componentes e matérias-primas) produzir e comprar, bem como quando e quanto produzir e comprar.

Frente a tantas oscilações, a demanda de peças primárias pode ser considerada uma variável com muitas incertezas, sendo necessária a adoção de políticas de planejamento para satisfazer essa demanda, sem comprometer as metas de estoque. O efeito chicote é ainda mais sensível na cadeia aeronáutica em razão dos altos *lead times* praticados por esta

indústria, tornando ainda mais nervosa a demanda prevista, sendo assim de vital importância subsídios que apoiem a tomada de decisão sobre a gestão de estoques.

O objetivo deste trabalho é estudar a aplicação de um modelo analítico de revisão periódica multiperíodo, para uma política de planejamento de estoques no setor de peças primárias subcontratadas da indústria aeroespacial. Para isso, é utilizado um modelo para o denominado problema do jornaleiro multiperíodo (descrito na literatura como *multiperiod newsboy* ou *multiperiod newsvendor problem*, conforme Johnson e Montgomery (1974)), como uma alternativa para representar adequadamente o problema de controle de estoques dessas peças, e apoiar decisões em nível tático-operacional. Não foram encontrados trabalhos na literatura explorando essa abordagem aplicada na indústria aeroespacial, o que faz com esse estudo seja uma oportunidade para avaliar o desempenho dessa abordagem frente a outras políticas de estoque utilizadas nesta indústria.

A abordagem do problema do jornaleiro multiperíodo parece interessante por discutir o ponto de pedido de reposição dos produtos sob a perspectiva do excesso e da falta de estoques, e no caso da indústria aeroespacial, a falta na verdade se traduz em um atraso de fornecimento. Essa abordagem leva em consideração esse conflito entre excesso e falta de estoque, aderindo bem à condição competitiva atual da indústria aeronáutica. No problema clássico do jornaleiro monoperíodo, o “jornaleiro” procura maximizar seu ganho, procurando atender toda a demanda possível até determinado ponto de equilíbrio, levando em conta que o que não for vendido pode ser considerado como perda.

No setor de peças primárias, algumas classes de produtos são ainda mais aderentes ao problema do jornaleiro multiperíodo, por possuírem uma demanda bem variável e pouco previsível nos múltiplos períodos, em função de mudanças dos planos de produção e da combinação distinta e simultânea dos tipos de demandas de cada unidade de negócio. Neste caso, as peças de maior impacto para o estoque em valor são grandes candidatas à utilização deste modelo. Para o caso das peças de reposição ou produtos em desenvolvimento, existe um risco de obsolescência imediata por mudança/melhoria no projeto do produto, e assim, o modelo multiperíodo não é o mais indicado, sendo mais aderente o modelo monoperíodo, com custo do excesso muito maior do que no caso monoperíodo.

Neste trabalho pretende-se estudar e também identificar para quais classes de produtos do setor de peças primárias da indústria aeroespacial essa abordagem, baseada em

métodos para o problema do jornaleiro multiperíodo, pode ser utilizada no processo de decisão. Para isso, contou com a importante colaboração de uma empresa deste setor, fornecendo dados e auxiliando na análise dos resultados obtidos.

1.2. Justificativa

O planejamento e controle de estoques é uma das áreas que podem propiciar uma vantagem competitiva importante a uma companhia. Uma boa gestão de estoques contribui favoravelmente para o bom desempenho do negócio. Com a popularização do chamado Sistema Toyota de Produção, descrito por exemplo em Ohno (1997), a questão dos estoques mínimos ou zero estoque é cada vez mais requerida nos mais diversos setores das indústrias, inclusive no aeronáutico.

A atividade de gestão de estoques vem sendo estudada há anos, principalmente a partir da segunda metade do século XX. Buscas em bases de dados e livros sobre gestão de operações mostram que o assunto é largamente estudado, dado a sua importância tanto acadêmica como profissional. Diversos modelos já foram formulados para os mais variados problemas de estoque e para os mais diversos setores econômicos. O objetivo deste estudo é trazer mais uma contribuição para este amplo e denso campo de gestão e controle de estoques. Conforme mencionado, o enfoque deste trabalho é num dos elos da cadeia aeroespacial, mais precisamente no setor de peças primárias subcontratadas.

Durante a pesquisa não foram encontrados trabalhos na literatura que abordaram a gestão de estoques deste elo da indústria aeroespacial, na mesma linha de pesquisa explorada neste trabalho. Uma contribuição é a utilização do modelo de revisão periódica multiperíodo para determinar o tamanho de lotes de reposição deste elo e desta indústria, que possui características bastante particulares, como o baixo volume de fabricação de peças e um alto volume de tipos de peças empregadas em cada produto. O modelo matemático do problema do jornaleiro monopерíodo, brevemente apresentado neste trabalho, está presente em inúmeros trabalhos da literatura abordando o tema, e possui uma infinidade de desdobramentos, como apresentado nos trabalhos de revisão em: Silver *et al.* (1998), Khouja (1999) e Qin *et al.* (2011). Por outro lado, o modelo matemático do problema

do jornaleiro multiperíodo, explorado neste trabalho, é um modelo bem menos estudado na literatura, o que amplia a motivação e contribuição científica deste trabalho.

Assim, este trabalho apresenta duas contribuições científicas, uma quanto ao uso do modelo multiperíodo, não tanto explorado em problemas de estoque como o modelo monopерíodo, e a outra com relação a aplicação na indústria aeroespacial. Apesar desta indústria ser relativamente bem estudada, são poucos os trabalhos encontrados na área de gestão de operações, um menor número em gestão de estoques e um número ainda menor neste elo estudado das peças primárias.

Conforme abordado por Dostaler (2014), a pressão por competitividade entre cadeias aeroespaciais força os atores destas cadeias a baixarem seus custos. A autora aborda este cenário principalmente nos chamados elos *tier 1 e tier 2*, que podem ser traduzidos como fabricantes (ou fornecedores) de peças primárias desta cadeia. Neste cenário, é fundamental uma boa gestão dos estoques pelas empresas e, de forma mais ampla, se torna fundamental políticas de estoques adequadas que consigam dar suporte a tomada de decisão, para garantir um bom atendimento a um custo competitivo. Desta forma, a abordagem aqui proposta em estudar e aplicar métodos do problema do jornaleiro multiperíodo para sistemas de estoque nesse setor vem de encontro a este cenário.

Um estudo publicado pela consultoria Deloitte e apresentado no final de 2013, (Deloitte,2013) mostra algumas tendências para as cadeias aeroespaciais. Como primeira tendência, tem-se que os montadores e fornecedores de primeiro grau (*tier 1*) estão se expandindo para mercados com rápido crescimento, como a China, por exemplo. Outra forte tendência observada se dá pelo aparecimento de novos entrantes, pressionando, principalmente em custo, os tradicionais montadores. Existem quatro nações com projetos avançados para entrarem ou retornarem à indústria aeroespacial, sendo: Sukhoi (Rússia), Comac e Avic (China), Nal (India) e Mitsubishi (Japão).

Uma terceira tendência apontada no estudo é a redução de fabricação interna pelos montadores para focar na integração de sistemas. Com isto, espera-se uma maior competência dos fornecedores em abastecer adequadamente as linhas de produção. Este ponto reforça a importância desta pesquisa, afinal é uma tendência desta indústria focar na compra ou subcontratação de soluções de peças primárias e pequenas montagens. A quarta e última tendência discutida no estudo envolve os novos polos de fornecedores desta indústria, ou seja, são países que não possuem nenhuma montadora (OEM), porém já

receberam diversos investimentos ao longo das últimas décadas e hoje são fornecedores competitivos e que pressionam os custos desta indústria para baixo. Podemos citar, como exemplo, o México e a Turquia. Ambos os países possuem diversos polos de fornecedores nos seus territórios, e já são grandes referências como fornecedores da indústria, sem ainda possuírem qualquer montadora em seus territórios.

A Figura 1.1, ilustra resumidamente o exposto acima. É possível perceber que a pressão incide de forma mais acentuada nos níveis mais baixos das cadeias, o que reforça ainda mais a importância deste trabalho.

CONSEQUÊNCIA: Impacto de cada tendência na cadeia de valor de cada nível

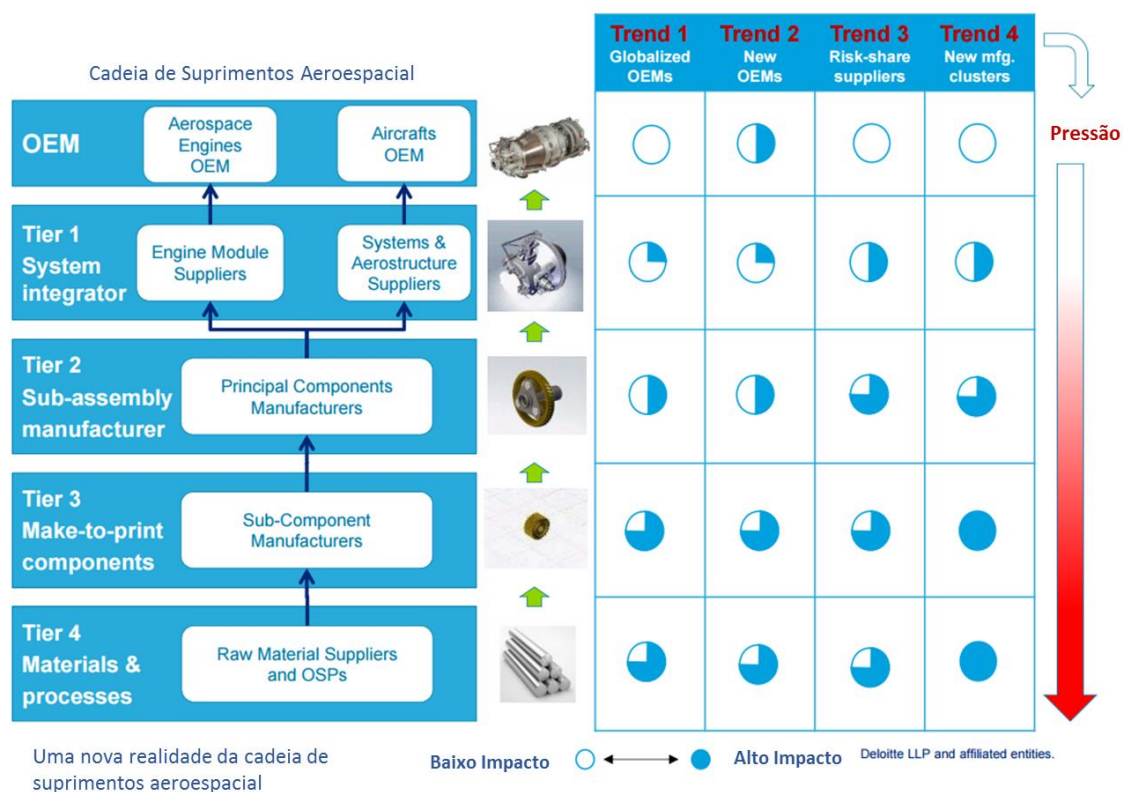


Figura 1.1 - Impactos em cada elo da cadeia de suprimentos pelas tendências apontadas na indústria aeroespacial – adaptado de Deloitte (2013)

1.3. Método de Pesquisa

A classificação do método de uma pesquisa não é uma tarefa simples, pois existem diversas variantes adotadas pelos muitos autores que abordaram o tema nas mais variadas áreas do conhecimento. Por este ser um trabalho na área de Engenharia de Produção, vamos contextualizar este trabalho inicialmente adotando como modelo a nomenclatura apresentada em Miguel *et al.* (2012). As abordagens de pesquisa podem ser divididas entre pesquisas qualitativas e quantitativas. O presente trabalho pode ser enquadrado na abordagem quantitativa. Segundo Bryman (1989), as principais preocupações da abordagem quantitativa são: mensurabilidade, causalidade, generalização e replicação.

De forma resumida, conforme abordado em Cauchick Miguel *et al.* (2012), temos a mensurabilidade como uma das principais questões da abordagem quantitativa, exercendo um papel central no processo de realização da pesquisa. A causalidade procura explicar como as coisas são. A pesquisa busca provar um relacionamento entre a causa e efeito. A generalização busca expandir os resultados para além dos limites da pesquisa, não sendo preocupação exclusiva da abordagem quantitativa. Finalmente temos a replicação, que tem seu foco em permitir que os resultados de uma pesquisa possam ser replicados por outro pesquisador em uma nova abordagem, variando a população, por exemplo, validando ou verificando a existência de viés ou predileção dos pesquisadores durante a coleta de dados.

Ainda de acordo com Cauchick Miguel *et al.* (2012), os métodos de pesquisa quantitativa mais apropriados, na área de engenharia de produção são: pesquisa de avaliação (*survey*), modelagem/simulação, experimento e quase-experimento. O método de pesquisa deste trabalho é considerado como modelagem/simulação.

De forma mais abrangente e unificando a classificação deste trabalho, utilizamos as definições em Bertrand e Fransoo (2002). O método de pesquisa utilizado neste trabalho pode ser definido como uma pesquisa axiomática quantitativa normativa. Ela é descrita como axiomática, pois segundo Morabito e Pureza (2009), utiliza um modelo idealizado e conhecido na literatura. A definição de quantitativa provem do fato de ser um modelo abstrato descrito em linguagem matemática, que utiliza ferramentas analíticas para tratar sua problemática. E é normativa pelo fato de se basear em um modelo prescritivo, que

desenvolve normas, estratégias e ações, a fim de prescrever decisões para o problema e tentar melhorar os resultados disponíveis na literatura.

Segundo o clássico modelo de Mitroff *et al.* (1974), abordagens de pesquisa operacional são constituídas pelas seguintes fases: Conceptualização, modelagem, solução do modelo e implementação. Neste trabalho, pretende-se aplicar uma abordagem de pesquisa operacional para tratar o problema de planejamento e controle de estoques descrito, seguindo essas mesmas fases ilustradas na Figura 1.2.

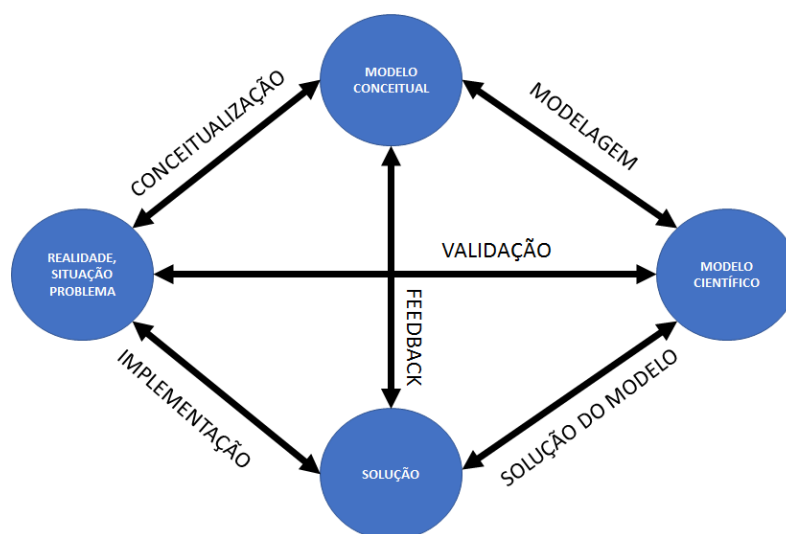


Figura 1.2 - Modelo de Pesquisa - Adaptado de Mitroff *et al.* (1974)

Na conceptualização, temos a elaboração do conceito a ser trabalhado, neste caso o problema de políticas de planejamento para estoques oriundo do setor de peças primárias da indústria aeronáutica. Após busca na literatura por um modelo que comporte as características desta indústria, optou-se pelo uso do modelo de revisão periódica multiperíodo, também conhecido como problema do jornaleiro multiperíodo. A modelagem se dá tanto para o modelo atual da empresa, bem como este modelo proposto, criando rotinas computacionais que representam o comportamento destes dois sistemas. Na sequência, temos a resolução destes modelos, tanto por cálculos manuais quanto por implementações computacionais, até o simulador criado para validar os modelos construídos. Por fim a implementação da abordagem na situação real, podendo ser estendido para qualquer item que se deseje estudar desta indústria.

1.4. Organização do Trabalho

Este trabalho está dividido em 4 capítulos. O capítulo 1 é introdutório e apresenta o objeto do estudo e os objetivos deste trabalho, suas justificativas e o método de pesquisa utilizado. O capítulo 2 descreve resumidamente o contexto do objeto deste trabalho, com informações sobre a indústria aeroespacial e sua cadeia de fornecimento, partindo de uma visão macro até o recorte do problema de pesquisa deste trabalho e suas particularidades.

No capítulo 3 realiza-se uma revisão da literatura sobre gestão de estoques e na sequência, uma revisão bibliográfica sobre abordagens para problemas do jornaleiro nas suas principais variantes, incluindo os casos monoperíodo, multiperíodo e abordagem com distribuição livre. O capítulo 4 trata da coleta e análise dos dados na empresa estudada, das comparações e análises entre os modelos e, por fim, dos resultados obtidos com aplicação dos modelos neste trabalho, apresentando um questionamento e uma validação de qual método tem melhor desempenho. Finalmente no capítulo 5 são apresentadas as conclusões deste estudo e as sugestões para pesquisas futuras.

2. Definição do Problema na indústria aeronáutica

Neste capítulo é detalhado o contexto do problema com a descrição da indústria onde o problema é estudado, fazendo um recorte na cadeia produtiva das peças primárias e suas tecnologias procurando descrever a problemática enfrentada.

2.1. Contexto Atual da Indústria Aeroespacial

A indústria aeroespacial vem sofrendo uma desintegração vertical no âmbito global, conforme relatado em Dostaler (2014). Ainda, segundo a autora, os tradicionais OEMs (*Original Equipment Manufacturers*), como a Boeing, Airbus e Bombardier, passam a agir como integradores de sistemas. Este modelo não verticalizado apresenta claras vantagens financeiras, permitindo aos OEMs do setor investirem menos capital no desenvolvimento de novos programas. Na mesma medida, surgem desafios e oportunidades para fornecedores de primeiro nível (*first-tier*), aumentando a possibilidade de negócios, mas também aumentando a pressão por baixo custo, qualidade, dependência e flexibilidade.

Este movimento de horizontalizar a cadeia aeronáutica não é recente, como mostra Williams *et al.* (2002), apontando a globalização do setor e um esforço dos principais OEMs de adotar em maior grau a subcontratação (*outsourcing*) e racionalizar suas cadeias de suprimentos. Dado este cenário, a boa gestão dos estoques dentro das empresas OEMs torna-se, cada vez mais, um diferencial competitivo dentro do setor, sendo fundamental a aplicação de boas práticas e métodos que possam predizer da melhor forma como este estoque será composto.

2.2. Cadeia de Suprimentos Aeronáutica e o elo estudado

A cadeia de suprimentos da indústria aeroespacial estudada pode ser descrita como ilustrado na Figura 2.1.



Figura 2.1 – Arranjo da cadeia aeroespacial

A cadeia aeroespacial pode ser dividida em cinco grandes elos, sendo o primeiro deles os fornecedores de matérias-primas, principalmente de alumínio para estruturas aeronáuticas, e componentes, que podem ser porcas, rebites, rótulas, entre outras. Na sequência, estão os fabricantes de peças primárias que fornecem componentes para submontagens. A característica deste tipo de indústria é que os componentes podem ser desde pequenos suportes estampados para suporte de cabos ou fixação de móveis, até peças estruturais complexas com mais de dois metros de comprimento. Na sequência da cadeia aparecem os fabricantes, na indústria em geral chamados de montadores, que realizam o agrupamento dos componentes em subconjuntos. Estes também podem ser desde pequenos conjuntos mecânicos de acionamento, até conjuntos maiores como asas, dianteiras e fuselagens. O próximo elo é composto pelos integradores que unem os subconjuntos,

atividade chamada de junção na indústria. Outra atividade deste elo é equipar a estrutura da aeronave com todos os sistemas do produto (hidráulica, elétrica, pneumática, aviônicos e demais).

No final da cadeia temos os chamados OEMs, que formam o elo conhecido por projetar, entregar e comercializar a aeronave (Boeing e Airbus são exemplos bastante conhecidos). Este elo normalmente integra o interior e realiza a pintura da aeronave. Na empresa estudada ocorre a transposição do modelo de fabricação própria, parceria e subcontratação, sendo que a fabricação própria ocorre em praticamente todos os elos, exceto nas matérias-primas, e outra característica é que a subcontratação ocorre apenas no elo de componentes.

O foco deste trabalho está no elo de peças primárias desta cadeia, mais especificamente nas peças primárias subcontratadas. O setor objeto deste trabalho é composto por basicamente três tipos de tecnologia:

- Usinagem Mecânica
- Conformação Mecânica (Estamparia)
- Materiais Compostos (Compósitos em geral, ex.: fibra de vidro)

Usinagem, conforme definido por Ferraresi (1977), é a operação que ao conferir à peça a forma, ou as dimensões ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens, produz cavaco (porção de material da peça retirada pela ferramenta). Os processos de usinagem mais conhecidos são o torneamento e o fresamento, que também são os processos de usinagem mais característicos dentro do objeto do estudo.

Conformação, segundo o mesmo autor, pode ser definida da mesma forma que a usinagem, diferenciando apenas no fato desta tecnologia não produzir cavaco. Os processos de conformação mais conhecidos são a estamparia e a calandragem.

Material composto, ou compósito, segundo Callister (2002), é um material multifase que apresenta uma combinação de propriedades, possibilitando um melhor desempenho desse material em cada fase da sua composição, caso sejam empregadas individualmente. A tecnologia de material composto é formada por um grande número de processos, cujas definições tornariam este texto extenso e que não são o foco deste trabalho. Para contextualizar este trabalho, fica registrado que a tecnologia mais empregada no objeto de estudo é a impregnação manual, que consiste na aplicação em camadas de tecido e resina sobre um molde, de onde após determinado período de cura, retira-se a peça pronta.

As Figura 2.2 e Figura 2.3 apresentam alguns exemplos de peças primárias subcontratadas utilizadas em alguns produtos. Como é possível observar, em praticamente todos os conjuntos das aeronaves existem partes primárias subcontratadas. Outro ponto que pode ser observado nestas figuras é a diversidade de tipos destas peças, tanto em tamanho, forma, complexidade de fabricação. Esta diversidade de tipos traz consigo uma grande variação nos valores destas peças, o que é um forte motivador para aplicação deste trabalho em determinados grupos, melhor descrito na próxima seção.



Figura 2.2 - Exemplo de Peças Primárias Subcontratadas e suas aplicações nas aeronaves - Fonte site da empresa Fastwork(Produtos)



Figura 2.3- Exemplo de Peças Primárias Subcontratadas e suas aplicações nas aeronaves - Fonte site da empresa Fastwork(Produtos)

2.3. Objeto do Estudo

O setor de peças primárias fabricadas por subcontratação da empresa estudada conta com uma base de aproximadamente 70 fornecedores nacionais, localizados principalmente no estado de São Paulo, aproximadamente 90% do total. Este setor é responsável pela fabricação de mais de 220 mil tipos de peças, sendo que pouco mais de 59 mil destes itens tem demanda recorrente, os chamados itens vivos, o restante é classificado como peças de reposição.

Na empresa estudada existem três grandes segmentos de mercado da aviação, são eles: Comercial, Executiva e Defesa. Os produtos para aviação comercial podem ser descritos como aeronaves classificadas como jatos regionais de 70 a 124 assentos, sendo operados por companhias aéreas de todo globo. Nestes produtos podemos dizer que o grau de customização é baixo, envolvendo itens com uma demanda estável praticamente nivelada.

A aviação executiva é composta por produtos destinados ao transporte de passageiros do mercado executivo, sendo aeronaves normalmente menores, porém com um grau de customização bastante elevado, principalmente nos interiores das aeronaves. O *layout* interno, o mobiliário, as cores e os acabamentos são totalmente customizáveis, muitas vezes

gerando mudanças de engenharia em diversas partes da aeronave para acomodar dispositivos solicitados pelos clientes. A demanda destes itens é fortemente associada ao cenário econômico mundial, sendo praticamente aleatória e nem um pouco nivelada.

Os produtos para o mercado de defesa um ciclo de vida extremamente alto, com algumas atualizações tecnológicas, mas sem grandes mudanças estruturais no produto. São aeronaves de valor extremamente elevado, tem um grau de customização muito restrito e um controle regulatório para fabricação e venda extremamente alto. A demanda deste setor é associada a encomendas de forças armadas. Quando existem contratos, o plano de produção é quase sempre nivelado e existem muitas extremamente elevadas caso ocorram atrasos de marcos contratuais.

O setor de peças primárias subcontratadas aqui estudado atende a todas as três principais divisões da empresa, com uma distribuição aproximada de 25% dos itens para aviação comercial, 20% para o setor de defesa e os demais 55% para aviação executiva, o que é esperado pelo alto grau de customização desta área. A proporção pode ser visualizada na Figura 2.4.

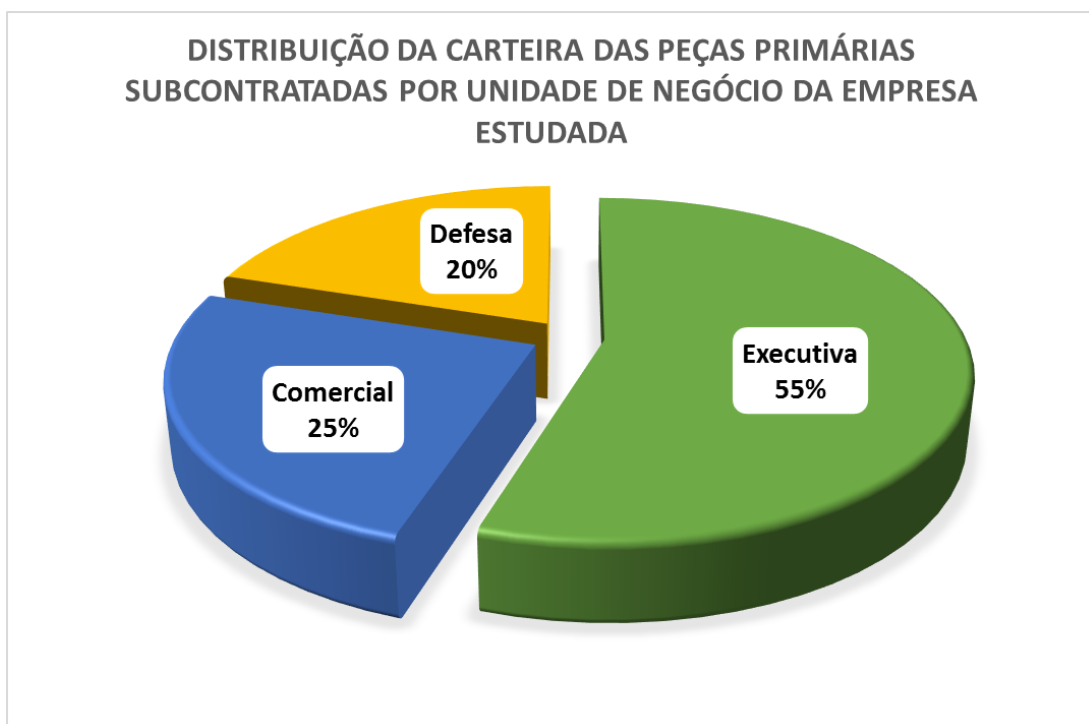


Figura 2.4 – Proporção dos setores de atuação da área estudada

Como já mencionado na seção anterior, a variedade de peças primárias subcontratadas é muito grande, assim como seus valores. Estas peças podem custar de

dezenas até dezenas de milhares de dólares, cada uma. Normalmente existe uma relação direta do preço em função da tecnologia e complexidade da peça. As peças com maior valor unitário são invariavelmente usinadas e mais especificamente, usinadas em máquinas de 4 ou 5 eixos, que possuem um valor de taxa hora de produção bem mais elevado do que as máquinas 3 eixos. Na sequência temos as peças usinadas em máquinas de característica 3 eixos e as peças de menor custo unitário são normalmente as conformadas.

Existem alguns outros pontos que afetam o custo das peças. As características de maior destaque são: alguns tratamentos térmicos específicos que exigem fornalas exclusivas pelo volume produzido, algumas peças com matéria-prima de dureza mais elevada, o titânio é um exemplo, e ainda alguns tratamentos superficiais. Estas características são pontuais e afetam um elenco muito reduzido de peças para demandarem um grupo específico, sendo que a maior parte do custo é formada pela tecnologia de transformação mecânica do material (usinagem ou conformação). Assim, este ponto é importante para contextualizar o objeto deste estudo, mas não tão relevante para sua análise.

A empresa estudada realiza seu planejamento de estoques baseada no valor de demanda anual do item e não no seu valor unitário. A divisão é feita através da aplicação do princípio de Pareto, de acordo com Ballou(2006), refere-se a curva 80-20, também conhecida como lei de Pareto, onde foi observada uma proporção de 80% da riqueza distribuída em 20% da população num estudo de Vilfredo Pareto, este conceito posteriormente encontrou generalizada aplicação nos negócios. Esta divisão de itens com base nos valores anuais de demanda na seguinte proporção: Itens A representam cinquenta por cento do valor total, os itens B representam vinte e cinco por cento do total, os itens C representam vinte por cento do total e os itens D representam os demais cinco por cento. Desta forma, uma peça de baixo valor pode ser classificada como classe A, caso tenha uma demanda extremamente elevada, e pode impactar negativamente o estoque, caso a política seja baseada apenas no valor unitário do item. Esta abordagem é aderente ao modelo utilizado pela empresa para cálculo do tamanho de lote, por meio da conhecida equação do lote econômico de compra. Segundo Axsäter(2006), esta equação é o resultado mais conhecido em toda área de gestão de estoques. Conforme descrito em Silver *et al.* (1998), a equação do lote econômico otimiza a quantidade a ser pedida, balanceando o custo de pedido e o custo de estoque.

Apesar de ser possível a ocorrência de itens classe A de baixo valor unitário, a grande maioria destes itens classe A são aqueles que possuem os maiores valores unitários.

Para exemplificar alguns tipos de peças e situar melhor o problema, a Figura 2.5, apresenta alguns itens classificados como classe A. Como é possível observar, são itens complexos, que normalmente partem de uma matéria-prima bruta (placa de alumínio) ou um forjado, e sofrem grandes desbastes. Outra característica deste tipo de indústria que aumenta o valor das peças são as tolerâncias exigidas nos projetos, que normalmente são muito apertadas, demandando um elevado grau de precisão e com isto, aumentando o tempo de produção, tornando os produtos ainda mais caros.



Exemplos – Itens Classe A – Tecnologia Usinagem

Figura 2.5- Exemplos de peças usinadas – Classe A

A Figura 2.6 ilustra algumas peças do tipo classe B. São peças que em sua maioria também se utilizam da tecnologia de usinagem, porém normalmente são peças mais simples, ou menores, ou que apresentem uma necessidade tecnológica de fabricação mais comumente encontrada no mercado, de máquinas CNC 3 eixos ou mesmo máquinas

convencionais. Nesta figura ainda podemos notar algumas peças com encalque de buchas ou rótulas, o que muitas vezes é uma característica presente neste tipo de peças. Estas pequenas montagens também fazem parte do escopo das peças subcontratadas. Estes itens na verdade têm-se tornando cada vez mais comuns, o que pode indicar uma tendência ou estratégias da empresa agregando mais valor à cadeia de fornecedores.



Exemplos – Itens Classe B – Tecnologia Usinagem

Figura 2.6 - Exemplos de peças Classe B - Usinadas

Na Figura 2.7 são apresentadas algumas peças características da classe C. São itens normalmente fabricados de chapas de alumínio pelo processo de conformação simples, normalmente dobras retas em sua maioria. Estas peças podem ser classificadas como calços ou suportes, normalmente utilizados para fixação de cabos elétricos, dutos, tubulações ou fixação de outros equipamentos. É possível notar na figura a presença de rebites e porcas-flange caracterizando montagens simples. Estes itens normalmente apresentam uma espessura muito menor que os demais apresentados, o que facilita a fabricação e reduz o custo.



Exemplos – Itens Classe C –
Tecnologia Conformação
(Estamparia)

Figura 2.7 - Exemplos de peças Classe C - Conformadas

A tecnologia de materiais compostos não será abordada neste trabalho, mas também faz parte do escopo das peças subcontratadas. São peças mais difíceis de se enquadrar a uma classificação, pois podem possuir diversas formas de fabricação, seus custos nem sempre são em função dos seus tamanhos, mas sim dos materiais empregados e do processo utilizado na fabricação. Os custos dos moldes necessários para fabricação desta tecnologia, normalmente são diluídos nos valores das peças, sendo também neste aspecto uma particularidade deste tipo de tecnologia. A Figura 2.8 apresenta um destes itens de material composto, se trata de um tanque para pulverização de defensivos ou dispersão de sementes nos campos. Este exemplo é um pequeno exemplo desta tecnologia, pela imagem nota-se a semelhança com uma caixa d'água, ambas são fabricadas com o mesmo processo, a laminação manual.



Figura 2.8 - Exemplos de uma peça de material composto

2.4. Definição do problema

Com o objeto definido, pode-se retornar ao problema da gestão de estoques enfrentado pela empresa estudada. Conforme apresentado no Capítulo 1, o mercado aeroespacial está cada vez mais competitivo e pressionando os custos da cadeia como um todo para baixo, com foco ainda maior nos elos primários. A problemática consiste então em conciliar um baixo custo de abastecimento com um alto nível de serviço. Para os itens de classe C, isto é relativamente fácil de se obter, pois os custos não são proibitivos para se trabalhar com grandes lotes. Quando utilizada a equação do lote econômico, mesmo que de forma questionável, por não se conhecer a característica da demanda (nem sempre estacionária), temos lotes sugeridos entre 8 a 12 meses de demanda, garantindo assim o abastecimento por longos períodos.

No caso dos itens de classe B, por terem um custo já um pouco mais elevado, começa a existir um certo questionamento sobre o tamanho de lote ideal de compra. O setor de peças primárias da empresa estudada utiliza para todas as suas classes a fórmula do lote econômico para determinar o tamanho dos lotes. Nos itens classe B, estes valores variam entre 2 a 6 meses de demanda. O atendimento normalmente é garantido, porém poderia se obter melhores resultados para os custos de abastecimento se outros modelos fossem utilizados, como por exemplo o modelo do jornaleiro multiperíodo proposto neste trabalho.

O grande foco nas discussões sobre políticas de planejamento fica em torno dos itens classe A. Estes possuem maior valor, correspondendo por 50% do valor total do estoque, tendo maior impacto. Além do alto valor, são itens mais complexos e que em caso de desabastecimento podem parar uma montagem num próximo elo da cadeia. Portanto a relação entre custo de falta e custo de estoque se torna fundamental, e um modelo que traga de forma objetiva e otimizada a ponderação entre estes custos para auxílio na tomada de decisão pode ser um diferencial competitivo. Logo, o grande questionamento está em qual o tamanho de lote ideal que supre a cadeia adequadamente, e ainda assim tenha o menor impacto no estoque possível.

O processo todo, desde o surgimento da demanda até a estocagem dos itens fabricados pelo setor de peças primarias subcontratadas, possui algumas etapas. A demanda estimada das peças vem do cálculo do MRP, rodado o programa uma vez por semana. Assim, o modelo de revisão deve ser do tipo periódico. Caso fosse utilizado um modelo contínuo, entrariam nas análises outras variáveis de custo, pois seriam necessárias pessoas e processos para efetuar este controle. O MRP realiza a explosão das necessidades, não existe qualquer restrição sistêmica para demandas agregadas, ou seja, o planejamento e a consequente fabricação de cada item são feitos de forma individual.

Duas considerações importantes devem ser feitas sobre o problema: os *lead times* normalmente são múltiplos dos períodos, considerando a operação em regime, eles não afetam os cálculos de reposição. Outro ponto é com relação ao custo de *setup* (ou colocação do pedido), para os itens classe A e B este valor é muito pequeno quando comparado aos demais custos, portanto não afeta o tamanho do lote, tendo mínimo efeito no cálculo dos lotes de reposição.

Sendo as necessidades calculadas pelo MRP, existe uma previsão de demanda cadastrada no sistema com base nos planos de produção já colocados no sistema pelas áreas responsáveis. O horizonte de planejamento trabalha em média com 12 meses, desta forma tem-se múltiplos períodos que devem ser avaliados, portanto a decisão sobre o tamanho da reposição é multiperíodo. Em uma primeira suposição, é possível pensar que a gestão não é tão complexa e até relativamente fácil de se administrar, afinal os planos estão cadastrados, os *lead times* também cadastrados, ou seja, em regime as datas de início e fim são conhecidas, e portanto a única variável seria o tamanho do lote. As incertezas estariam em torno dos *lead*

times praticados pelos fornecedores, e a inclusão de uma política de segurança incorporando esta variação de *lead time* atenderia as necessidades de abastecimento.

O que se observa na prática não é tão simples. Apesar dos planos estarem cadastrados com a demanda de ao menos dezoito meses, e de existir um rito formal para alteração deles com a avaliação de todas as áreas fornecedoras de determinado programa, mudanças ocorrem com relativa frequência. As áreas executiva e defesa são as que mais impactam esta oscilação de demanda. A aviação executiva, ao colocar e retirar aviões do plano de produção com muita frequência, provoca ao menos uma alteração mensal em média. A área de defesa impacta normalmente pela colocação de aviões no plano, o que é benéfico para o faturamento da empresa, porém em muitos casos não são respeitados os *lead times* planejados das áreas fornecedoras, gerando um efeito sistêmico negativo na cadeia de fornecimento, principalmente das peças primárias que fornecem para todos os programas utilizando os mesmos recursos produtivos. Uma outra componente de incerteza que surge neste ambiente são as peças de reposição, algumas planejadas outras não. O volume acrescido mensalmente em função destas peças para cadeia de fornecimento de peças primárias subcontratadas fica em torno de 15% da demanda prevista de cada mês.

Uma outra componente que afeta a cadeia de fornecimento e compete pelos mesmos recursos são as mudanças de engenharia. Seja para implementar melhorias, efetuar eventuais correções, ou ainda para incorporar um pedido de cliente. Estas alterações normalmente possuem uma prioridade de atendimento elevada, e não respeitam os ciclos planejados, gerando ordens priorizadas no sistema, passando na frente da fila de atendimento normal. Considerando todos estes fatores, temos um ambiente dinâmico e com grande oscilação, onde não são negociáveis as faltas e os atrasos geram exposição negativa para as áreas fornecedores. Então a segurança adotada por toda a cadeia é grande afim de evitar a falta, e os parâmetros de segurança acabam sendo indiscriminadamente utilizados dentro da cadeia de suprimentos.

Nos últimos anos, diversos trabalhos foram conduzidos dentro da companhia visando a redução dos estoques. Uma pressão mercadológica por melhor resultado operacional frente aos acionistas também pressionou por uma redução dos valores de estoque em cada uma das áreas produtivas, gerando assim o clássico conflito entre nível de estoque e custo de falta. Por ser um tópico com maior ênfase na empresa estudada, apenas mais recentemente, as políticas adotadas não costumam considerar as abordagens presentes

na literatura de estoques. Os parâmetros são colocados no sistema normalmente com base na experiência e intuição dos responsáveis pelo planejamento e controle das áreas. Na área de peças primárias subcontratadas, o uso da fórmula do lote econômico de compras é a política de planejamento empregada para determinar o quanto pedir. A segurança vem de um fator calculado em dias de demanda prevista, normalmente de 10 a 30 dias de demanda, conforme o custo do material.

Este trabalho então pretende contribuir com uma abordagem analítica de otimização, onde se espera um melhor resultado frente ao modelo atual adotado pela empresa. A confiança no sucesso deste modelo vem da revisão da literatura, com foco em buscar um melhor equilíbrio entre custos de falta e custos de estoque. Isso se encaixa perfeitamente na situação problema vivida pela empresa estudada e reproduzida por toda cadeia aeroespacial. Ou seja, as principais decisões do planejamento de estoques a serem apoiadas por esta abordagem são: a quantidade a ser pedida em cada período do horizonte de planejamento, dados o estoque de cada item no último período, os custos de estoque e falta do item e a distribuição de probabilidade da demanda do item no período. A abordagem consiste em determinar essas decisões periódicas de maneira a minimizar os custos envolvidos de estoque e falta dos itens, o que está descrito em mais detalhes nos próximos capítulos.

3. Referencial Teórico

3.1. Gestão de Estoques

Neste capítulo, apresenta-se uma breve revisão da teoria de estoques, com foco no material relacionado com o problema aqui estudado de estoques de peças primárias subcontratadas da indústria aeroespacial.

3.1.1. Importância e Tipos de Estoques

A questão dos estoques deve ser tratada como um dilema, ao mesmo tempo que são necessários e podem até representar uma certa vantagem competitiva. Eles custam recursos e incorrem em risco para as operações. Como apresentado em Krajewski *et al* (2009), a tarefa da gestão de estoques é equilibrar as vantagens e desvantagens de se manter estoques, que podem ser divididas em dois grupos:

- i. Pressões para manter estoques baixos:
 - Custos de capital
 - Custos de armazenagem
 - Encargos, seguros e perdas
- ii. Pressões para manter estoques altos:
 - Custos do pedido
 - Custos de *setup* (preparação)
 - Utilização de mão-de-obra e equipamentos
 - Custos de transporte
 - Pagamentos a fornecedores

Tipos de Estoques

A literatura tipificando estoques é ampla, e neste trabalho vamos utilizar principalmente as definições apresentadas em Hax e Candea (1984). Outros autores que também abordaram esta questão são: Slack *et al.* (2001), Krajewski *et al.* (2009), Silver *et al.* (1998) e Santoro (2006). Segundo Hax e Candea (1984) os estoques podem ser divididos em cinco categorias.

i. **Estoque no canal (*Pipeline Stock*):** Também chamado de estoque em processo, consiste em matérias que estão em processamento ou se movendo entre centros de trabalho, centros de distribuição ou até os consumidores

ii. **Estoque de Ciclo (*Cycle Stock*):** O estoque de ciclo pode ser fruto de duas restrições, economia de escala e restrição tecnológica. O caso da economia de escala ocorre quando o custo médio de se produzir, comprar ou transportar um estoque decresce à medida que o lote aumenta, sendo mais vantajoso operar com maiores quantidades por pedido. A restrição tecnológica ocorre quando não é possível produzir simultaneamente todos os produtos, e um exemplo típico é um reator químico que possui uma capacidade limitada e pode produzir um produto de cada vez. A Figura 3.1 representa graficamente um exemplo hipotético de três produtos com estoque de ciclo.

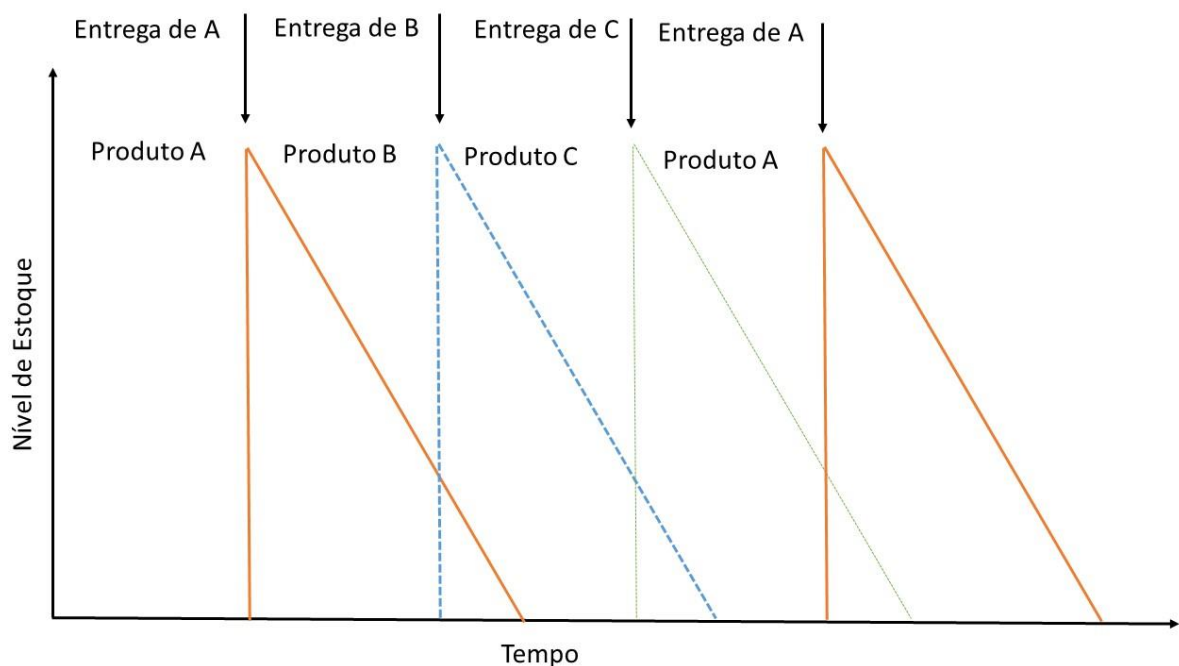


Figura 3.1– Exemplo de estoque de ciclo, adaptado de Slack *et al.*(2002)

iii. **Estoque Sazonal (*Seasonal Stock*):** O estoque sazonal é aquele construído nos períodos de baixa demanda de um produto para atender os picos de demanda. Sua utilização leva em conta o custo de se carregar estoques por um ou mais períodos e o custo de se aumentar a taxa de produção (compra de equipamentos, pagamento de horas

extras, entre outros). É um tipo de estoque de nivelamento para produtos que não possuem uma demanda constante ao longo do tempo, daí o nome sazonal.

iv. **Estoque de Segurança (*Safety Stock*):** Este estoque pode ser necessário por conta das incertezas nas demandas futuras. As demandas são variáveis aleatórias e previsões de demanda em geral possuem erros, logo se o planejamento não levar isto em conta, faltas podem ocorrer com frequência. Com o intuito de evitar custos de faltas, estoques de segurança são utilizados. Esses estoques não auxiliam apenas contra custos da falta, mas também para proteger das incertezas de fornecimento, quando estas apresentam um comportamento incerto no *lead time* de entrega dos fornecedores.

v. **Estoque por outros motivos (especulativo) (*Stock held for other reasons*):** Outros tipos de estoques são aqueles utilizados, por exemplo, por questões estratégicas de toda a operação, tais como: aproveitar o preço baixo de uma matéria-prima, descontos na quantidade comprada, antecipação frente a um aumento de preços, entre outras.

Definição Básica do modelo de estoque

Como descrito em Johnson e Montgomery (1974), um sistema de estoque pode ser representado como mostra a Figura 3.2, onde $E(t)$ é taxa de entrada de um item, $S(t)$ é a taxa de saída do item e $D(t)$ é taxa de demanda que influencia na taxa de saída e não é controlada.

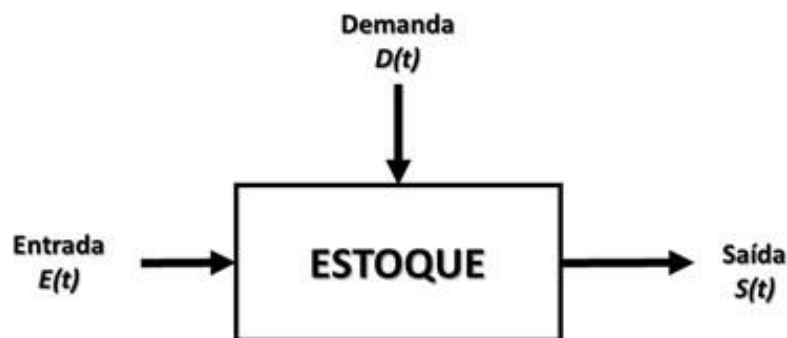


Figura 3.2– Representação de um sistema de estoque

Esta representação denota explicitamente o que é um estoque, ou seja, é o resultado da diferença entre as taxas de entrada e saída de determinado item ao longo do tempo, influenciado por uma variável não controlada (demanda). No caso da taxa de saída ser maior que a taxa de entrada, temos redução de estoque até eventualmente zero, e quando negativo, temos a falta de estoque; caso contrário, é gerado um acúmulo do item. O que se procura na prática é uma forma de gerenciar e garantir, segundo alguma estratégia de política de estoque, que haja um correto balanceamento entre os custos da falta e atendimento para um modelo de negócio.

3.1.2. Principais Modelos de Gestão de Estoques

Os modelos para políticas de estoque com enfoque quantitativo podem ser divididos inicialmente em dois grupos, os modelos determinísticos e os modelos probabilísticos. De acordo com Garcia et al (2006), modelos determinísticos são aqueles que não consideram incertezas, ou seja, assumem que não existem variáveis aleatórias ou que elas existem, mas suas distribuições de probabilidade são concentradas, tal que a utilização dos valores esperados (médias) é razoável. Este é um ponto de crítica ao uso destes modelos, pois sem considerar explicitamente a aleatoriedade presente em todos os processos, corre-se o risco do modelo não representar corretamente a realidade, tornando este inválido. No entanto, este tipo de modelo é útil em diversas situações, pois tem como vantagem ser normalmente baseado em uma formulação mais simples e que pode ser mais facilmente parametrizada, servindo assim de apoio para tomada de decisão, ou ainda, sendo utilizado como blocos de apoio em modelos mais complexos.

Os modelos estocásticos normalmente utilizam distribuições de probabilidade, representando um pouco melhor a realidade. Porém estes modelos, tem como ônus serem mais complexos para formular e resolver, normalmente por meio de heurísticas, pois a solução exata pode exigir um esforço computacional elevado.

Classificar os modelos de estoque não é uma tarefa simples, pois existem muitos modelos propostos e vários autores sistematizam de forma diferente. Em Johnson e Montgomery (1974), por exemplo, a classificação é feita com base primeiramente no número de itens, único ou múltiplos. Na sequência, os modelos são divididos em função da incerteza da demanda, estocástica ou determinística, e ainda com relação a frequência de revisões,

periódicas ou contínuas. Mesmo com todas estas divisões, diversas classes ficam ausentes e descobertas.

Uma outra classificação, proposta por Freire e Mesquita em Lustosa *et al.* (2008), é apresentada na Figura 3.3. Esta abordagem procura de forma hierárquica, estruturar os modelos de estoque, partindo do tipo de demanda, e seguindo pelo tipo de previsão e do tipo de revisão de estoques. Nota-se também que diversos outros modelos ficam descobertos por essa classificação.

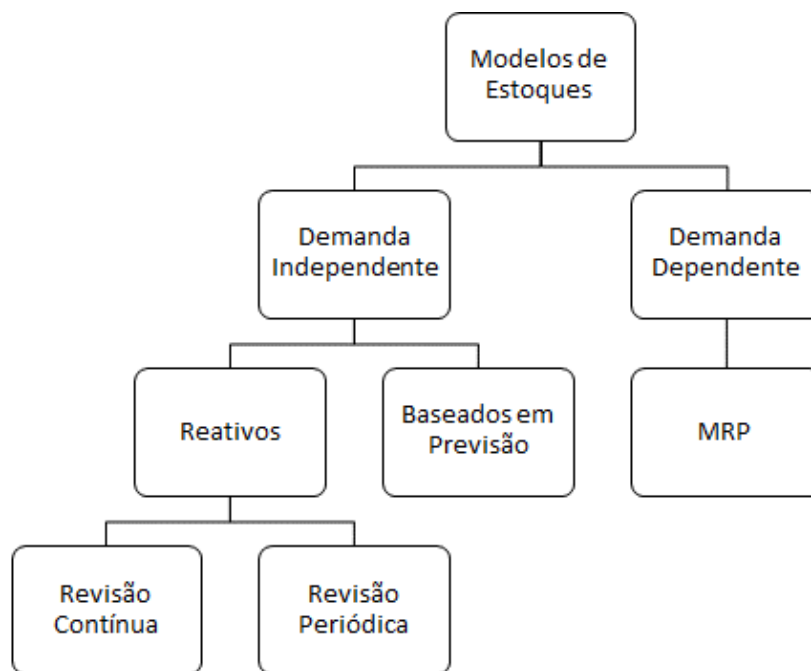


Figura 3.3 – Uma classificação dos modelos de estoque, adaptado de Lustosa *et al.* (2008)

Estes dois exemplos citados servem para demonstrar como é difícil e trabalhoso reunir em uma única revisão todos os modelos de estoque existentes. Neste trabalho utilizaremos a proposta feita por Santoro (2006), que reúne de forma abrangente diversas classes de modelos de estoque. Esta foi uma das sistematizações mais completas encontradas pelo autor durante suas pesquisas. No Quadro 3.1 temos a adaptação da classificação elaborado e apresentada em Santoro (2006), separando as classes dos problemas de gestão de estoques e suas respectivas subclasses.

Quadro 3.1 - Classificações dos modelos de estoque, adaptado de Santoro (2006)

CLASSES (quanto à/ao)	SUBCLASSES
Uso de previsões	Reativos Ativos
Frequência de revisão	Periódicos Contínuos
Variabilidade da demanda	Constante Variável
Incerteza da demanda	Determinístico Estocástico com distribuição conhecida Estocástico com distribuição desconhecida
Continuidade da Demanda	Discretos Contínuos
Atendimento da demanda	Sem permissão de faltas Com permissão de faltas, como atraso Com permissão de faltas, como não atendimento Com permissão de faltas, como atraso e não atendimento
Variabilidade da quantidade	Fixa Variável função de nível máximo e atual Variável função da previsão de demanda
Tempo de espera	Zero Positivo e constante Variável
Tempo de espera de emergência	Sem tempo de espera de emergência Com tempo de espera de emergência

Capacidade da oferta	Infinita Finita com taxa variável Finita com taxa constante Finita com remessa limitada por aquisição Finita com remessa limitada por período
Número de itens	Único item Múltiplos itens
Locais de Estocagem	Único Múltiplos
Estrutura dos itens	Sem estrutura Estrutura linear Estrutura em árvore
Horizonte de planejamento	Finito Infinito
Hipóteses sobre funções de custo	Lineares Lineares e fixos Convexas Outras
Outras Classificações	Perecíveis e não perecíveis Com e sem fração defeituosa Preços constantes e variáveis com quantidade Demanda dependente da quantidade em estoque Demanda crescente ou decrescente Custo de aquisição conjunto

3.1.3. Lote Econômico de Compra

Nesta seção é apresentada uma breve revisão sobre lote econômico de compra (LEC). A motivação de revisar este assunto reside no fato deste ser o modelo atualmente utilizado pela empresa estudada neste trabalho, com uma pequena modificação para cálculo

do estoque de segurança conforme apresentado no capítulo 4. Para Hillier e Lieberman (2001), o cenário mais comum encontrado pelos fabricantes, distribuidores e revendedores é o consumo do estoque ao longo do tempo e sua reposição pela chegada de um novo lote de unidades. Um simples modelo que representa esta situação é o modelo do Lote Econômico de Compra (*EOQ – Economic Order Quantity Model*). Este modelo assume que os parâmetros são determinísticos e não considera falta de estoque. Segundo Axsäter (2006), o modelo do Lote Econômico é o mais conhecido na área de controle de estoques. O modelo se baseia nos seguintes pontos:

- Demanda constante e continua
- Custo de pedido e de manter estoques é constante no tempo
- O tamanho do lote não precisa ser inteiro
- Toda a quantidade do lote é entregue ao mesmo tempo
- Faltas não são permitidas

As equações para solução deste modelo são dadas por:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2DP}{H}} \quad (3.1)$$

$$C^* = \sqrt{2PDH} \quad (3.2)$$

onde: D é a demanda do período, em unidades, P é o custo de colocação de um pedido ou de um *setup*, em \$ por lote, H é o custo para estocar uma unidade do item durante um período, em \$, Q^* é a quantidade do ótima do lote e C^* é o Custo total ótimo do pedido

A Figura 3.4 ilustra como se comporta o nível de estoque ao longo do tempo utilizando este modelo (Eq. 3.1) e (Eq. 3.2). Uma das críticas que este modelo sofre é justamente que, na realidade, o comportamento da demanda que influencia diretamente o nível de estoque em geral não é constante ao longo de um horizonte de planejamento, por outro lado é um método bastante simples de se utilizar e que pode auxiliar na tomada de decisão de forma rápida. Outra consideração que deve ser feita é que para casos com demanda não determinística, porém estacionária, os valores obtidos pela fórmula determinística são bastante robustos. A Figura 3.4 representa graficamente o nível de estoque ao longo do tempo para este modelo (comumente chamado de dente de serra).

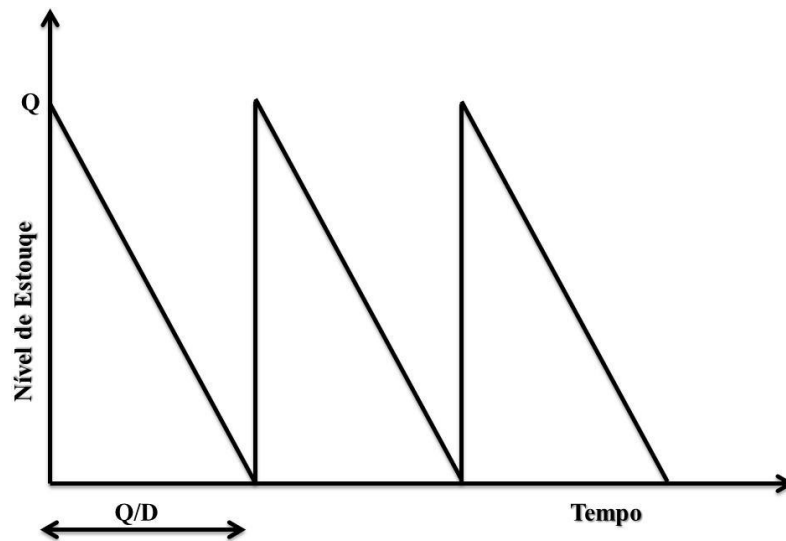


Figura 3.4 – Nível de Estoque ao longo do Tempo (adaptado de Axsäter (2006))

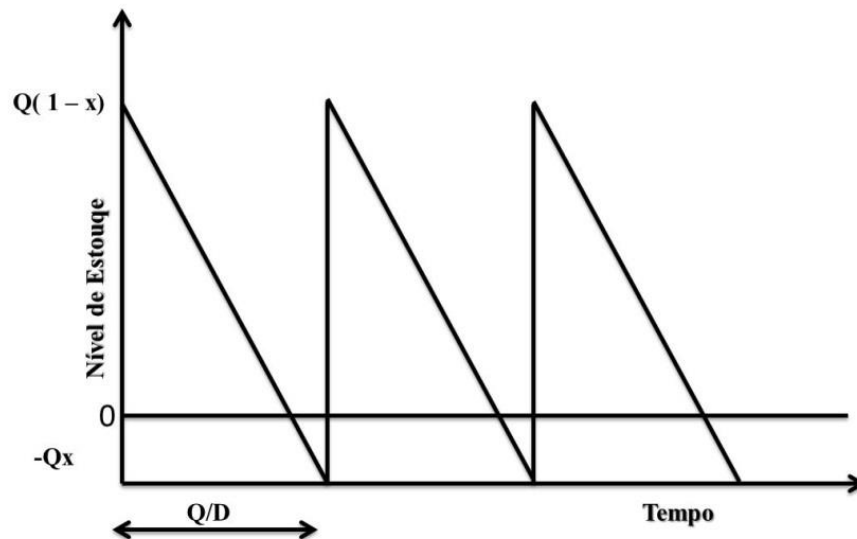
Lote Econômico com Faltas

Como descrito em Axsäter (2006), existe uma variação do lote econômico que procura representar outra condição comumente encontrada na prática, que é a falta (*backorder*). Quando o modelo admite falta, é necessário introduzir um custo de penalização para esta espera indesejada do cliente. O custo da falta é similar ao custo de se manter estoque, a diferença entre eles se dá entre a disponibilidade ou não do item para o cliente, ou seja, o custo da falta só é contabilizado quando o estoque fica negativo e o custo de manter estoque ocorre no caso inverso.

Uma consideração interessante observada em Axsäter (2006) é que, pelo fato da média do número de atrasos (*backorders*) ser igual a média de consumidores aguardando num período de tempo, tem-se que o número médio de *backorders* dividido pela demanda resulta no tempo médio de espera por uma unidade de demanda. Esta relação é válida num contexto muito mais geral dos processos estocásticos, representada pela fórmula de Little. Voltando ao modelo atual, seja: V o custo da falta por unidade e unidade de tempo. A equação que resolve este modelo, considerando esta restrição é dada por (solução de custo mínimo):

$$Q^* = \sqrt{\frac{2 DP (H + V)}{HV}} \quad (3.3)$$

$$C^* = \sqrt{\frac{2PD(HV)}{(H + V)}} \quad (3.4)$$



x = fração da demanda que está em *backorder*

Figura 3.5– Nível de Estoque ao longo do tempo admitindo faltas (adaptado de Axsäter)

Esta abordagem poderia ter sido utilizada pela empresa estudada, ao invés da abordagem anterior por considerar o custo de faltas no momento do cálculo do lote econômico. Este trabalho não irá explorar esta abordagem (3.3) e (3.4), pois o foco está no comparativo entre o modelo atual e o modelo do jornaleiro multiperíodo, que como é visto a seguir, é mais aderente ao problema da empresa. Fica aqui o registro para pesquisas futuras com o uso do lote econômico com faltas (3.3) e (3.4).

3.1.4. Outras abordagens

Os modelos descritos até agora ao longo deste capítulo abordaram alguns dos mais conhecidos e utilizados modelos de estoque, porém existem muitas outras abordagens para gestão de estoques, utilizando modelos, métodos e técnicas da pesquisa operacional. Essa literatura é vasta e alguns exames e revisões desses modelos podem ser encontradas em Johnson e Montgomery (1974), Axsäter(2006), Hax e Candea (1984), Santoro (2006), Freire

(2007), Gallego e Moon (1993), Vollman *et al.* (2006), apenas citando alguns entre muitos trabalhos.

Algumas técnicas utilizadas incorporam o conhecimento de outras ciências para modelar a realidade, como no trabalho de Schwartz e Rivera (2010), como pode ser observado na Figura 3.6, que utiliza a teoria do controle de processos da engenharia química para modelar um modelo de gestão de estoques. Neste trabalho os autores modelam o sistema de produção-estoque como uma analogia de um sistema de fluídos e utilizam a teoria do controle PID (*Proporcional-Integral-Derivativo*) para modelar o comportamento do estoque.

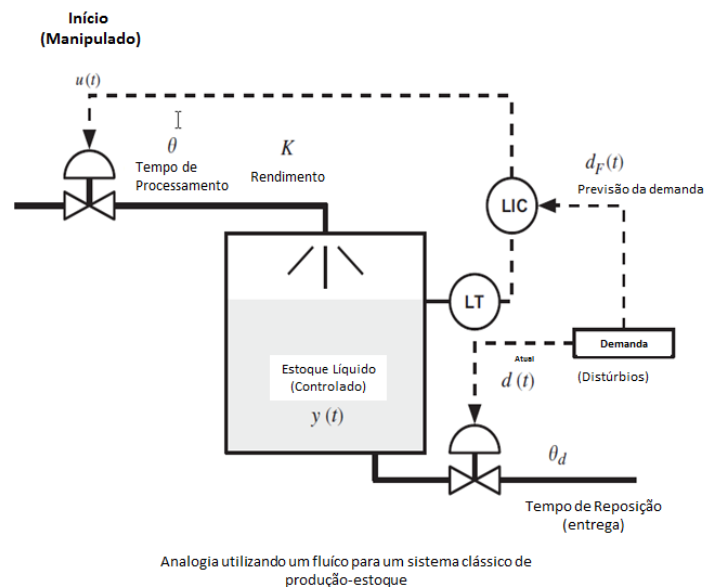


Figura 3.6 – Analogia utilizando um fluído para um sistema clássico de produção-estoque (Retirado de Schwartz e Rivera (2010))

No trabalho de Salcedo et al. (2013) também é explorada a abordagem do controle de processos, utilizando um modelo com dois graus de liberdade no controle de estoque de uma cadeia de suprimentos para evitar ou minimizar o efeito chicote. O interessante deste trabalho, além da abordagem de processos, é a abordagem com múltiplos elos na cadeia de suprimentos (*multi-echelon*), cada vez mais presente na literatura, como pode ser observado nos trabalhos de Aharon et al. (2009), Kiesmuller (2008) e Zhang et al. (2008).

Neste trabalho não iremos utilizar esses conceitos mais recentes, pois apesar de interessantes ainda são estudos incipientes e exploratórios, e ainda não tão difundidos como a literatura clássica de gestão de estoques. Mesmo com aplicações ainda pouco

difundidas, ficam aqui como registros para possíveis futuros trabalhos estas direções das pesquisas em gestão de estoques. A seguir revisaremos modelos de controle de estoques baseados no problema do jornaleiro, usado neste trabalho, conforme mencionado no primeiro capítulo.

3.2. Problema do Jornaleiro

Nesta seção é revisado um referencial teórico do clássico problema do jornaleiro (*newboy problem* ou *newsvendor problem*). A motivação desta revisão e seu detalhamento reside no fato de ser o foco do método de solução deste trabalho. A escolha por abordar tanto o caso monopérido como o multipérido advém da construção da extensão do raciocínio de um de um modelo para o outro, sendo possível comparar os pontos semelhantes e as diferenças, para uma melhor compreensão do leitor.

Conforme descrito em Hillier *et al* (2001), no problema clássico do jornaleiro um jornal diário pode carregar estoque por apenas um único dia, pois no dia seguinte a sua edição, ele estará ultrapassado e necessitará ser trocado por uma nova edição. Quando a demanda pelo jornal é uma variável aleatória (como assumido neste problema), o jornaleiro precisa decidir qual a quantidade que proporciona o melhor *trade-off* entre o custo potencial de uma compra acima da demanda (*overordering*) e do custo potencial de deixar de vender jornais pela falta de estoque (*underordering*). Por esta descrição representar bem a situação geral deste problema, ele é chamado de problema do jornaleiro, obviamente podendo ser aplicado para os mais diversos tipos de produtos que possuam a semelhança com este dilema (*trade-off*). De forma resumida, o problema do jornaleiro (*newboy problem* ou *newsvendor problem*), também citado na literatura como problema de período único (SPP – *Single-period problem*) consiste em determinar uma quantidade que maximize o lucro esperado (minimize o custo esperado) sob demanda probabilística.

O problema de período único assume que se houver qualquer sobra de estoque no final do período, um desconto de venda deverá ser aplicado ou, em alguns casos, um custo de descarte de produto (por exemplo produtos químicos que não podem simplesmente ser jogados fora e possuem um custo para descarte). Caso a quantidade solicitada (fabricada ou comprada) seja menor que a demanda, ocorrerá um desconto no lucro.

O problema do jornaleiro e suas variantes podem representar diversas situações reais e pode ser utilizado para auxiliar na tomada de decisão, por exemplo, nas indústrias: moda, materiais esportivos, produtos natalinos e, como apresentado neste trabalho, na indústria aeroespacial. Na literatura encontramos duas abordagens relacionadas para resolver o problema do jornaleiro monopériodo, a primeira busca minimizar o custo esperado total para evitar uma compra acima ou abaixo da demanda. A segunda maximiza o lucro esperado. Em ambos os casos, os valores são os mesmos, como relatado em Khouja (1999), e o que irá variar é apenas a notação do modelo para cada caso. Neste trabalho revisaremos apenas o caso do custo mínimo, pois a outra abordagem seria redundante, tendo em vista que ambos resultados são idênticos.

Caso Monoperíodo

Nesta seção apresentamos a abordagem para o problema do jornaleiro monopériodo. Esse é o caso mais difundido na literatura e também o mais estudado, com larga vantagem em número de publicações frente ao caso multiperíodo. A característica principal deste problema é determinar um lote de compra que possa maximizar o lucro em um período único, não sendo possível a sua venda no período seguinte. Existem diversos tipos de produtos que se encaixam neste problema, como, por exemplo: produtos para páscoa, vestuário para olimpíadas, produtos perecíveis, entre outros. Na literatura, existem diversas extensões deste problema de período único, abordando diversas combinações, como a influência de descontos no valor vendido, desconto por quantidade pedida, influência de promoções e muitas outras aplicações. A seguir revisamos o caso monopériodo, lembrando que o foco deste trabalho está no caso multiperíodo. Assim, o problema com período único aparece como uma introdução ao problema com múltiplos períodos deste trabalho.

Temos a seguir a abordagem clássica para o caso monopériodo na literatura, a abordagem que minimiza o custo esperado. Toda a dedução desta primeira parte do texto é baseada em Johnson e Montgomery (1974), que aborda o problema de custo mínimo. A abordagem do custo mínimo, é a mais encontrada na literatura. A premissa inicial é de se encontrar o menor valor esperado para o custo mínimo em um único período para um determinado item.

Considere a seguinte notação para o problema:

D = demanda durante o período de vendas, é uma variável aleatória contínua (VAC)

$f(D)$ = função densidade de probabilidade de D , assumida como conhecida

C = custo unitário variável de aquisição (produzir ou comprar)

R = quantidade a ser pedida (variável de decisão)

H = custo de carregamento de estoque por item, se $H < 0$ custo de descarte

V = custo de falta por item (ou custo de oportunidade, igual ao valor do item, por exemplo, se o item não é produzido e vendido, ele é perdido)

I = estoque inicial no período

K = custo médio do período que é função da política de estoques

Existem dois tipos de custos:

$$\text{Custo do excesso de estoque} = \xi(R, D) = \begin{cases} R - D, & \text{se } D < R \\ 0, & \text{se } D \geq R \end{cases}$$

$$\text{Custo da falta de estoque} = \psi(R, D) = \begin{cases} 0, & \text{se } D \leq R \\ D - R, & \text{se } D > R \end{cases}$$

O valor esperado do custo para o período consiste na soma dos custos de pedido, de manter estoque e da falta neste período. Assumindo o custo total esperado como $E\{K(R)\}$, e que o valor de estoque inicial é zero, podemos escrever:

$$E\{K(R)\} = C(R - I) + H \int_0^{\infty} \xi(R, D) f(D) dD + V \int_0^{\infty} \psi(R, D) f(D) dD$$

Seja $G(R)$ definida como a soma dos dois últimos termos acima, ou seja:

$$G(R) = H \int_0^R (R - D) f(D) dD + H \int_R^{\infty} 0 f(D) dD + V \int_0^R 0 f(D) dD + V \int_R^{\infty} (D - R) f(D) dD$$

Como $H \int_R^{\infty} 0 f(D) dD = 0$, quando $D \geq R$, e $V \int_0^R 0 f(D) dD =$

0, quando $D \leq R$, temos:

$$G(R) = H \int_0^R (R - D) f(D) dD + V \int_R^{\infty} (D - R) f(D) dD$$

A condição para que o custo esperado de estoque seja mínimo se dá na escolha de um R que minimize $C(R - I) + G(R)$, onde $R \geq I$. Portanto o valor ótimo de R , chamado de R^* , é solução de

$$\frac{dE\{K(R)\}}{dR} = 0$$

Aplicando a regra de Leibniz nesta derivada, temos que:

Regra de Leibniz geral:

$$\frac{\partial}{\partial y} \int_{a_1(y)}^{a_2(y)} h(x, y) dx = \int_{a_1(y)}^{a_2(y)} \frac{\partial h(x, y)}{\partial y} dx + h(a_2(y), y) \frac{\delta a_2(y)}{\delta y} - h(a_1(y), y) \frac{\delta a_1(y)}{\delta y}$$

Aplicada no primeiro termo de $G(R)$, $\int_0^R (R - D) f(D) dD$, temos:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial R} \int_0^R (R - D) f(D) dD &= \int_0^R 1 f(D) dD + (R - R) f(R) 1 - (R - 0) f(0) 0 \\ &= \int_0^R f(D) dD = F(R^*) \end{aligned}$$

Aplicada no segundo termo de $G(R)$, $\int_R^\infty (D - R) f(D) dD$, obtemos:

$$\frac{\partial}{\partial R} \int_R^\infty (D - R) f(D) dD = - \int_R^\infty f(D) dD = -(1 - F(R^*)) = F(R^*) - 1$$

Substituindo os valores encontrados, temos:

$$C + H \underbrace{\int_0^R f(D) dD}_{F(R^*)} + V \underbrace{\int_R^\infty f(D) dD}_{F(R^*)-1} = 0$$

que pode ser reescrita da seguinte forma:

$$C + F(R^*)(H + V) - V = 0$$

Isso leva ao seguinte resultado:

$$F(R^*) = \frac{V - C}{V + H}$$

Observa-se ainda que: $\frac{d^2 E\{K(R)\}}{dR^2} = (H + V)f(R) > 0$, ou seja, a solução de R^* da equação $F(R^*) = \frac{V-C}{V+H}$ leva a um mínimo global. Sendo equivalente a dizer que a função $G(R)$ é convexa. Portanto a política ótima é dada por:

$$\begin{cases} \text{Pedir}(R^* - I), & \text{se } R^* > I \\ \text{Não Pedir}, & \text{se } R^* \leq I \end{cases}$$

Portanto,

$$E\{K(R)\} = \text{custo de excesso} + \text{custo da falta} - \text{estoque}$$

Assumindo estoque inicial igual a zero, $I = 0$, temos:

$$\begin{aligned}
E\{K(R)\} &= (C + H) \int_0^R (R - D) f(D) dD + (V - C) \int_0^\infty (D - R) f(D) dD \\
\frac{dE\{K(R)\}}{dR} &= (C + H) \int_0^R f(D) dD - (V - C) \int_0^\infty f(D) dD = 0 \\
[(C + H) + (V - C)]F(R^*) - (V - C) &= 0 \\
F(R^*) &= \frac{V - C}{(V - C) + (C + H)} = \frac{V - C}{V + H} \\
F(R^*) &= \frac{V - C}{V + H} \tag{3.5}
\end{aligned}$$

ou seja, o valor ótimo R é aquele cuja distribuição acumulada da demanda é igual à razão de não produzir e incorrer em faltas, i.e., deixar de ganhar $V - C$ e a soma de, i.e., produzir e não vender, ou seja, incorrer em custo de estoque, $(V - C) + (C + H)$.

Note que por meio da fórmula fechada (3.5), o valor ótimo de R^* é obtido pela função inversa $F^{-1}\left(\frac{V-C}{V+H}\right)$, ou simplesmente encontrando-se o valor de R^* no gráfico de $F(R^*)$, para o valor $\frac{V-C}{V+H}$. Caso o valor de estoque inicial fosse maior que zero $I > 0$, o termo $-CI$ apareceria na equação de $E\{K(R)\}$. O resultado final não se alteraria, pois $\frac{d(-CI)}{dR} = 0$ e vale apenas para $R \geq I$.

Exemplo numérico: Como exemplo e para efeito de comparação com o modelo multiperíodo estudado neste trabalho, apresentamos a seguir um simples exemplo numérico retirado de Johnson e Montgomery (1974), para o modelo monoperíodo (3.5). Suponha que a demanda de um item seja uniformemente distribuída entre 0 e 10, ou seja, $f(D) = 0,10, 0 \leq D \leq 10$. O custo de falta é de \$20 por unidade, o custo de se manter estoque é de \$10 por unidade, e o custo de aquisição é de \$10 por unidade. Deseja-se determinar a política ótima R^* , considerando um único período. Como já observado, usando (3.5):

$$F(R^*) = \frac{V - C}{V + H} = \frac{20 - 10}{20 + 10} = \frac{1}{3} = 0,333$$

E,

$$F(R^*) = \frac{R^*}{10}$$

Então,

$$0,333 = \frac{R^*}{10}$$

$$R^* = 3,33 \approx 4$$

Portanto a política ótima seria pedir 4 unidades por período. Este exemplo é retomado na seção adiante que trata do caso multiperíodo, com o intuito de comparar e avaliar os resultados obtidos. Convém observar que o problema do jornaleiro monopеріodo pode ser facilmente estendido para o caso com custo de colocação de pedido, $P > 0$, conforme mostrado, por exemplo, em Johnson e Montgomery (1974).

Caso Monoperíodo – Distribuição Livre

Uma outra abordagem brevemente descrita neste trabalho trata do trabalho desenvolvido por Scarf (1958) e retomado por Gallego e Moon (1993). Uma das dificuldades operacionais do problema do jornaleiro é com relação ao cálculo da distribuição de probabilidade da demanda. Em muitos casos, não se trata apenas da dificuldade em calcular esta função, mas sim de não possuir dados suficientes que possam auxiliar na tomada de decisão. Nestes casos, pode-se aplicar a abordagem proposta por Scarf (1958), onde com uma média e um desvio padrão que podem ser baseados na experiência de especialistas no assunto, por exemplo, torna-se possível estimar a política ótima pela fórmula apresentada, com parâmetros de distribuição livre. Este cálculo é provado no trabalho de Scarf (1958) e reapresentado no trabalho de Gallego e Moon (1993). Existe uma extensão abordada por Gallego e Moon (1993), ampliando os resultados desta mesma analogia para o caso multiperíodo, esta abordagem não será aprofundada neste trabalho, mas pelo seu valor e simplificação do problema, fica registrada neste trabalho para motivar possíveis pesquisas futuras para o caso de múltiplos períodos.

3.3. Problema do Jornaleiro – Caso Multiperíodo

Esta seção se dedica a revisar o problema do jornaleiro multiperíodo, que é o foco e a proposta deste trabalho, sua aplicação no setor de peças subcontratadas da indústria aeroespacial. Conforme Johnson e Montgomery (1974), uma extensão natural do modelo monopеріodo é planejar com um horizonte multiperíodo. Considere uma situação com um

horizonte de planejamento com N períodos, e assume que uma revisão de estoque seja feita no início de cada período, que o *lead time* de entrega seja zero, as faltas vão para o *backlog* (exceto no último período N , quando ocorre uma perda), e a demanda em cada um dos períodos é independente e possua a mesma distribuição de probabilidade $f(D)$. O custo de aquisição C , independe da quantidade pedida, o custo de se manter o estoque por unidade é H , e o custo da falta por unidade é V . Por fim temos um fator de desconto do custo α , $0 < \alpha < 1$, onde $\alpha = (1 + k)^{-1}$, onde k é a taxa de interesse por período.

Assumindo uma política de pedir até R_j , isto é, se I_j é o valor de estoque no início do período j , então a política será

$$\begin{cases} \text{Pedir } R_j - I_j, \text{ se } R_j > I_j \\ \text{Não Pedir, se } R_j \leq I_j \end{cases}$$

É possível, conforme descrito em Johnson e Montgomery (1974), demonstrar que na ausência de um custo fixo de pedido ($P = 0$), a política de pedir até R_j em cada período é ótima. O custo no período j será:

$$\begin{cases} C(R_j - I_j) + G(R_j), \text{ se } R_j > I_j \\ G(I_j), \text{ se } R_j \leq I_j \end{cases}$$

onde $G(R_j)$ é a soma dos custos de manter estoques e dos custos de faltas no período j :

$$G(R_j) = H \int_0^{R_j} (R_j - D)f(D) dD + V \int_{R_j}^{\infty} (D - R_j)f(D) dD$$

O problema de otimização então é encontrar uma política de estoque $R_1^*, R_2^*, R_3^*, \dots, R_N^*$, para cada período $j = 1, 2, 3, \dots, N$, onde os custos esperados a serem descontados do lucro sejam minimizados. A equação é dada por:

$$K = E \left\{ \sum_{j=1}^N \alpha^{j-1} [C(R_j - I_j) + G(R_j)] \right\}$$

Sendo K o custo médio total da soma dos períodos $1, 2, 3, \dots, N$. Técnicas de programação dinâmica podem ser aplicadas para minimizar a equação descrita acima. A fórmula recursiva, conforme apresentado em Johnson e Montgomery (1974), da programação dinâmica é dada por:

$$K_j(I_j) = \min_{R_j \geq I_j} \{ C(R_j - I_j) + G(R_j) + \alpha E[K_{j+1}(R_j - D)] \} \quad (3.6)$$

$, j = 1, 2, \dots, N \text{ onde } K_{N+1}(I_{N+1}) = 0$

Em que $K_j(I_j)$ é o custo mínimo esperado total a partir do período j até o último período N , quando o estoque inicial do período j é I_j , e o custo total a partir do período $j + 1$ é:

$$E[K_{j+1}(R_j - D)] = \int_0^{\infty} K_{j+1}(R_j - D)f(D) dD$$

Note que $K_j(I_j)$ é o custo mínimo esperado a ser descontado nos períodos $j, j + 1, \dots, N$, quando o estoque no início do período j é I_j . Note também que $C(R_j - I_j) + G(R_j)$ é o valor do custo no período j e $K_{j+1}(R_j - D)$ é o custo mínimo atingível no último período $N - j$ em função de uma decisão no período j e a demanda que ocorre no período j . Pode-se então utilizar a fórmula recursiva da equação (3.6). Para o período N , é computado $K_N(I_N)$, com $K_{N+1}(I_{N+1}) = 0$. Para o período $N - 1$, computa-se $K_{N-1}(I_{N-1})$, com $K_N(I_N)$, e assim sucessivamente até obtermos $K_1(I_1)$ para o período 1.

Exemplo numérico: A seguir apresenta-se um exemplo ilustrativo (também extraído de Johnson e Montgomery (1974)), para mostrar a dificuldade de se trabalhar com o caso multiperíodo, neste exemplo com apenas dois períodos.

Considere que a demanda de um item em dois períodos seja uniformemente distribuída de $0 - 10$, $f(D) = 0.10, 0 \leq D \leq 10$. O custo de compra é de $C = \$2$ por item. Se houver estoque no final de um período, paga-se uma taxa de $H = \$6$ por item. O custo da falta é de $V = \$10$ por item. Deseja-se determinar uma política ótima R_1^* e R_2^* de dois períodos para $\alpha = 1$. Usando a fórmula (3.6) e partindo-se do período $j = 2$, tem-se que $K_3(I_3) = 0$ para qualquer I_3 , e portanto:

$$K_2(I_2) = \min_{R_2 \geq I_2} \{2(R_2 - I_2) + G(R_2) + 0\}$$

$$F(R_2^*) = \frac{V - C}{V + H} = \frac{10 - 2}{10 + 6} = 0,5$$

Assim, R_2^* é dado por: $R_2^* = 5$

$$\begin{aligned} G(R) &= 6 \int_0^R (R - D)(0,1) dD + 10 \int_R^{10} (D - R)(0,1) dD \\ &= 0,8R^2 - 10R + 50 \end{aligned}$$

Assim,

$$E[K_2(R_1 - D)] = \int_0^{10} K_2(R_1 - D)(0,1) dD$$

$$\begin{aligned}
&= \int_0^{R_1 - R_2^*} G(R_1 - D)(0,1) dD + \int_{R_1 - R_2^*}^{10} [C(R_2^* - R_1 + D) + G(R_2^*)](0,1) dD \\
&= \int_0^{R_1 - 5} \{0,8(R_1 - D)^2 - 10(R_1 - D) + 50\}(0,1) dD + \int_{R_1 - 5}^{10} \{2(5 - R_1 + D) + 50 \\
&\quad - 10(5) + 0,8(5)^2\}(0,1) dD \\
&= \frac{8}{300}R_1^3 - \frac{4}{10}R_1^2 - \frac{1100}{30}
\end{aligned}$$

Considerando o período 1, pela equação (3.6) temos:

$$\begin{aligned}
K_1(I_1) &= \min_{R_1 \geq I_1} \left\{ 2(R_1 - I_1) + 0,8(R_1)^2 - 10R_1 + 50 + \frac{8}{300}R_1^3 - \frac{4}{10}R_1^2 - \frac{1100}{30} \right\} \\
&= \min_{R_1 \geq I_1} \left\{ -2I_1 + \frac{40}{3} - 8R_1 + \frac{4}{10}R_1^2 + \frac{8}{300}R_1^3 \right\}
\end{aligned}$$

Derivando $K_1(I_1)$ em função de R_1 e igualando a zero, obtemos:

$$-10 + \frac{8}{10}R_1 + \frac{24}{300}R_1^2 = 0$$

Cuja solução positiva é $R_1^* = 7,25$. Portanto, o lote ótimo a ser solicitado é de 7,25 unidades, caso o estoque inicial não exceda 7,25 unidades. E retornando ao segundo período, caso no início desse a quantidade em disponível não exceda 5 unidades, pedir então 5 unidades.

Mesmo para valores pequenos de N , a formulação por programação dinâmica é computacionalmente difícil de ser tratada. Entretanto, uma aproximação pode ser obtida de forma relativamente simples, considerando uma versão do modelo com horizonte infinito. Sendo $N \rightarrow \infty$, uma analogia razoável da equação 4 é a equação funcional:

$$K(I) = \min_{R \geq I} \{C(R - I) + G(R) + \alpha E[K(R - D)]\}$$

Onde $0 < \alpha < 1$, sendo $\alpha < 1$ para garantir que $\alpha E[K(R - D)]$ seja finito. O valor ótimo de R é determinado por:

$$\frac{dK(I)}{dR} = C + H \int_0^R f(D) dD - V \int_R^\infty f(D) dD + \alpha \int_0^\infty \frac{dK(R - D)}{dR} f(D) dD = 0$$

Porém, como toda unidade em estoque no início de um período gera um decréscimo de C no custo do período, então a solução ótima de R^* fica:

$$C + H \int_0^R f(D) dD - V \int_R^\infty f(D) dD - \alpha C \int_0^\infty f(D) dD = 0$$

Ou

$$C + H F(R^*) - V(1 - F(R^*)) - \alpha C = 0$$

Isolando-se $F(R^*)$, obtém-se

$$F(R^*) = \frac{V - C(1 - \alpha)}{V + H} \quad (3.7)$$

Logo, se o número de períodos no horizonte de planejamento for suficientemente grande, o problema pode ser resolvido por esta aproximação. Autores tem mostrado que mesmo para problemas com três ou quatro períodos esta solução aproximada R^* , pode ser satisfatória para aproximar a política ótima $R_1^*, R_2^*, R_3^*, \dots, R_N^*$. Neste caso, aproxima-se $R_1^* = R_2^* = R_3^* = \dots = R_N^* = R^*$. No exemplo numérico a seguir será mostrada a resolução por esta aproximação, o $R^* = 6$, que está entre os dois valores de cada período da programação dinâmica 5 e 7,25. Convém notar que a expressão (3.7) é similar à expressão (3.5) para o caso monopérido, exceto pelo termo $(1 - \alpha)$ no numerador.

Exemplo numérico: Como abordado no caso monopérido anteriormente, retomamos o exemplo numérico apresentado na seção 3.2, agora considerando o problema para múltiplos períodos. Suponha a demanda de um item uniformemente distribuída entre 0 e 10, ou seja, $f(D) = 0,10, 0 \leq D \leq 10$. O custo de falta é de \$20 por unidade, o custo de se manter estoque é de \$10 por unidade, e o custo de aquisição é de \$10 por unidade. O fator de desconto, ou penalidade pelo custo de oportunidade, é $\alpha = 0,8$. Admitimos o horizonte de planejamento longo o suficiente para utilização da aproximação apresentada acima. Como já observado, usando (3.7):

$$F(R^*) = \frac{V - C(1 - \alpha)}{V + H} = \frac{20 - 10(1 - 0,8)}{20 + 10} = \frac{18}{30} = 0,6$$

E,

$$F(R^*) = \frac{R^*}{10}$$

Então,

$$0,6 = \frac{R^*}{10}$$

$$R^* = 6$$

Portanto a política ótima seria pedir 6 unidades por período. Observa-se que o valor é distinto do obtido no caso monopérido, que na ocasião foi de $R^* = 4$ unidades. Esta

diferença ocorre por conta do fator de desconto, ou chamado custo de oportunidade. Se calcularmos o problema com o fator de desconto sendo $\alpha = 0$, obter-se-ia o mesmo resultado do caso monopérido conforme equação (3.5). Convém observar que: $R^* = 6 \geq R_1^* \geq R_2^* \geq R_3^* \geq R_4^* \geq R_5^* = 4$, onde $R_1^*, R_2^*, R_3^*, R_4^*, R_5^*$ seriam as quantidades ótimas da política dos 5 períodos.

É descrita uma outra extensão em Johnson e Montgomery (1974), abordando o problema do jornaleiro multiperíodo com custo de colocação de pedido, ou seja, $P > 0$. A formulação desse problema também faz uso da programação dinâmica para encontrar a solução ótima, porém diferente do caso onde $P = 0$, não é possível obter uma solução com forma fechada. Assim, para esta condição é necessário utilizar técnicas de programação dinâmica para resolver o problema, como já demonstrado neste trabalho dificulta bastante sua obtenção. Para este trabalho utilizamos o modelo simplificado com $P = 0$, pois mesmo o modelo atual da empresa utilizando lote econômico que considera $P > 0$, o valor de P quando comparado aos outros parâmetros de custo do problema é extremamente pequeno, o que não afeta o resultado final e só dificultaria o cálculo dos itens e conseqüentemente sua adoção pela empresa.

3.4. Aplicações do problema do jornaleiro

A seguir apresenta-se o resultado da revisão da literatura sobre o tema revisão periódica baseado no problema do jornaleiro. A pesquisa foi realizada principalmente no portal de periódicos da CAPES. Outras plataformas também foram utilizadas para pesquisa, como: Scopus, Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP, Biblioteca Digital de Teses e Dissertações - BCo/UFSCar entre outras.

Num primeiro momento, as palavras-chaves utilizadas no portal de periódicos da CAPES para pesquisa foram: Problema do jornaleiro multiperíodo, *Multiperiod Newsboy problem* e *Multiperiod Newsvendor problem*. Foram encontrados um número muito pequeno de trabalhos sobre o tema, sendo 21 ocorrências para *Multiperiod Newsboy Problem*, 36 *Multiperiod Newsvendor Problem* e nenhuma ocorrência para Problema do jornaleiro multiperíodo.

Quadro 3.2 – Exemplo do resultado da busca realizada

PERIODICO
Comptes Rendus Mathematique(1)
European Journal of Operational Research (3)
INFORMS Journal on Computing(1)
International Journal of Production Economics(1)
M&Som-Manufacturing & Service Operations Management(4)
Management Science (3)
Management science : journal of the Institute for Operations Research and the Management Sciences(2)
Manufacturing & Service Operations Management(5)
Manufacturing & service operations management : M & SOM(4)
Manufacturing and Service Operations Management(4)
Mathematics Of Operations Research(4)
Naval Research Logistics(1)
Operations Research(11)
Operations research : the journal of the Operations Research Society of America(3)
Operations Research Letters(1)
Production and Operations Management(1)

Então as palavras-chaves foram alteradas para: Problema do jornaleiro, *Newsboy problem* e *Newsvendor problem*; retirando a palavra multiperíodo. Desta forma os resultados foram muito mais abrangentes. Com essa nova busca, foram obtidos os seguintes resultados: 1.443 ocorrências para *Newsvendor Problem*, 828 ocorrências para *Newsboy Problem* e 6 para problema do jornaleiro. Estas últimas seis ocorrências foram descartadas por não terem qualquer relação com o tema (artigos de outras áreas do conhecimento).

Foi possível verificar que o problema multiperíodo ainda é pouco explorado na literatura, sendo muito mais difundido o caso clássico monopерíodo. Dentre todos os resultados, destacam-se dois artigos importantes, pois ambos, apesar de tratarem apenas do caso monopерíodo, trazem uma revisão da literatura sobre o problema do jornaleiro.

O primeiro artigo, Khouja (1999), traz uma completa revisão da literatura sobre o tema, utilizando um total de 92 trabalhos sobre o tema. Inicia apresentando a formulação clássica do problema, com o objetivo de realizar o *trade-off* entre custo de falta e o custo de excesso de estoque. Como modelo de organização e taxinomia para classificar algumas extensões encontradas na literatura sobre o problema, ele utiliza uma proposta em dividir os temas em 11 categorias sendo:

1. Extensões para diferentes objetivos
2. Extensões para diferentes políticas de preços e descontos de fornecedores
3. Extensões para diferentes políticas de preços e descontos do “jornaleiro”
4. Extensões para rendimentos aleatórios
5. Extensões para diferentes tipos de informações sobre a demanda
6. Extensões para restrições de multiprodutos
7. Extensões para multiprodutos com substituição
8. Extensões para sistemas de vários elos (*multi-echelon*)
9. Extensões para modelos com diversas localidades
10. Extensões para modelos com mais de um período de preparação para temporada de vendas
11. Outras extensões

De forma bastante resumida, as extensões para diferentes objetivos podem ser descritas como variações do problema clássico, onde nem sempre minimizar os custos ou maximizar o valor esperado do lucro reflete a realidade. Por exemplo, maximizar a probabilidade de se atingir uma meta de lucro pode ser mais consistente com as ações gerenciais, dependendo da empresa ou organização.

As extensões para diferentes políticas de preços e descontos de fornecedores podem ser descritas como soluções para o problema onde se deseja determinar a quantidade a ser pedida frente a diferentes tipos de descontos, por quantidade, por exemplo, oferecidos pelos fornecedores.

Nas extensões para diferentes políticas de preços e descontos do “jornaleiro”, aborda-se o caso que a demanda é dependente do preço, ou seja, a demanda esperada é uma função do preço do produto. Assim, o objetivo é encontrar o preço ótimo com o objetivo de maximizar o lucro.

Para extensões de rendimentos aleatórios, existem uma série de suposições adotadas na literatura, como, por exemplo, parte de um lote ser defeituoso, não podendo ser comercializado e sua devolução é feita com custeio do fornecedor, afetando assim o quanto pedir e o lucro esperado. Outra abordagem é com duas fontes de fornecimento praticando preços e fornecimentos distintos, tornando assim decisões do problema não só quanto pedir, mas também de quem pedir.

Com relação as extensões para diferentes tipos de informações sobre a demanda, tem-se os casos onde a demanda muitas vezes não é conhecida, ou não existem parâmetros específicos de uma distribuição. Para tratar este problema, temos a contribuição de Gallego e Moon (1993) para simplificação da prova da regra de Scarf, que assume um limite inferior para o valor esperado do lucro em função da pior distribuição possível.

As extensões para restrições de multiprodutos abordam as questões envolvendo mais de um produto e suas restrições acopladas. São apresentados possíveis métodos de resolução através do trabalho de Hadley e Within (1963) que criaram dois algoritmos para resolver este tipo de problema. São apresentados também os trabalhos que contemplam as limitações desta abordagem.

Já nas extensões para multiprodutos com substituição, a hipótese apresentada é que consumidores podem substituir o produto estudado por um outro no caso de falta, podendo tanto ser do mesmo vendedor como de um outro. Entre os trabalhos apresentados, se destaca o de Parlar (1988), em que existem três hipóteses: a falta de cooperação entre os competidores, mas sem a tentativa de um prejudicar intencionalmente o outro; um modelo que considera a tentativa irracional de um vendedor prejudicar o outro mesmo que isto comprometa seu lucro esperado; e uma terceira com total cooperação entre os vendedores, onde não existe penalidade no lucro esperado.

A revisão de Khouja(1999), apresenta ainda as extensões para sistema de múltiplos elos (*multi-echelon*) ou estágios de produção/distribuição e são citados os artigos que abordam o tema. As principais abordagens descritas tratam de modelos que selecionam níveis ótimos de estoque para componentes de itens ATO (*assemble-to-order*).

São apresentadas ainda as extensões para modelos com múltiplas localidades, com duas subdivisões: Todas as localidades possuem a mesma temporada de vendas; as temporadas de vendas são distintas para cada localidade.

Nas extensões para modelos com mais de um período de preparação para temporada de vendas, a ideia por trás destes modelos reside na possibilidade de se produzir ou comprar durante diversos períodos antes da temporada de vendas, que ocorrerá em um único período. Portanto, a principal questão a ser respondida por estes modelos é qual deve ser o plano de produção dos itens fabricados e qual a política de compras para os itens adquiridos, durante os períodos que antecedem a temporada de vendas.

Por fim, são apresentadas as chamadas outras extensões, tendo como exemplo o modelo proposto por Pfeifer (1989) sobre descontos em passagens aéreas com o intuito de se atrair demanda e assim aumentar o valor esperado pelo lucro. Outro exemplo trata da questão de vendas antecipadas para temporada de eventos esportivos, tendo como benefício um aumento na previsão de demanda e com isto um maior valor esperado para o lucro.

Em particular, Khouja (1999) comenta que muitas extensões para o problema de período único (*SPP*) foram propostas, porém são poucos os trabalhos que comparam os resultados entre estas diversas variantes. Ele também comenta que o interesse pelo problema do jornaleiro monopériodo tem aumentado, podendo ser atribuído em parte pelo aumento das indústrias de serviço, onde pode ser largamente aplicado, como no caso de companhias aéreas, por exemplo. Outro fator atribuído a isto é com relação aos avanços tecnológicos, reduzindo o ciclo de vida dos produtos e tornando mais relevante a abordagem do problema de período único. Como sugestão para pesquisas futuras são destacadas a relação entre o ponto ótimo de reposição e as políticas de desconto, a questão de produtos substitutos pode ser melhor explorada, e uma outra extensão relacionando o efeito de campanhas publicitárias afetando a demanda.

Quase quinze anos após a publicação do artigo de Khouja (1999), outros autores realizaram novas revisões bibliográficas sobre o tema. Por exemplo, o trabalho de Qin, Wang *et al.* (2011) parte da revisão feita uma década antes por Khouja(1999), e revisa mais 20 trabalhos sobre o tema, incluindo algumas lacunas deixadas no trabalho anterior, sendo:

1. Comportamento da demanda por fatores como: preço, esforços de *marketing* ou quantidade em estoque disponível pelo vendedor
2. Efeito do desconto por quantidade
3. Perfil de risco do comprador

Esse artigo, assim como seu antecessor, contém várias citações a trabalhos realizados nestas três principais áreas, mas não é tão completo como o pioneiro, tendendo ser mais uma atualização sobre o assunto em relação ao pioneiro. Um ponto importante deste artigo são as discussões de oportunidade para pesquisas futuras. Por exemplo, com relação a restrições de capacidade dos fornecedores, um assunto pouco considerado em todos os trabalhos pesquisados, principalmente o fator de decisão sobre moderar a capacidade, ou seja, aumentar ou reduzir seu valor.

Outra sugestão de pesquisa futura é com relação a integração, ou fusão, tanto dos valores probabilísticos de demanda como dos valores probabilísticos do quanto pedir. A ideia por trás destes modelos é avaliar o comportamento dos sistemas sob circunstâncias probabilísticas de fornecimento (nível de serviço) dos fornecedores e como este fator está relacionado com a demanda.

Outra vertente proposta é com relação a assumir que o *lead time* de fornecimento é igual a zero, o que nem sempre corresponde à realidade, portanto como esta distribuição probabilística de *lead time* influencia no comportamento dos compradores é uma questão também a ser explorada por pesquisas futuras.

Os autores ainda comentam sobre o problema do jornaleiro multiperíodo, citando como sugestão para revisão de literatura Silver *et al.* (1998). Este livro apresenta no capítulo 10, em sua seção 5, uma breve revisão sobre o caso multiperíodo, mas não chega a preencher uma página completa. Este caso ilustra bem como o problema do multiperíodo tem sido pouco explorado na literatura pela área de gestão de operações. Outros tópicos interessantes para trabalhos futuros seriam abordar modelos com decisões de variáveis de preço, esforços de *marketing*, e mudança na quantidade pedida, o que também parecem bastante relevantes para estes problemas.

Outros trabalhos foram encontrados na literatura sobre o problema do jornaleiro, sendo a grande maioria para o caso monoperíodo e suas diversas aplicações. Nesta revisão apresentamos estes dois artigos por compilarem de forma sistematizada o universo deste problema. Para problemas multiperíodo, não foram encontrados trabalhos aplicados, apenas abordagens com modelagens matemáticas, como o trabalho de Matsuyama (2006) onde ele procura generalizar o problema do jornaleiro multiperíodo.

Neste capítulo foi apresentada uma revisão da literatura sobre os principais modelos utilizados neste trabalho. Conforme descrito neste e nos capítulos anteriores, o modelo do jornaleiro multiperíodo captura de forma singular a problemática atual vivida pelo setor de peças primárias da indústria aeroespacial, por balancear de forma otimizada o custo de falta e custo de estoque para o cálculo do ponto de reposição. Acredita-se que o desempenho desta abordagem é melhor do que a política atual utilizada pela empresa, o cálculo por lote econômico. As simplificações assumidas no problema do jornaleiro, sendo $P = 0$ e $\tau = 0$, são aceitáveis, pois como já descrito, o custo de colocação de pedido é um valor muito pequeno frente aos demais custos envolvidos. Quanto ao *lead time* em regime

conforme são considerados os itens estudados, estes valores são múltiplos dos períodos, portanto não afetam de maneira importante o resultado calculado.

4. Aplicação da Abordagem e Análise dos resultados

Neste capítulo inicialmente é discutida a forma de coleta dos dados do problema estudado, a classificação destes dados e a escolha dos itens do estudo. Em seguida a abordagem analítica de gestão de estoques, baseada no problema do jornaleiro multiperíodo revisado no capítulo anterior, é aplicada e os resultados obtidos são apresentados e analisados.

O objetivo deste estudo, como já apresentado anteriormente, é propor e avaliar uma abordagem de otimização de estoques representada pelo modelo de revisão periódica multiperíodo para o setor de peças primárias subcontratadas da indústria aeroespacial. Neste capítulo, o modelo utilizado pela empresa é comparado com o modelo proposto neste trabalho. As comparações são baseadas nos custos tanto da falta como do excesso de estoque, e também por meio de uma simulação de Monte Carlo, com situações de demandas simuladas aleatoriamente nos múltiplos períodos. Espera-se encontrar um melhor desempenho para ao menos alguns itens, tendo em vista que o modelo hoje utilizado pela empresa trabalha com um nível de uma segurança muito elevado, desprezando em grande parte características de distribuição da demanda. Caso a pesquisa tenha sucesso no seu propósito, este modelo poderá ser considerado para aplicação na prática, para auxiliar na tomada de decisão dos gestores responsáveis por esta atividade nesta e em outras empresas deste setor.

Primeiramente é apresentada a forma de coleta dos dados necessários para a execução desta pesquisa e sobre como foram obtidos. Na sequência, discute-se o tratamento que estes dados receberam, a classificação sugerida e a escolha da amostra para execução dos testes (simulações). Com os candidatos selecionados, foram feitas as análises da distribuição de probabilidade e realizados os cálculos, tanto para o modelo atual, baseado na fórmula do lote econômico adotado pela empresa, quanto para o modelo baseado no dilema do jornaleiro proposto neste trabalho. As políticas de estoque obtidas foram então simuladas usando Monte Carlo. Após as rodadas do simulador, os resultados foram avaliados e tabulados neste trabalho. A Figura 4.1, ilustra de forma resumida as etapas relatadas neste capítulo, para permitir uma visão mais geral.

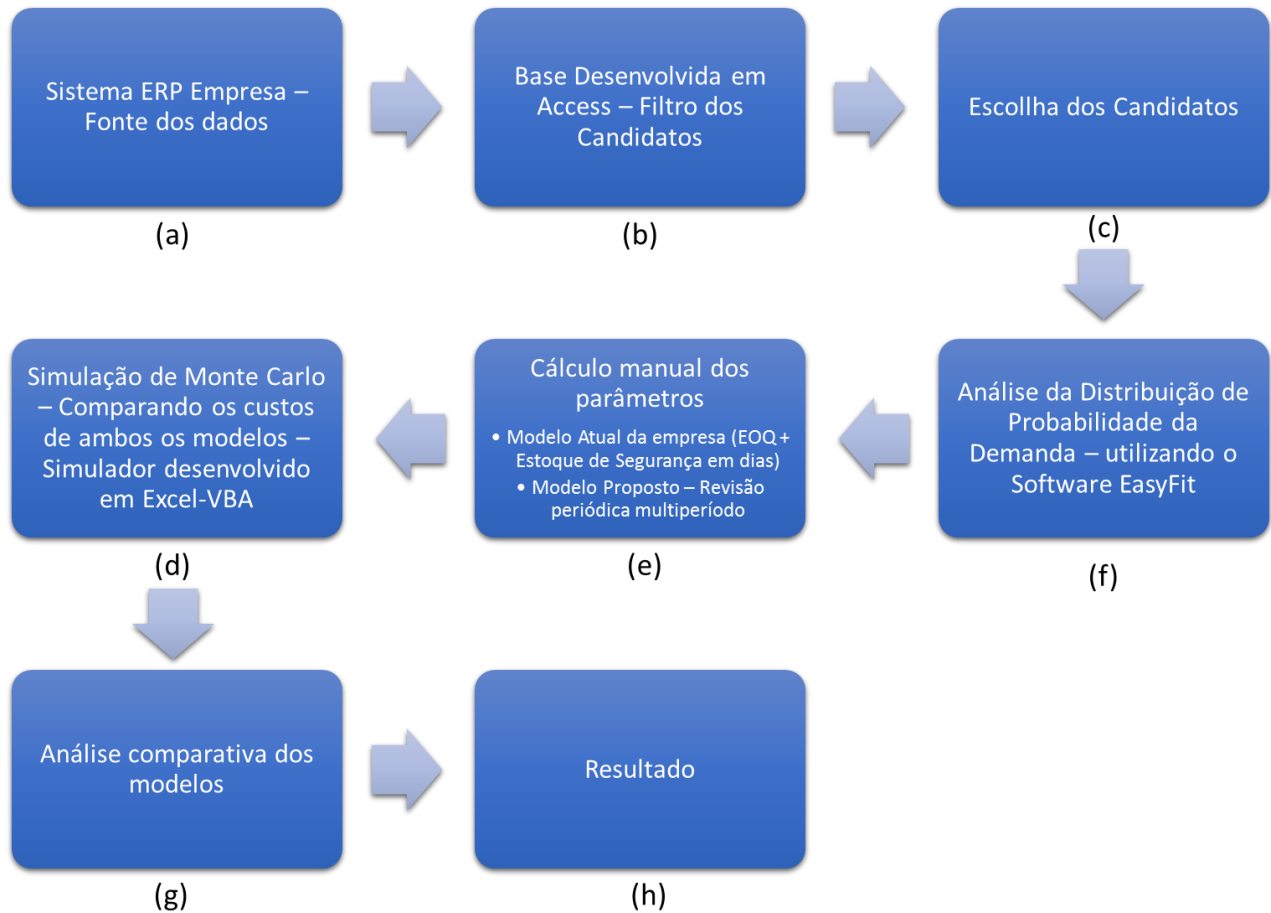


Figura 4.1 – Figura esquemática do processo de coleta e análise dos dados.

4.1. Coleta e Tratamento dos Dados

Os dados para elaboração deste trabalho foram extraídos do sistema ERP da empresa estudada Figura 4.1(a). Em termos gerais, o sistema ERP é uma plataforma de software desenvolvida para integrar os diversos departamentos de uma empresa, possibilitando a automação e armazenamento de todas as informações de negócios; o ERP possibilita um fluxo de informações único, contínuo e consistente. Todos os dados são referentes ao setor de peças primárias subcontratadas da empresa. Dos 220 mil SKUs (*Stock Keeping Unit*, em português Unidade de Manutenção de Estoque está ligado à logística de armazém e designa os diferentes itens do estoque, estando normalmente associado a um código identificador) da área, foram segregados 28.139 SKUs referentes a uma das unidades produtivas da empresa, todos com demanda cadastrada no sistema da empresa. Foram extraídos os relatórios:

- Previsão de demanda bruta
- Estoques dos itens
- Cadastro e parâmetros dos itens estudados
- Preço dos itens estudados
- Histórico de consumo

Os dados da demanda referem-se ao ano de 2014, de janeiro a dezembro. Os demais valores foram coletados em março de 2015. Para manter a confidencialidade dos dados da empresa, os valores estudados foram distorcidos, mas de maneira a manter a validade do estudo e respeitando a estratégia da empresa.

Após a coleta destes 28.139 *SKUs*, primeiramente os dados foram agrupados em uma base de dados do tipo *ACCESS* (*software* de banco de dados pertencente à família *office da Microsoft*) e, na sequência, foi realizada uma consulta SQL (*Structured Query Language*, ou Linguagem de Consulta Estruturada, é a linguagem de pesquisa declarativa padrão para banco de dados relacional) calculando a média dos doze pontos de demanda medidos para cada *SKU*, ou seja, a média das observações (fotos do sistema) entre Janeiro/14 até Dezembro/14, Figura 4.1(b). Os dados gerados possuíam um total de 44 meses, mas com o intuito de se trabalhar com uma demanda mais próxima da realidade, foram eliminados os 7 primeiros meses e os 9 últimos, totalizando assim 28 meses que podem ser observados na Figura 4.2

Este recorte ocorre, pois, os pontos mais próximos do presente são contaminados com demandas que já foram antecipadas e os pontos de muito longo prazo apresentam contaminação pela ausência de cadastro de todas as demandas no sistema. Estes meses foram escolhidos por representarem melhor a demanda média dos itens, e assim a distribuição é calculada de forma mais precisa, a simulação realizada, no entanto trabalha com horizonte de 12 meses apenas.

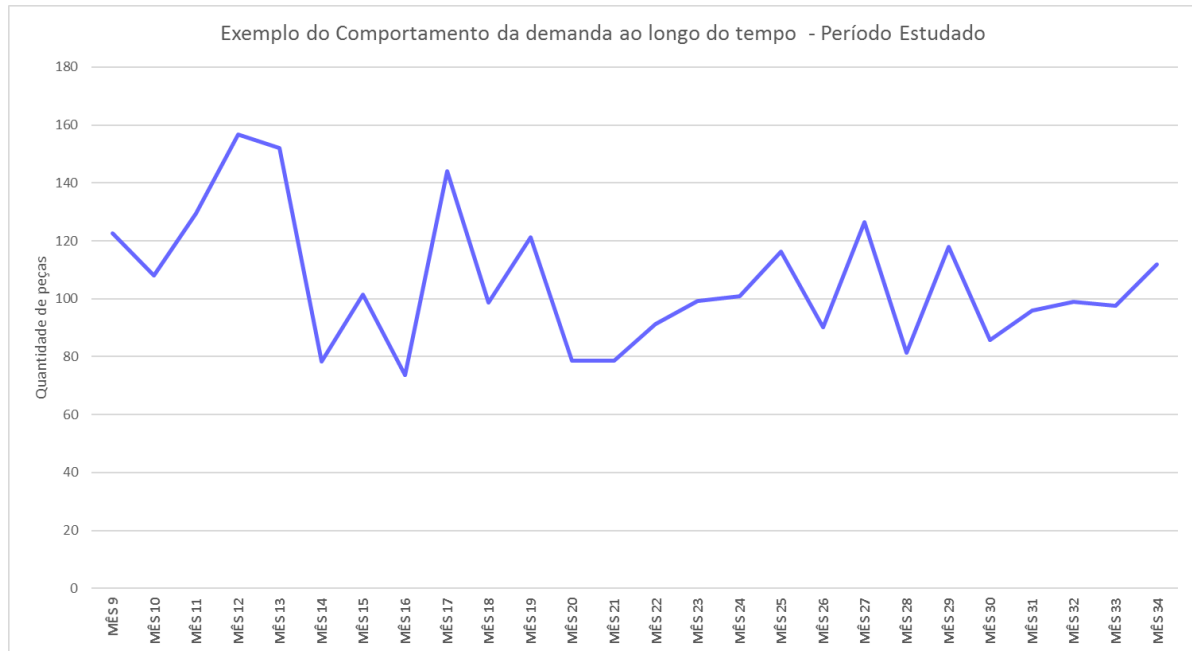


Figura 4.2 – Exemplo do comportamento da demanda ao longo do tempo e recorte realizado para estudo.

Com as médias das demandas, foi calculado o valor total de cada item referente a demanda de 28 meses, com base no valor unitário multiplicado por esta demanda agrupada, e posteriormente os itens foram classificados de forma crescente. A ideia neste processo é de identificar os itens mais interessantes para realização do estudo, tendo em vista a dificuldade de se analisar os quase 30 mil SKUs neste trabalho. Esta escolha, baseada no valor total da demanda, como já brevemente comentada no capítulo 2, ajuda também na identificação dos itens classe A. Estes itens são particularmente interessantes para discutir os resultados comparativos entre as abordagens atual e proposta, pois representam a maior parte do valor de estoque. No caso da abordagem do jornaleiro multiperíodo se mostrar melhor que a política atual adotada pela empresa, configura-se também um forte argumento para sua adoção na prática, ampliando a contribuição deste trabalho. Após esta classificação por valor, foram escolhidos 8 itens para análise, este número se deve ao tempo limitado para se executar a pesquisa e todas as suas simulações. Figura 4.1(c).

4.2. Aplicação do problema do jornaleiro multiperíodo

Inicialmente determinou-se a distribuição de probabilidade da demanda acumulada da sequência de 28 meses da demanda. Figura 4.1(d). Para isto, os dados extraídos

do banco de dados foram analisados no *software Easyfit* (produzido pela empresa *Mathwave*, é um *software* utilizado para determinar as distribuições de probabilidade de uma amostra). Este *software* testa diversas distribuições de probabilidade e aplica três testes de aderência bastante conhecidos: Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling e Chi-Quadrado. No caso deste trabalho, utilizou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov por ser aplicável para pequenas amostras e em funções contínuas. O *software* calcula simultaneamente os três testes de aderência, aqui foi considerado apenas o resultado do Kolmogorov-Smirnov.

Após a análise desses testes de aderência, as distribuições foram ordenadas, da mais aderente para menos aderente. Também foi possível analisar cinco valores de α , variando de 0,01 a 0,2 para cada um dos testes e se eles foram ou não rejeitados pelo teste de hipótese, indicando ou não uma boa aderência da função distribuição de probabilidade. Para descrever de forma mais detalhada este processo apresentaremos na sequência das figuras abaixo algumas minúcias para o item 3 que aparecerá na Tabela adiante. Na Figura temos a representação gráfica do item 3 para distribuição normal. Pela figura, é possível visualmente avaliar que a demanda do item se aproxima de uma distribuição normal, mas esta hipótese foi validada pelos testes, conforme adiante.

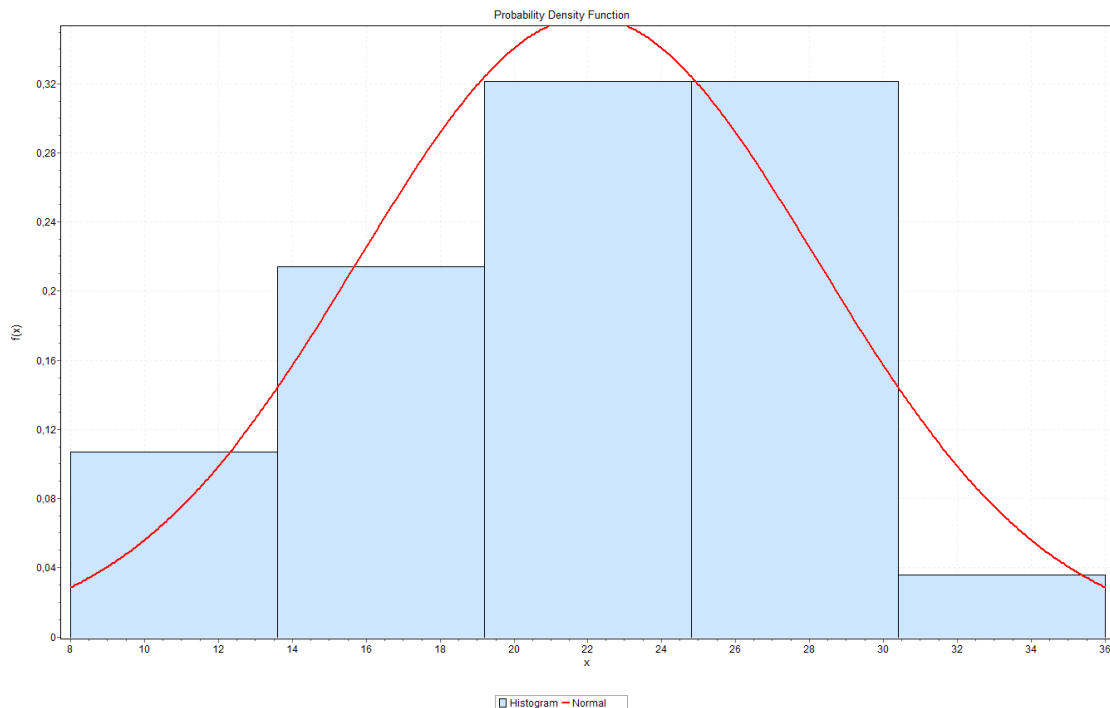


Figura 4.3 – Representação gráfica da distribuição de um dos itens estudados utilizando a distribuição normal.

A Figura 4.4 apresenta o *ranking* das distribuições de probabilidade computadas pelo *software Easyfit* do item 3. É possível observar que a distribuição normal é a segunda colocada, para o teste de Kolmogorov-Smirnov. Neste ponto cabe uma consideração sobre as distribuições utilizadas neste trabalho. Nem sempre foram utilizadas as primeiras posições dos testes de aderência, pois na maioria das vezes as posições não eram unânimes em todos os testes. Outro ponto considerado foi a facilidade para efetuar os cálculos. Algumas distribuições de probabilidade são bastante complexas para serem calculadas, então optou-se em geral pela distribuição normal, caso ela não fosse rejeitada nos testes de hipótese para os valores de α , não invalidando a abordagem utilizada.

A opção por se utilizar a distribuição normal é também motivada pelo trabalho de Gallego e Moon (1993), onde os autores apresentam uma prova matemática do uso da distribuição livre para cálculo do R^* no problema do jornaleiro, tanto no caso monopérido, quanto no caso multipérido, conforme discutido no capítulo anterior. Esta solução na verdade foi apresentada pela primeira vez por Scarf (1958), portanto é chamada também de regra de Scarf. Gallego e Moon (1993), resgatam esta abordagem, segundo eles pouco difundida na literatura e nos livros, e estendem esta regra para outras direções, como o multipérido, múltiplos itens e *lead times* positivos.

Goodness of Fit - Summary								Sumário							
#	Distribution	Kolmogorov Smirnov		Anderson Darling		Chi-Squared		#	DISTRIBUIÇÃO	Kolmogorov Smirnov		Anderson Darling		Chi-Squared	
		Statistic	Rank	Statistic	Rank	Statistic	Rank			Estadística	Qualifica	Estadística	Qualifica	Estadística	Qualifica
1	Chi-Squared	0,14725	9	0,49022	7	0,25749	1	1	Chi-Squared	0,14725	9	0,49022	7	0,25749	1
2	Chi-Squared (2P)	0,1561	10	0,5523	8	0,56109	4	2	Chi-Squared (2P)	0,1561	10	0,5523	8	0,56109	4
3	Erlang	0,19806	12	0,95301	10	1,9948	11	3	Erlang	0,19806	12	0,95301	10	1,9948	11
4	Erlang (3P)	0,1073	4	0,23561	3	0,62099	7	4	Erlang (3P)	0,1073	4	0,23561	3	0,62099	7
5	Exponential	0,40963	14	6,7189	13	27,013	13	5	Exponential	0,40963	14	6,7189	13	27,013	13
6	Exponential (2P)	0,32814	13	4,9832	12	8,6433	12	6	Exponential (2P)	0,32814	13	4,9832	12	8,6433	12
7	Lognormal	0,1641	11	0,70521	9	0,45796	2	7	Lognormal	0,1641	11	0,70521	9	0,45796	2
8	Lognormal (3P)	0,10742	5	0,2361	4	0,62049	6	8	Lognormal (3P)	0,10742	5	0,2361	4	0,62049	6
9	Normal	0,10714	2	0,23301	2	0,62975	8	9	Normal	0,10714	2	0,23301	2	0,62975	8
10	Pert	0,10716	3	0,35083	5	0,60603	5	10	Pert	0,10716	3	0,35083	5	0,60603	5
11	Student's t	0,99237	15	152,55	15	10268,0	14	11	Student's t	0,99237	15	152,55	15	10268,0	14
12	Triangular	0,13417	8	1,2061	11	0,51919	3	12	Triangular	0,13417	8	1,2061	11	0,51919	3
13	Uniform	0,11485	6	7,7896	14	N/A		13	Uniform	0,11485	6	7,7896	14	N/A	
14	Weibull	0,12944	7	0,39691	6	1,7909	10	14	Weibull	0,12944	7	0,39691	6	1,7909	10
15	Weibull (3P)	0,0965	1	0,21484	1	0,633	9	15	Weibull (3P)	0,0965	1	0,21484	1	0,633	9

Figura 4.4– Tabela do *software Easyfit* com os três testes de aderência e suas respectivas posições. Na esquerda a tela do *software*, na direita a tradução

Na Tabela 4.1 são apresentados os valores detalhados dos testes de hipótese para distribuição normal do item 3 da Tabela . Pode-se verificar que nenhum valor e α foi rejeitado, validando assim o uso da distribuição normal, mesmo que no *ranking* de distribuições ela não tenha sido a primeira.

Tabela 4.1– Tabela do software *Easyfit* ilustrando os testes de hipótese para valores de alfa. Na esquerda a tela original do *software*, na direita a tradução

Goodness of Fit - Details [hide]						Detalhes					
Normal [#9]						Normal [#9]					
Kolmogorov-Smirnov						Kolmogorov-Smirnov					
Sample Size	28					Tamanho da Amostra	28				
Statistic	0,10714					Estatística	0,10714				
P-Value	0,87115					Valor P	0,87115				
Rank	2					Classificação	2				
α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01	α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Critical Value	0,1968	0,22497	0,24993	0,27942	0,29971	Valor crítico	0,1968	0,22497	0,24993	0,27942	0,29971
Reject?	No	No	No	No	No	Rejeita?	No	No	No	No	No
Anderson-Darling						Anderson-Darling					
Sample Size	28					Tamanho da amostra	28				
Statistic	0,23301					Estatística	0,23301				
Rank	2					Classificação	2				
α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01	α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Critical Value	1,3749	1,9286	2,5018	3,2892	3,9074	Valor crítico	1,3749	1,9286	2,5018	3,2892	3,9074
Reject?	No	No	No	No	No	Rejeita?	No	No	No	No	No
Chi-Squared						Chi-Squared					
Deg. of freedom	4					Graus de liberdade	4				
Statistic	0,62975					Estatística	0,62975				
P-Value	0,9597					Valor P	0,9597				
Rank	8					Classificação	8				
α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01	α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Critical Value	5,9886	7,7794	9,4877	11,668	13,277	Valor crítico	5,9886	7,7794	9,4877	11,668	13,277
Reject?	No	No	No	No	No	Rejeita?	No	No	No	No	No

De posse dos valores validados dos coeficientes das distribuições pelos testes de aderência, os cálculos do problema do jornaleiro multiperíodo podem ser realizados Figura 4.1(e). Neste caso, o horizonte de planejamento multiperíodos utilizado foi de doze meses, o que supera com folga a premissa de um mínimo de três ou quatro períodos recomendada na literatura para aplicação da aproximação do problema do jornaleiro multiperíodo. A dedução da fórmula fechada aproximada (3.7) para o problema do jornaleiro multiperíodo já foi apresentada no capítulo 3 e por conveniência, é reproduzida abaixo:

$$F(R^*) = \frac{V - C(1 - \alpha)}{V + H} \quad (3.8)$$

em que R^* indica quanto deve ser pedido; V é o custo da falta; C é o custo de compra do item; α é a taxa de oportunidade no período e H é o custo unitário de estocagem por período. A seguir é mostrado um exemplo de cálculo.

O item 2 da Tabela é do segmento comercial da empresa estudada, uma divisão que possui como característica uma demanda de itens mais homogênea do que as demais. Isto não significa que a demanda dos itens seja totalmente homogênea, e sim que o coeficiente de variação da demanda (desvio padrão / média) tende a ter um valor menor que os das demais divisões. O item 2 possui valores de demanda conforme apresentado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Valores da demanda média do item 2 da Tabela

jun-14	jul-14	ago-14	set-14	out-14	nov-14	dez-14	jan-15	fev-15	mar-15	abr-15	mai-15	jun-15	jul-15
17,0	48,5	71,3	29,2	28,8	45,5	24,0	63,0	46,9	30,8	19,0	69,4	52,3	58,5
ago-15	set-15	out-15	nov-15	dez-15	jan-16	fev-16	mar-16	abr-16	mai-16	jun-16	jul-16	ago-16	set-16
30,0	34,0	32,2	45,3	24,2	20,4	34,4	34,7	20,7	35,6	23,4	43,0	24,0	6,0

A Figura 4.5 apresenta a forma gráfica dos dados plotados da Tabela . Nota-se que, mesmo sendo uma classe de menor variação, os dados da demanda oscilam consideravelmente entre os meses levantados.

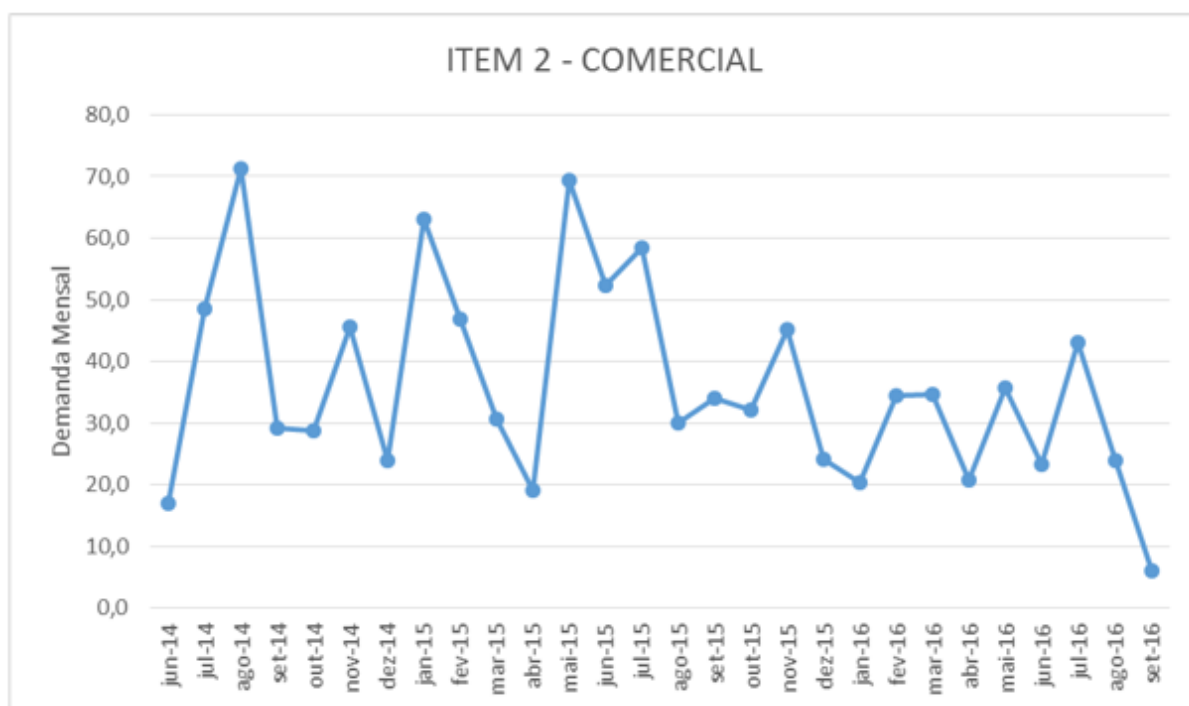


Figura 4.5 – Valores de demanda plotados graficamente para o item 2 da Tabela

Após os cálculos no *Easyfit*, foi obtido o valor da média $\mu = 36,5$, e o desvio padrão de $\sigma = 16,381$. A distribuição de probabilidade da demanda do item 2 adere a uma distribuição normal, não sendo rejeitada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov e para nenhum valor de α calculado pelo *software*. Como o item neste caso adere a uma distribuição normal, podemos simplificar o intervalo de integração da função distribuição de probabilidade pelo cálculo de uma normal reduzida Z , sendo:

$$Z = \frac{R^* - \mu}{\sigma} = \frac{V - C(1 - \alpha)}{V + H} \quad (4.1)$$

onde, μ é a média, σ é o desvio padrão e Z é o valor tabelado da função normal acumulada. O preço de compra do item $C = \$444,76$, a taxa de oportunidade é de $\alpha = 10,44\%$ a.a. = $0,83\%$ a.m.; o custo de carregamento de estoque é de $H = 1,072\%$ a.m. do preço de compra do item. A taxa de oportunidade é o valor referência atualmente utilizado pela empresa estudada, assim como o custo de carregamento de estoque.

Convém salientar que o custo da falta V é um parâmetro difícil de ser estimado na prática, principalmente quando estamos lidando com um processo que não é de cliente final. Se utilizarmos o preço final da aeronave, resultaria em um custo de falta exagerado. Neste trabalho, inicialmente, o que pareceu mais razoável foi adotar um custo da falta referente ao cliente do próximo nível da cadeia, que seria uma montagem da própria empresa. Alguns gestores da empresa concordam com isto. Partimos do pressuposto que qualquer item fabricado pelo subcontrato em caráter de urgência pode ser manufaturado num período de vinte e quatro horas, o que é realista na empresa estudada. Assim, o *lead time* para atender uma falta emergencial seria de 1 dia. Portanto, é razoável supor que a montagem ficaria parada no máximo um dia, logo, o custo da falta pode ser estimado como $V = \beta n$, onde β é a taxa diária de um operador parado; n é o número de operadores da montagem que utiliza o componente faltante. Esta abordagem na literatura é classificada como lucro cessante, descrito, por exemplo, por Weil (1966). Note que isso nada mais é do que apurar o custo de parada de uma operação industrial.

Voltando à consideração do atendimento emergencial, é importante ressaltar que apesar de possível, esta prática de fabricar um item em regime de urgência retrata uma situação extrema na empresa, que só é aplicada no caso de uma sinalização de parada de montagem. É preciso uma política de planejamento que suporte a operação e casos como esta consideração devem ser raros. Esta consideração foi feita para estimar um custo de falta

próximo à realidade da empresa estudada e não significa que uma política de revisão contínua(ao invés de periódica) possa ser utilizada.

Em função das limitações desta abordagem, optou-se por também realizar uma análise de sensibilidade desse custo de falta, para se avaliar melhor se este custo de falta seria aderente a realidade. Esta análise então foi realizada, como mostrado na sequência.

Como pode ser observado na Figura 4.6, temos a variação do tamanho do ponto de reposição R^* obtido pelo modelo (3.7) para diversos valores de custo de falta V . Neste caso, a variação do custo de falta é dada por um múltiplo do valor do item, variando de 1X até 1.000.000X o custo unitário do item. É possível observar que mesmo para valores extremamente elevados do custo de falta, o tamanho de lote R^* não acompanha esta multiplicidade, sendo um incremento bem mais modesto. Por exemplo, para o desvio padrão do item de 16,381, temos que o ponto de reposição obtido (R^*) aumenta cerca de 50% ao comparar-se um custo de falta de 10X o valor do item em relação a 1.000.000X.

Outro ponto ilustrado na Figura 4.6, é um comparativo entre os desvios padrões da demanda do item, supondo que esse desvio padrão fosse maior ou menor do que o valor observado de 16,381. Neste exemplo temos quatro valores: original (16,381), a metade, o dobro e se o desvio padrão fosse igual a 1. É nítido que existe uma maior contribuição no tamanho do lote em função do desvio padrão do que o custo de falta (V). Este fato seria esperado a partir da análise dos parâmetros de duas equações já apresentadas anteriormente (3.7) e (4.1). Na primeira equação, onde temos o valor de R^* dado por:

$$R^* = \mu + Z * \sigma$$

das variáveis que contribuem para o valor de R^* , a média não varia para uma dada distribuição. Portanto a contribuição vem do desvio padrão e do valor de Z . O desvio padrão também é fixo para uma dada distribuição, portanto o que irá contribuir para o valor de R^* é o valor de Z . E o valor de Z é obtido através da segunda equação:

$$Z = \frac{V - C(1 - \alpha)}{V + H}$$

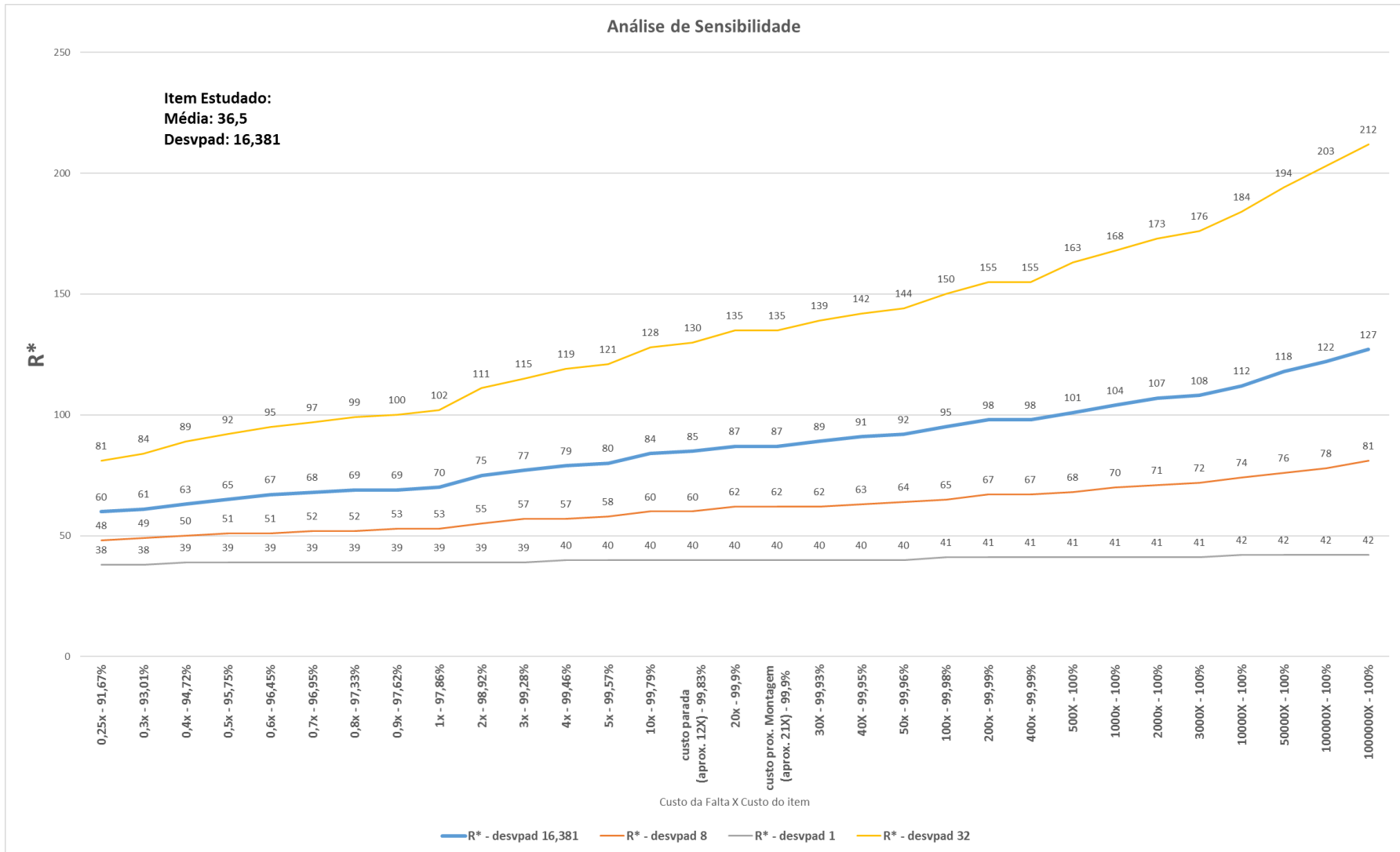


Figura 4.6 – Análise de Sensibilidade – Custo da Falta X Tamanho do R*

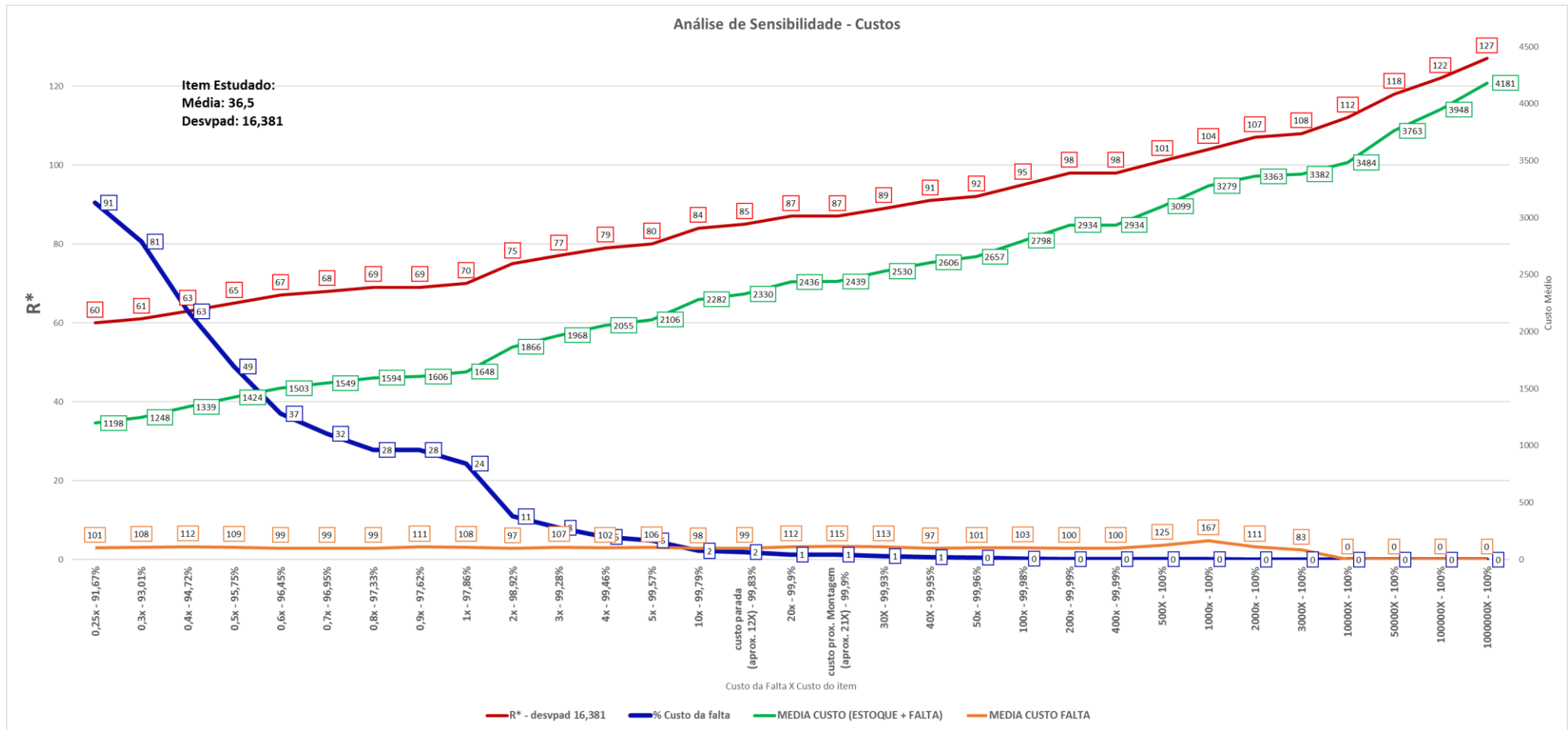


Figura 4.7 – Análise de Sensibilidade – Variação do Custo X Nível de Serviço

No caso estudado da indústria aeronáutica, o valor de V é sempre muito maior que os demais parâmetros da equação, carregamento de estoque e percentual do custo do item. Sendo assim, o valor de Z é recorrentemente alto, sempre tendendo para valores próximos de 1 e frequentemente acima de 0,98, o que também corresponde ao nível de serviço adotado. Através da análise de sensibilidade, temos como resultado que na indústria aeronáutica o nível de serviço é extremamente elevado e pode-se inclusive adotar valores para Z de acordo com o nível de serviço desejado.

Outra constatação que podemos tirar desta análise de sensibilidade é que os valores calculados através do lucro cessante poderiam ser utilizados, tanto neste estudo como para valores práticos, por estarem aderentes e proporcionais ao custo da falta e do nível de serviço adotado pelo setor. No entanto, utilizamos um método mais tradicional, sendo o nível de serviço. Para todos os itens calculados neste trabalho, adotamos o valor de 99,8% para nível de serviço. Importante frisar que como a empresa utiliza a fórmula do lote econômico para determinar o tamanho dos lotes, este nível de serviço elevado irá pesar negativamente ao modelo do jornaleiro multiperíodo no comparativo adiante entre os modelos.

Na Figura 4.7 é apresentado um desdobramento desta análise de sensibilidade. Partindo-se dos valores originais do item 2 da Tabela 4.4, ou seja, $\mu = 36,5$ e $\sigma = 16,381$, foram simulados para os 31 valores de custos de falta/nível de serviço e seus respectivos R^* calculado, apresentados na Figura 4.6. A simulação teve 16.000 iterações, este valor se deve a limitação da planilha eletrônica utilizada com relação as colunas. Foi calculado um vetor de demanda simulando 16 meses (4 *warm up* + 12 regime), com isto foi rodado para cada um dos 31 valores de R^* e seus respectivos custos e após estas 16.000 iterações calculada a média de cada um destes 31 valores, estes dados estão presentes na Figura 4.7 e Tabela 4.3.

Analisando o gráfico da Figura 4.7, é observado que o custo total aumenta, conforme era esperado com o aumento do nível de serviço. O questionamento interessante ocorre na proporção entre o custo da falta e o nível de serviço, ou seja, apesar do custo total aumentar com o valor do nível de serviço a proporção em relação ao custo da falta é menor. Essa análise é importante, pois numa primeira análise do gráfico pode-se concluir de forma errônea que o aumento do nível de serviço apenas aumenta os custos, o que não é correto, afinal o custo da falta também aumenta juntamente com os valores de R^* . Portanto, quanto maior o nível de serviço, maior valor dos custos, porém menores faltas e seus custos, conforme esperado.

Tabela 4.3– Tabela com os dados expostos na Figura 4.7, comparando os custos com o nível de serviço.

PROPORÇÃO DO CUSTO EM RELAÇÃO AO ITEM - NÍVEL DE SERVIÇO	CUSTO FALTA	R* p/ $\sigma = 16,381$	MEDIA CUSTO (ESTOQUE + FALTA)	MEDIA CUSTO ESTOQUE	MEDIA CUSTO FALTA	% Custo da falta
0,25x - 91,67%	111,19	60	1198	1097	101	91
0,3x - 93,01%	133,428	61	1248	1140	108	81
0,4x - 94,72%	177,904	63	1339	1227	112	63
0,5x - 95,75%	222,38	65	1424	1315	109	49
0,6x - 96,45%	266,856	67	1503	1405	99	37
0,7x - 96,95%	311,332	68	1549	1450	99	32
0,8x - 97,33%	355,808	69	1594	1495	99	28
0,9x - 97,62%	400,284	69	1606	1495	111	28
1x - 97,86%	444,76	70	1648	1540	108	24
2x - 98,92%	889,52	75	1866	1769	97	11
3x - 99,28%	1334,28	77	1968	1861	107	8
4x - 99,46%	1779,04	79	2055	1953	102	6
5x - 99,57%	2223,8	80	2106	1999	106	5
10x - 99,9%	8895,2	84	2282	2184	98	1
custo parada (aprox. 12X) - 99,83%	5400	85	2330	2231	99	2
20x - 99,95%	17790,4	87	2436	2324	112	1
custo prox. Montagem (aprox. 21X) - 99,9%	9143,11	87	2439	2324	115	1
30X - 99,97%	26685,6	89	2530	2417	113	0
40X - 99,98%	35580,8	91	2606	2509	97	0
50x - 99,96%	22238	92	2657	2556	101	0
100x - 99,98%	44476	95	2798	2695	103	0
200x - 99,99%	88952	98	2934	2834	100	0
400x - 99,99%	88952	98	2934	2834	100	0
500X - 100%	222380	101	3099	2974	125	0
1000x - 100%	889520	104	3279	3113	167	0
2000x - 100%	1779040	107	3363	3252	111	0
3000X - 100%	2668560	108	3382	3298	83	0
10000X - 100%	8895200	112	3484	3484	0	0
50000X - 100%	44476000	118	3763	3763	0	0
100000X - 100%	88952000	122	3948	3948	0	0
1000000X - 100%	444760000	127	4181	4181	0	0

Dada esta explicação, voltemos ao exemplo, agora com valor do nível de serviço sendo 99,8%, temos que $V = 4826,41$

$$Z = \frac{(4826,41) - 444,76(1 - 0,989)}{(4826,41) + (0,01072 * 444,76)} = 0,998$$

Pela tabela da distribuição normal unitária, temos:

$$Z(0,998) = 2,88$$

Portanto,

$$R^* = \mu + Z * \sigma$$

$$R^* = 36,5 + (2,88 * 16,381) = 83,67 \approx 84 \text{ unidades}$$

Para este item, então o valor de reposição obtido é de 84 unidades, ou seja, pedir até 84 unidades por período. Caso este problema fosse do tipo jornaleiro monopérido, a equação (3.7) não conteria o fator de desconto $(1 - \alpha)$, ficando conforme a equação (3.1), e portanto:

$$Z = \frac{(4826,41) - 444,76}{(4826,41) + (0,01072 * 444,76)} = 0,907$$

Pela tabela da distribuição normal unitária, teríamos:

$$Z(0,907) = 1,33$$

Portanto,

$$R^* = \mu + Z * \sigma$$

$$R^* = 36,5 + (1,33 * 16,381) = 58,28 \approx 59 \text{ unidades}$$

Logo, na ausência do fator de desconto $(1 - \alpha)$ e por ser monopérido, o ponto de reabastecimento sugerido seria menor, como esperado, pois sobras neste modelo seriam descartadas, e assim existe uma compensação, sugerindo um valor mais conservador de R^* no *trade off* do custo de excesso e custo de falta.

Cálculo do Jornaleiro Multiperíodo – Compilação dos itens estudados

Nesta seção é apresentada uma compilação dos dados referentes aos oito itens estudados. Na Figura 4.8, temos os valores médios das demandas mensais dos oito itens estudados, mostrando a diferença existente entre eles, tanto em quantidade como em comportamento da distribuição ao longo do tempo. Estes itens foram escolhidos aleatoriamente entre uma lista de 40 itens com maiores valores de demanda anual, classificados como Classe A de custos. A razão desta escolha se dá, pois caso o método proposto tenha sucesso frente ao modelo atual da empresa, torna-se um argumento importante para implementação prática a vantagem na redução de custos desses itens, sendo essa classe de impacto mais significativo do que classes de menor valor.

Na Figura 4.8, são apresentados os gráficos da demanda destes oito itens. Estes gráficos ilustram o caráter aleatório e heterogêneo das demandas, não importando a unidade de negócio, nem o valor de cada um dos itens. Estas demandas são uma amostra da dificuldade de se traçar uma política única para todos os itens desta área. Eles também levantam uma crítica ao modelo atualmente utilizado pela empresa estudada, pois tais demandas não parecem ter comportamento estacionário ou próximo disto, que é uma premissa para utilização de modelos de lote econômico. Com isto, aumenta-se a expectativa em relação a um bom desempenho do modelo do jornaleiro multiperíodo para apoiar decisões de estoque neste ambiente.

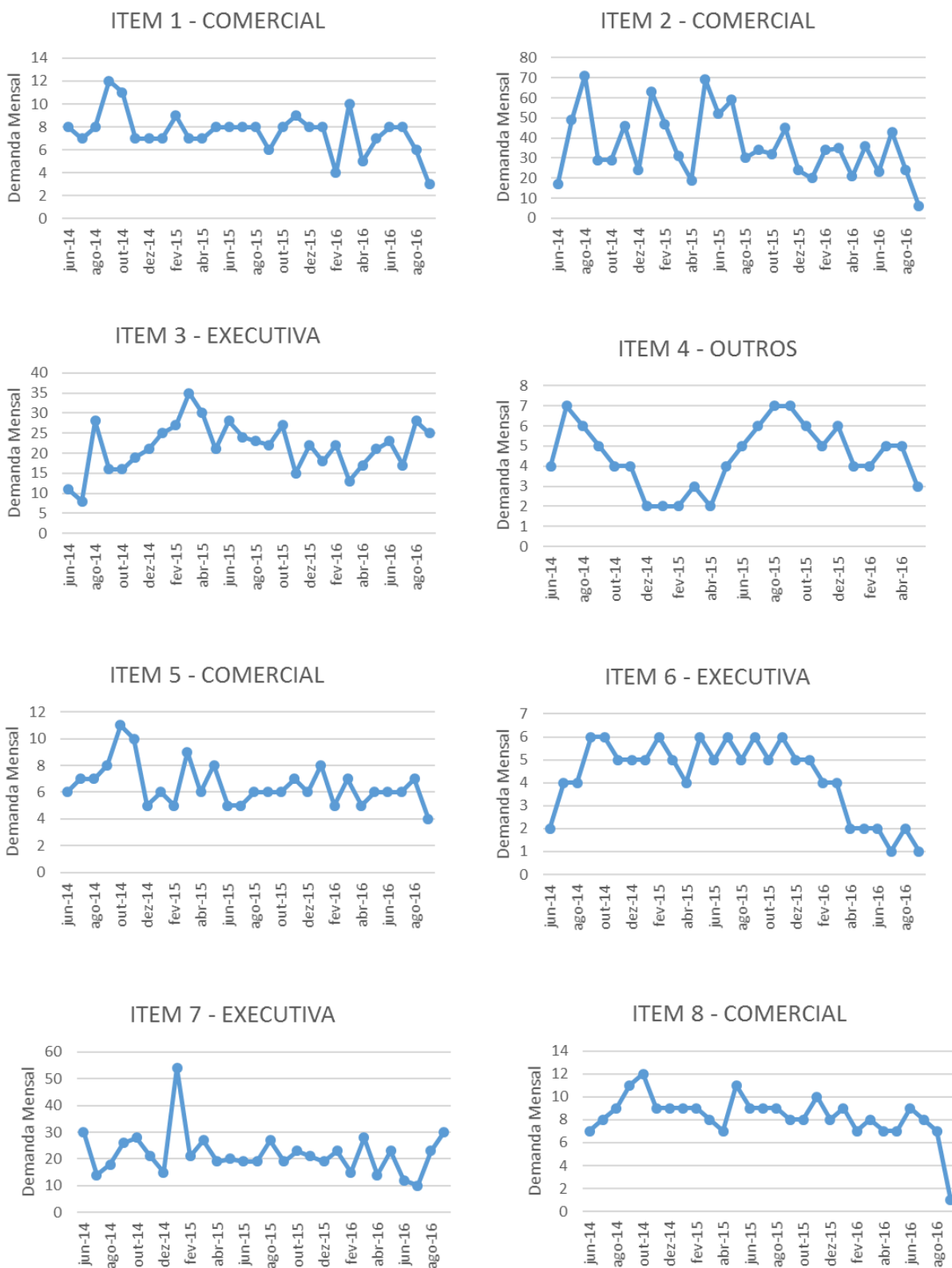


Figura 4.8 – Demanda prevista ao longo do tempo (*forecast*) de alguns dos itens estudados.

A Tabela 4.4 apresenta um resumo dos valores calculados dos oito itens estudados. Estes serão os parâmetros de entrada para execução das simulações de Monte Carlo executadas nas próximas seções. O quadro apresenta a distribuição utilizada, em todos estes casos uma distribuição normal, e se esta distribuição passou no teste de aderência ao modelo de distribuição. Tem-se ainda a média (μ), o desvio padrão (σ), o custo do item (C), o custo de carregamento de estoque (H), o custo da falta (V) e o ponto de reabastecimento calculado (R^*).

Tabela 4.4– Resumo dos valores calculados

CLASSE	Resultado do teste de aderência para dist. Normal	μ	σ	C	H	V	R^*
ITEM 1 - COMERCIAL	OK	8	1,7847	2604,33	27,92	28255,9	14
ITEM 2 - COMERCIAL	OK	36,5	16,381	444,76	4,77	4826,41	84
ITEM 3 - EXECUTIVA	OK	22	6,2302	471,38	5,06	5117,53	40
ITEM 4 - OUTROS	OK	4,7917	1,5874	2108,09	22,6	22871,9	10
ITEM 5 - COMERCIAL	OK	6,5357	1,5982	1310,82	14,06	14225,45	12
ITEM 6 - EXECUTIVA	OK	4,25	1,6471	1835,88	19,69	19922,65	9
ITEM 7 - EXECUTIVA	OK	22,071	8,2369	410,16	4,4	4451,48	46
ITEM 8 - COMERCIAL	OK	8,3214	1,9255	1116,26	11,97	12112,46	14

4.3. Modelo adotado pela empresa

Nesta seção é descrito o modelo atual de controle de estoques adotado pela empresa estudada, para contextualizar o cenário atual. Figura 4.1(e), a política de planejamento aplicada na gestão de estoques do setor de peças primárias subcontratadas da empresa adota o Lote Econômico Clássico (EOQ ou LEC), revisado no capítulo 3. Conforme apresentada no capítulo 3, a fórmula do lote econômico utilizada é dada pela equação (3.1), reproduzida a seguir por conveniência:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2DP}{H}} \quad (3.1)$$

onde: D é a demanda do período, em unidades, P é o custo de colocação de um pedido ou de um *setup*, em \$ por lote, H o custo para estocar uma unidade do item durante um período, em \$, e Q^* é a quantidade do lote.

Na verdade, pode-se dizer que o modelo adotado pela empresa é baseado na equação do lote econômico, pois esta equação sugere uma quantidade para o lote de compra que normalmente é seguida, porém para os itens mais caros, os chamados classe A, ocorre uma exceção. A característica principal do modelo de subcontratação em relação ao modelo tradicional de compras é o envio de insumos pelo cliente para um terceiro manufaturar, ou seja, a empresa envia os insumos (matérias-primas e componentes) para base de fornecedores industrializarem os diversos itens. Nesta operação de envio é preciso cortar as matérias-primas, para enviar apenas a quantidade necessária a ser industrializada e não uma placa metálica inteira. Logo, existe uma etapa interna na empresa para cortar e expedir estas matérias-primas. No caso de lotes menores que um mês, o que acaba ocorrendo na prática é o agrupamento de duas ou mais ordens nesta etapa, pois existe uma fila de corte que segue uma priorização por data de necessidade, mas também procura otimizar o corte por tipo de matéria-prima, normalmente agrupando ordens emitidas em datas diferentes num mesmo plano de corte e enviando-as simultaneamente ao fornecedor. Assim o impacto no valor de estoque acaba sendo único, mesmo no caso das ordens de compra originalmente terem sido emitidas conforme a sugestão da equação do lote econômico, pois a entrega da industrialização normalmente também ocorre no mesmo momento, pois os fornecedores otimizam sua fabricação para utilizar apenas um *setup*. Esta característica é descrita, pois este efeito prático é adotado no modelo da empresa nas simulações realizadas no capítulo 4.

Em função da falta ser muito custosa para a empresa, ela incorpora um estoque de segurança, calculado em função da previsão de demanda para os próximos dias. Esta demanda vem do próprio sistema ERP utilizado pela empresa. O valor desta segurança é na verdade um perfil de segurança calculado em dias e pode variar conforme a classe de custo do material. Na maioria dos casos, este valor corresponde a 30 dias de segurança, ou seja, opta-se por manter um estoque correspondente a 30 dias de demanda média, que é calculado automaticamente pelo sistema da empresa com base nos parâmetros cadastrados.

A quantidade do estoque de segurança (*SS-safety stock*) é, assim, um perfil de segurança, onde o valor equivale entre 10 a 20 dias úteis de demanda para itens classe A e B, e para os itens classe C, este valor sobe para 30 dias úteis de demanda. Desta maneira, a política de estoque da empresa, ou seja, a decisão de quanto e quando pedir, pode ser descrita como uma junção do lote econômico e o perfil de segurança, dado por:

Se,

Estoque atual < SS (*safety stock*) + demanda média do próximo período ; pedir caso contrário; não pedir.

No caso de pedir, temos:

Como o lote econômico é um valor que minimiza custo de pedido e não observa o período, é preciso realizar uma ponderação para verificar quantas vezes o lote econômico deve ser pedido em cada período, neste caso 1 mês. Para isto, e temos a ponderação:

$$n = \frac{(Demanda\ Média + SS) - Estoque\ Atual}{Q^*}$$

O valor de n é sempre arredondado para o próximo inteiro, por exemplo, 1,4 torna-se 2. Assim, R_{atual}^* , o ponto de reposição do modelo atual adotado pela empresa, pode ser calculado como:

$$R_{atual}^* = (n * Q^*)$$

Note que R_{atual}^* é o ponto de pedido do modelo atual adotado pela empresa, sendo n vezes o valor de Q^* , a quantidade da fórmula (3.1) do lote econômico, n é o número de vezes que este lote será pedido no mês em função da demanda. Ou seja, sendo ps o perfil de segurança; d a demanda mensal média. O cálculo do perfil de segurança é adaptado para refletir a quantidade mensal. Ele leva em conta que o perfil de segurança de 20 dias, por exemplo, é dado em dias úteis, portanto na equação anterior ele é convertido para dias corridos, ficando o cálculo da demanda diária média multiplicada pelo perfil de segurança em dias corridos.

Aplicando esse método para o item 2 da Tabela , já calculado para o modelo do jornaleiro na seção anterior, temos pela equação do lote econômico (3.1):

$$Q^* = \sqrt{\frac{2(438)17}{46,433}} = 17,9$$

Como estoque de segurança, sendo a demanda média mensal dividida por 30, temos a demanda diária. O valor do perfil de segurança é calculado em dias úteis, portanto a expressão, $\left(\frac{20}{5} * 7\right)$ corresponde a um multiplicador que transforma o resultado da demanda média diária na demanda média diária em dias úteis, resultando assim no perfil de segurança, dado por:

$$SS = \left(\frac{36,5}{30} * \left(\frac{30}{5} * 7\right)\right) = 52$$

Retornando a equação do modelo atual adotado pela empresa, temos:

$$n = \frac{(Demanda\ Média + SS) - Estoque\ Atual}{Q^*} = \frac{(36,5 + 52) - Estoque\ Atual}{17,9}$$

Com o valor de n arredondado para o próximo inteiro, temos então o valor do ponto de reposição pelo modelo da empresa. No caso do estoque atual ser nulo, teríamos então:

$$n = \frac{(36,5 + 52) - 0}{17,9} = 4,94 \approx 5$$

Com $n = 5$, podemos finalizar o cálculo do ponto de reposição pelo modelo da empresa através de:

$$R_{atual}^* = (n * Q^*) = (5 * 17,9) = 89,5 \approx 90$$

Portanto, o ponto de reposição atual adotado pela empresa, neste caso com o estoque inicial nulo, é: $R_{atual}^* = 90$. Obteríamos então ao menos 90 unidades, contra as 85 unidades calculadas pelo modelo do jornaleiro multiperíodo. Uma comparação mais detalhada sobre os resultados do problema do jornaleiro multiperíodo e do modelo da empresa é apresentada a seguir.

4.4. Comparação entre o modelo proposto e modelo da empresa - Simulações e Resultados

Nesta seção é apresentada uma comparação entre os desempenhos simulados das soluções do problema do jornaleiro multiperíodo e do modelo adotado pela empresa estudada. Para avaliar esses desempenhos, foi desenvolvida uma aplicação em *Microsoft Excel* que utiliza simulação de Monte Carlo para verificar e comparar os dois modelos, Figura 4.1(d). A ideia é avaliar e comparar o comportamento de ambos em situações aleatórias simuladas. O código VBA (é uma implementação do Visual Basic da Microsoft incorporada em todos os programas do Microsoft Office, sendo então uma linguagem de programação) utilizado neste trabalho está disponível no Anexo desta dissertação. A Figura 4.9 apresenta a interface do programa desenvolvido. Este simulador tem alguns parâmetros de entrada fornecidos pelo usuário, inicialmente o desvio padrão da distribuição de probabilidade da demanda do item, e

com este dado e o valor do erro pretendido para simulação, obtêm-se o número de iterações que serão simuladas.

Retornando à interface do simulador, pode-se observar algumas divisões na interface, onde os dados devem ser inseridos pelo usuário. Na parte A da Figura deve ser inserido o valor do desvio padrão da distribuição já previamente calculado e o erro esperado para simulação. Com base nestas informações será informado o número de iterações que serão simuladas pelo programa. Na parte B da Figura 4.9, deve-se inserir os valores calculados para o modelo do jornaleiro, sendo: a média, o desvio padrão, o custo unitário do item e o valor de R^* . Na parte C, são colocados os dados referentes ao modelo atual da empresa, sendo: demanda média mensal do item, o custo por pedido, a taxa de juros anual, e os demais valores apresentados na figura são calculados automaticamente. Na parte D, é inserido o número de dias do perfil de cobertura, sendo o lote de segurança calculado automaticamente. Na parte E, foi criada uma interface para serem inseridos os dados referentes ao cálculo do custo de falta. Como optou-se pela abordagem do nível de serviço, apenas o custo de falta calculado necessita ser inserido. Na parte F tem-se o contador de simulações, apenas para avaliar o desempenho, e quanto tempo foi gasto em cada simulação. Na parte G, temos o botão que inicia a simulação. Quando todos os dados necessários foram inseridos, este botão é acionado para rodar as n iterações. Por fim na parte H, são apresentadas as instruções para o usuário poder utilizar o *software*.

Simulações de Monte Carlo

As políticas de estoque obtidas com os dois modelos (proposto e empresa), foram rodadas para oito itens no simulador de Monte Carlo (Figura 4.1(f)). Estes itens procuram representar o comportamento diverso existente nas demandas de todos os itens pertencentes a classe A de custos do setor de peças primárias subcontratadas da empresa estudada. O código construído em VBA procura simular um número suficiente de rodadas, onde seja possível comparar os dois modelos de forma consistente (Figura 4.1(g)). O número de iterações foi obtido a partir da fórmula: $N = \left(\frac{3\sigma}{\varepsilon}\right)^2$, apresentada em Fernandes (2005), onde σ é o desvio padrão, ε é o erro e N o número de iterações.

A demanda de cada período foi gerada através de uma função para criar números aleatórios segundo uma distribuição de probabilidade do *software Easyfit* dentro do VBA, utilizando a distribuição da variável aleatória. Neste trabalho, estamos utilizando apenas a distribuição normal, porém convém ressaltar que seria possível adaptar facilmente o simulador para outros tipos de distribuições. O módulo do *Easyfit* possui geradores para uma diversidade de tipos de distribuições de probabilidade, porém todas precisam ser declaradas dentro do código, o que dificulta um pouco a implementação para um número grande de tipos de distribuição.

O simulador é iterativo, ou seja, executa cada uma das iterações propostas em sequência. Definiu-se um período de aquecimento (*warm up*) de 6 períodos, onde se inicia com valores de estoque zero para ambos os modelos e após estes 6 períodos, o estoque residual é o que será utilizado como o estoque inicial das análises consideradas. A razão para adotarmos este período de *warm up* é para garantir valores da simulação em regime (i.e., em equilíbrio), pois, caso contrário, os dados estariam contaminados pelo efeito dos valores de estoque serem menores do que os valores esperados em regime. Este fenômeno ocorre pelo fato dos lotes iniciais não conseguirem contemplar toda a demanda e mais a segurança prevista, não estando, portanto, em regime. Ocorre então este período de *warm up*, como uma função amortecida, em que os lotes não atingiriam ainda a segurança parametrizada, mas tenderiam ao valor final, concretizado após um máximo de 7 períodos. Se a demanda fosse estacionária, poderia ser desprezado este período, o que não aconteceu para os itens deste estudo, sendo assim necessário este período inicial de aquecimento. A Figura 4.10, destaca este período e

observamos que após o sexto ou sétimo período os valores se estabilizam e permanecem razoavelmente constantes.

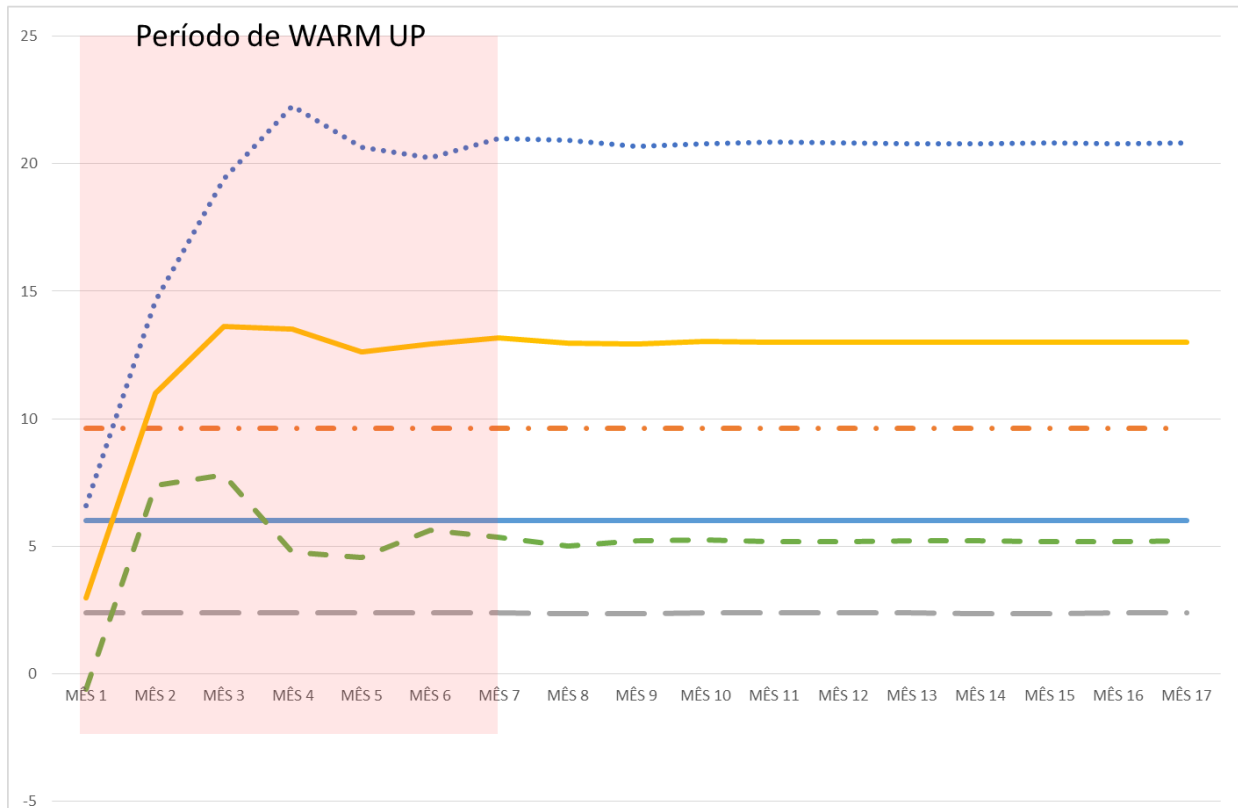


Figura 4.10 – Resumo dos dados simulados destacando o período de warm up

Feita a consideração sobre o período de *warm up*, podemos voltar à simulação. Após os 6 períodos de aquecimento, foram então calculados os 12 períodos considerados. Em cada período, foi gerada uma demanda aleatória através da função do *software Easyfit*. O estoque inicial do período tem a demanda gerada subtraída, e caso o valor seja positivo, ele é armazenado e será o estoque inicial do próximo período, juntamente com o valor de reposição calculado posteriormente. No caso do valor ser negativo, o contador de faltas é incrementado de uma unidade e será armazenado, para posteriormente ser considerado no custo da falta.

Após este passo, calcula-se o ponto de reposição para cada modelo. Armazenam-se os valores dos estoques residuais numa variável que será somada ao ponto de reposição e será o estoque inicial do próximo período. E assim prossegue durante os 12 períodos. No final do décimo segundo período, verifica-se o número de meses que tiveram

falta, calcula-se a média do estoque carregado em cada período e plota-se o valor do custo desta rodada para cada um dos modelos. Este processo se repete até o final de todas as rodadas estipuladas na interface do programa, em função do limite de erro imposto.

Reprodutibilidade

Antes de iniciar a apresentação dos resultados, mostra-se reprodutibilidade do programa desenvolvido. Foram realizadas 50 rodadas da simulação do item 2 da Tabela 4.4. Portanto o programa foi rodado 50 vezes, calculando as 64.448.784 iterações para o erro de simulação de 0,50%, e cada uma destas rodadas teve sua média coletada na Tabela 4.5, apresentada abaixo.

Tabela 4.5 – Médias dos custos de cada um dos modelos calculadas de cada rodada de 64.448.784 iterações – repetidas 50 vezes

RODADA	MÉDIA CUSTO MODELO PROPOSTO	MÉDIA CUSTO MODELO EMPRESA
1	2.293,50	2.664,58
2	2.293,44	2.664,56
3	2.293,45	2.664,44
4	2.293,51	2.664,50
5	2.293,52	2.664,58
6	2.293,37	2.664,41
7	2.293,48	2.664,53
8	2.293,52	2.664,58
9	2.293,41	2.664,57
10	2.293,35	2.664,35
11	2.293,35	2.664,64
12	2.293,67	2.664,47
13	2.293,40	2.664,43
14	2.293,36	2.664,46
15	2.293,55	2.664,50
16	2.293,43	2.664,43

17	2.293,54	2.664,50
18	2.293,46	2.664,20
19	2.293,50	2.664,47
20	2.293,51	2.664,53
21	2.293,51	2.664,60
22	2.293,55	2.664,55
23	2.293,62	2.664,56
24	2.293,39	2.664,42
25	2.293,46	2.664,51
26	2.293,34	2.664,50
27	2.293,51	2.664,48
28	2.293,57	2.664,43
29	2.293,53	2.664,62
30	2.293,46	2.664,56
31	2.293,60	2.664,58
32	2.293,48	2.664,54
33	2.293,45	2.664,67
34	2.293,72	2.664,66
35	2.293,42	2.664,45
36	2.293,36	2.664,55
37	2.293,40	2.664,50
38	2.293,52	2.664,61
39	2.293,54	2.664,61
40	2.293,55	2.664,56
41	2.293,29	2.664,45
42	2.293,51	2.664,55
43	2.293,52	2.664,47
44	2.293,47	2.664,54
45	2.293,53	2.664,64
46	2.293,48	2.664,50
47	2.293,64	2.664,50

48	2.293,31	2.664,52
49	2.293,46	2.664,46
50	2.293,42	2.664,54
MÉDIA TOTAL	2.293,48	2.664,52

Resultados

Nesta seção são analisados os resultados encontrados após a realização de todas as simulações para os oito itens estudados (Figura 4.1(h)). O objetivo é comparar os custos obtidos com as políticas de estoque dos dois modelos nestas simulações. Na Tabela 4.6 estão resumidos os principais valores encontrados nestas comparações.

Tabela 4.6 – Resultados obtidos após simulações para todos os itens analisados.

ITEM	ERRO SIMULAÇÃO - ε	ITERAÇÕES	QTD DE ITERACOES COM FALTA - NB	QTD DE ITERAÇÕES COM FALTA - MODELO EMPRESA	% ITERAÇÕES SEM FALTA - MODELO PROPOSTO	% ITERAÇÕES SEM FALTA - MODELO EMPRESA	CUSTO MEDIO - MODELO PROPOSTO	CUSTO MEDIO - MODELO EMPRESA	MODELO COM MENOR CUSTO	% DESCONTO MODELO PROPOSTO
ITEM 1 - COMERCIAL	0,55%	942.665	1.451	0	99,85%	100,00%	\$1.674,73	\$3.499,04	PROPOSTO	52%
ITEM 2 - COMERCIAL	0,50%	64.448.784	1.420.130	1.057.860	97,80%	98,36%	\$2.293,50	\$2.664,58	PROPOSTO	14%
ITEM 3 - EXECUTIVA	0,50%	13.973.542	248.047	1.582	98,18%	99,99%	\$977,64	\$1789,44	PROPOSTO	45%
ITEM 4 - OUTROS	0,50%	907.142	1.692	75	99,82%	99,99%	\$1.192,42	\$2.584,63	PROPOSTO	54%
ITEM 5 - COMERCIAL	0,50%	919.528	1.072	1	99,89%	100,00%	\$767,48	\$2.176,88	PROPOSTO	65%
ITEM 6 - EXECUTIVA	0,50%	976.658	8.390	597	99,11%	99,94%	\$1.080,07	\$2.747,45	PROPOSTO	61%
ITEM 7 - EXECUTIVA	0,50%	24.424.748	437.274	85.801	98,15%	99,65%	\$1.105,64	\$1.605,95	PROPOSTO	31%
ITEM 8 - COMERCIAL	0,60%	926.888	7.326	1	99,22%	100,00%	\$762,69	\$1.703,00	PROPOSTO	55%

Na Tabela é possível observar que o custo médio do modelo proposto foi inferior em todos os comparativos. No pior caso, ele é 14% mais econômico que o modelo da empresa, isto já computado tanto o custo de carregamento de estoque quanto custo de falta. O número de iterações foi sempre bastante elevado e significativo, o que ajuda a eliminar suspeitas de qualquer viés ou sorte durante as rodadas no simulador. A reprodutibilidade já abordada também embasa os resultados. É possível observar que os itens com maior desvio padrão da Tabela 4.4, tiveram o maior percentual de faltas. Este fato, não inviabiliza a utilização do modelo proposto, pois os valores para falta foram muito baixos, sendo no pior caso de apenas 2,20% para o item 2 da Tabela 4.6. De forma geral todos os itens tiveram valores muito baixos de falta.

O modelo atual da empresa apresenta um número menor de faltas, como esperado, porém quando analisado juntamente com os custos envolvidos, temos na média um desconto de 42% no valor do custo médio com a adoção do modelo proposto. Ou seja, é uma diferença muito pequena no atendimento, em face de uma grande diferença nos custos envolvidos. Assim, o modelo proposto parece ser uma melhor opção para apoiar decisões e ser adotado como política de planejamento de estoques na empresa.

É possível verificar ainda nos resultados que não existe grande tendência por unidade de negócio: comercial, executiva ou defesa. Este paralelo não pode ser feito, pois, por exemplo, para a área Comercial, tem-se o melhor e o pior resultado nos custos avaliados. Importa mais o comportamento da demanda, neste caso o desvio padrão, do que a qual unidade de negócio pertence o item. Convém salientar que este comportamento contrariou a intuição deste pesquisador, pois é apregoado na empresa que a demanda da unidade Comercial é mais estável do que as demais áreas, que possuem demandas mais “nervosas”. Contudo, este estudo mostrou que isto nem sempre é verdade.

Voltando para a análise comparativa, já se esperava um bom resultado do modelo atual adotado pela empresa em relação a faltas, tendo em vista o tipo de negócio praticado pela companhia, pouco tolerante a faltas ou, neste caso, atrasos. Os produtos comercializados são de alto valor, os clientes extremamente exigentes com o cumprimento dos prazos acordados, uma vez que necessitam esperar meses entre a aquisição e a entrega de uma aeronave, pois os tempos de fabricação são elevados. Assim, quanto mais baixo o elo produtivo, maior a segurança envolvida, pois os custos serão marginais perto do produto final.

Mesmo com o bom desempenho apresentado pelo modelo atual da empresa em relação a faltas, é possível verificar que os custos para manter esta segurança são extremamente elevados, e não são justificáveis, nem se traduzem em melhor desempenho que o modelo proposto. Na verdade, se ponderarmos o nível de atendimento com os custos totais envolvidos, vemos uma larga vantagem no modelo proposto, o que reforça os objetivos deste estudo.

5. Conclusões e pesquisas futuras

O objetivo principal deste trabalho foi atingido, que era o de avaliar a abordagem proposta pelo modelo do jornaleiro multiperíodo para o setor de peças primárias subcontratadas da indústria aeroespacial. Foi demonstrado que o modelo do jornaleiro multiperíodo captura, e responde melhor ao cenário atual da indústria aeroespacial, do que o modelo atualmente utilizado pela empresa estudada. Assim, neste estudo, um comparativo foi feito entre o modelo baseado no problema do jornaleiro multiperíodo e o modelo da empresa. Esse comparativo mostrou que o modelo proposto foi superior ao modelo da empresa estudada com relação aos custos envolvidos. Não é possível concluir que esse modelo proposto é o melhor método para a política de estoques existente, porém é possível afirmar que ele tem um desempenho melhor e mais robusto do que o modelo atualmente utilizado, sendo mais econômico do que o modelo utilizado pela empresa com praticamente o mesmo nível de serviço.

Uma questão com relação a adoção do modelo proposto na prática é que ele envolve um método um pouco trabalhoso de cálculo, começando pela análise da distribuição de probabilidade da demanda. Quando a distribuição não é normal, é preciso integrar os limites da função distribuição de probabilidade, o que nem sempre é simples de ser automatizado, assim como validar os resultados através da simulação de Monte Carlo. Porém, como demonstrado neste trabalho, existe o embasamento para simplificar as análises através de uma distribuição normal, desde que respeitado o teste de hipótese, utilizando-se então apenas a média e o desvio padrão, facilitando assim os cálculos do problema. Uma outra hipótese simplificadora e que pode ser adotada é com relação ao nível de serviço, como nesta indústria a falta é muito custosa, é possível adotar um padrão elevado e assim também facilitar a parte de cálculo envolvendo o custo da falta.

Assim, simplificando estes pontos, a adoção na prática torna-se menos trabalhosa e de mais fácil aceitação, pelos tomadores de decisão, que nem sempre dispõem de pessoal com maior qualificação sobre abordagens de otimização para gestão de estoques, sendo necessário sua simplificação.

Os resultados obtidos, em que a economia foi de no mínimo 35% nos itens aqui estudados, reforçam o potencial de aplicação/implementação do modelo na prática. O custo

de implementação é muito pequeno, pois, com as simplificações expostas, podem ser desenvolvidas macros em planilhas eletrônicas (por exemplo, *Microsoft Excel*) que retornam os valores para o problema do jornaleiro multiperíodo de forma automática. A adaptação destas macros para o uso com dados em massa não parece ser um obstáculo para implementação computacional, e com a economia potencial demonstrada neste trabalho, este custo torna-se desprezível.

5.1. Perspectivas para pesquisas futuras

Este trabalho procurou apresentar uma proposta de abordagem para gestão de estoques de igual ou melhor resultado que o setor de peças primárias da indústria aeronáutica vem utilizando. O objetivo foi alcançado, porém ainda existem algumas lacunas a serem exploradas. Algumas sugestões para pesquisas futuras são:

- Comparar o modelo de revisão periódica multiperíodo com outros modelos encontrados na literatura.
- Estender este modelo a outros elos da indústria aeroespacial.
- Avaliar o desempenho do modelo para casos onde o custo de *setup*, $P > 0$, seja relevante. Neste caso o modelo teria que ser estendido para considerar essa alternativa, e esta extensão não parece ser simples.
- Comparar o modelo aqui apresentado com modelos onde o *lead time*, seja grande e, portanto $\tau > 0$, não possa ser simplificado. A extensão do modelo para esse caso também não parece ser simples.

Assim, temos ainda algumas lacunas a serem exploradas dentro da área do problema do jornaleiro multiperíodo e também nas suas aplicações dentro da indústria aeroespacial. Como abordado neste trabalho, os modelos multiperíodo ainda são pouco explorados na literatura, mas como apresentado neste estudo, existem várias aplicações potenciais e possibilidades interessantes para que o tema seja investigado e desenvolvido.

Referências

- AHARON, B., BOAZ G., SHIMRIT, S. **Robust multi-echelon multi-period inventory control**, European Journal of Operational Research Vol.199, pp. 922–935, 2009.
- AIAB. **Números da Industria Brasileira** - <http://www.aiab.org.br/numeros-da-aiab.asp>, acessado em 13/03/2016.
- AXSATER, S. **Inventory Control**. 2th Ed. Springer Science, 2006.
- BALLOU, R.H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos/logística empresarial – 5 ed. – Porto Alegre: Bookman, 2006.**
- BERTRAND, J.W.M.; FRANSOO, J.C. **Operations management research methodologies using quantitative modeling**, International Journal of Operations & Production Management, Vol.22 Issue 2 pp. 241-264, 2002.
- CAUCHICK MIGUEL, P.A. (Org.). **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. São Paulo: Elsevier, 2012.
- DELOITTE. http://www.ontaero.org/Storage/29/2375_Deloitte_presentation_11-12-2013.pdf, 2013
- DOSTALER, I. **Competing in the global aerospace supply chain: The case of the Canadian aerospace industry**. Operations management research: OMR, Vol 6, p. 32-43, 2013.
- EMILIANI, M.L., **Sourcing in the global aerospace supply chain using online reverse auctions**. Industrial Marketing Management, Vol 33, pp. 65-72, 2004.
- FERRARESI, D., **Fundamentos da Usinagem dos Metais – volume 1**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1977.
- FORRESTER, J.W.; **INDUSTRIAL DYNAMICS**. MIT Press, 1961.
- FREIRE, G. ; **Estudo Comparativo de Modelos de Estoques num Ambiente com Previsibilidade de Variável de Demanda**. Dissertação de Mestrado, USP, 2007.
- GALLEGO, G.; MOON, I. **The Distribution Free Newsboy Problem: Review and Extensions**. Journal of Operational Research Society. 44, 825-834, 1993.
- GARCIA, E. S.; DOS REIS, L. M .T. V., MACHADO, L. R.; FERREIRA FILHO, V.J.M. **Gestão de Estoques: Otimizando a logística e a cadeia de suprimentos**. 1 ed. Rio de Janeiro: E-Papers Serviços Editoriais, 2006.
- GARGIULO, F.R.; **Indústria de Construção Aeronáutica, o Caso da EMBRAER: História e Avaliação**. Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado – FGV, 2008.

GODINHO FILHO, M.; FERNANDES, F.C F.. **Redução da instabilidade e melhoria de desempenho do sistema MRP**. Prod., São Paulo , v. 16, n. 1, p. 64-79, Apr. 2006 .

GOMES, S. B. V.; **A Indústria Aeronáutica no Brasil: Evolução Recente e Perspectivas**. http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Institucional/Publicacoes/Consulta_Expressa/Tipo/BNDES_Setorial/201210_4.html. 2012.

HADLEY,G.; WHITIN, TM. **Analysis of inventory systems**. Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Englewood, 1963.

HILLIER, F.S.; LIEBERMAN, G. J. **Introduction to Operations Research**. 7th ed. McGraw-Hill College,2001.

JOHNSON, L.; MONTGOMERY, D.C. **Operations Research in Production Planning, Scheduling, and Inventory Control**. 1 ed. New York: John Wiley & Sons, 1974.

KIESMULLER, G.P., **Multi-item inventory control with full truckloads: A comparison of aggregate and individual order triggering**, European Journal of Operational Research vol.200 pp. 54–62, 2010.

KHOUJA, M., **The single period (news-vendor) inventory problem: A literature review and suggestions for future research**, The International Journal of Management Science, Omega, vol. 27, 537-553, 1999.

LUSTOSA, L.; MESQUITA, M.A.; QUELHAS,O.; OLIVEIRA,R.J., **Planejamento e Controle da Produção**, Elsevier Brasil,2008.

MARTIN, C., **Logística e gerenciamento na cadeia de suprimentos**. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

MATSUYAMA, K. **The multi-period newsboy problem**. European Journal of Operational Research, Elsevier, vol.171, 170-188, 2006.

MITROFF, I.;BETZ, F.; PONDY, L. & SAGASTI, F. **On managing science in the systems age: two schemas for the study of science as a whole systems phenomenon**. Interfaces, v.4 n.3, p.46-58, 1974.

MONTORO,G.C.F.; MIGON, M. N. (Org.). **Cadeia produtiva aeronáutica brasileira: oportunidades e desafios**. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2009. 551 p. ISBN 9788587545305.

NAGIHAN Ç., TIMOTHY K., **Joint inventory and constant price decisions for a continuous review system**, International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, Vol. 42 Iss: 2, pp.174 – 202,2012.

OHNO, T., **O sistema Toyota de produção: Além da produção em larga escala**, Porto Alegre: Artes Médicas, 1997.

PARLAR, M. **Game theoretic analysis of the substitutable product inventory problem with random demand**. Naval Res Logist, 1988. 397-409.

PFEIFER, P. **The airline discount fare allocation problem**. Decis Sci, 1989. 20:149-157.

QIN,Y.;WANG,R.;VAKHARIA;A.J.;CHEN,Y.;SEREF,M.M.H.**The newsvendor problem: Review and directions for future research**, European Journal of Operational Research vol. 213 pp. 361–374 (2011).

REGO, J. R. do; MESQUITA, M.A. de, **Controle de estoques de peças de reposição: uma revisão da literatura**. Produção, v.21 n.4 pp. 645-655, 2011.

SALCEDO, C.A.G.;HERNANDEZ, A.I.;VILANOVA,R.;CUARTAS, J.H. **Inventory control of supply chains: Mitigating the bullwhip effect by centralized and decentralized Internal Model Control approaches**. European Journal of Operational Research vol. 224 pp.261–272, 2013.

SANTORO, M.C.; **Sistemas de Gestão de Estoques de Múltiplos Itens em Local Único**. Tese de Livre Docência, USP, 2006.

SANTORO, M. C.; FREIRE, G.. **Análise comparativa entre modelos de estoque**. Produção, v. 18, n. 1, pg:89 -98, 2008.

SAXENA, P., **Inventory Management Simulation**, International Transactions in Applied Sciences, Vol.2, Issue 2, pp. 327-334, 2010.

SCARF, H.; **“A Min-Max Solution of an Inventory Problem”**. Studies in The Mathematical Theory of Inventory and Production, Stanford Univ. Press., Capítulo 12, 1958.

SCHWARTZ, J.; RIVERA, D. E., **A process control approach to tactical inventory management in production-inventory systems**, Int. J. Production Economics vol.125 pp.111–124,2010.

SCHMITT, A. J. & SNYDER, L. V. **Infinite-horizon models for inventory control under yield uncertainty and disruptions**, Computers & Operations Research, Volume 39, Edição 4, p. 850-862, 2012.

SILVER, E.A.; PYKE, D.F.; PETERSON, R. **Inventory Management and Production Planning and Scheduling**. Terceira edição, Wiley, 1998.

SLACK,N.; CHAMBERS,S.; JOHNSTON,R. **Administração da Produção**. Segunda edição, São Paulo: Atlas, 2002.

WEIL, K.E. **Compra e estoque de peças para manutenção**. Revista de Administração de Empresas vol 6 no.19, p.95-113.

ZANG, D.;XU, H.;WU, Y. ***Single and multi-period optimal inventory control models with risk-averse constraints***, European Journal of Operational Research vol. 199 pp. 420–434 (1999).

Apêndice A - Programa em VBA para simulação Monte Carlo entre os modelos estudados.

```
Sub PROGRAMA_SMC()  
Dim i, j, k As Long  
Dim iteracoes As Long  
Dim RG As Range  
Dim RG2 As Range  
Dim STK_NB As Long  
Dim STK_EOQ As Long  
Dim demanda As Long  
Dim desvpad As Double  
Dim media As Double  
Dim CUSTO_UNIT As Double  
Dim EOQ As Long  
Dim SS As Long  
Dim LOTE_EOQ As Long  
Dim LOTE_NB As Long  
'DURACAO  
Dim INICIO As String  
Dim FIM As String  
'QTD DE FALTAS  
Dim FALTAS_NB As Long  
Dim FALTAS_EOQ As Long  
'VARIABLES DE CUSTO  
Dim CUSTO_CARREGAMENTO As Double  
Dim CUSTO_FALTA As Double  
Dim TX_FALTA As Double 'TAXA DE FALTA - 1 EVENTO  
Dim TX_CARREGAMENTO As Double 'TAXA DE CARREGAMENTO DE ESTOQUE  
'VARIABLE PARA ARREDONDAR E CRIAR MULTIPLOS DO EOQ
```

Dim ARRED As Long

'VARIAVEL PARA GUARDAR O VALOR QUE CALCULARÁ O ESTOQUE MEDIO DO PERIODO

Dim STK_ACUM_EOQ As Long

Dim STK_MEDIO_EOQ As Long

Dim STK_ACUM_NB As Long

Dim STK_MEDIO_NB As Long

'CUSTO TOTAL NB E EOQ

Dim CUSTO_NB As Double

Dim CUSTO_EOQ As Double

'VARIAVEL DE DEMANDA MEDIA PARA AUXILIAR NO PONTO DE PEDIDO

Dim DEMANDA_MEDIA As Long

Application.DisplayAlerts = False

INICIO = Now

Set RG = Worksheets("ENTRADAS").Cells(1, 1)

Set RG2 = Worksheets("RESULTADOS").Cells(1, 1)

'LIMPA A PLANILHA DE RESULTADOS

Worksheets("RESULTADOS").Cells.Clear

'numero de iteracoes necessárias para rodar o modelo com o erro considerado

iteracoes = Worksheets("ENTRADAS").Cells(5, 3)

'VARIAVEIS PARA GERACAO DOS NUMEROS ALEATORIOS

media = Worksheets("ENTRADAS").Cells(3, 9)

desvpad = Worksheets("ENTRADAS").Cells(4, 9)

'VARIAVEIS DE ESTOQUE E CUSTO

CUSTO_UNIT = Worksheets("ENTRADAS").Cells(5, 9)

'CARREGA O VALOR DA TAXA DE FALTA PARA CALCULAR O CUSTO DA FALTA NO FINAL

TX_FALTA = Worksheets("ENTRADAS").Cells(9, 18)

'TAXA DE CARREGAMENTO ANUAL DE ESTOQUE

TX_CARREGAMENTO = Worksheets("ENTRADAS").Cells(6, 14)

'NEWSBOY - LOTE NB

LOTE_NB = Worksheets("ENTRADAS").Cells(6, 9)

'MODELO ATUAL COMPARATIVO - NESTE CASO DA EMPRESA ESTUDADA, PODE SER
MODIFICADO PARA OUTRAS ABORDAGENS

'LOTE ECONOMICO

EOQ = Worksheets("ENTRADAS").Cells(9, 14)

'VALOR DO ESTOQUE DE SEGURANÇA UTILIZADO

SS = Worksheets("ENTRADAS").Cells(4, 18)

'LOTE INICIAL FINAL, CONSIDERANDO O LOTE EOQ MAIS A SEGURANCA

LOTE_EOQ = EOQ

'DEMANDA MEDIA PARA AUXILIAR NO PONTO DE REPOSICAO DO EOQ

DEMANDA_MEDIA = Worksheets("ENTRADAS").Cells(3, 14)

'*****

'LOOP DAS ITERAÇÕES

For i = 1 To iteracoes

'NA PRIMEIRA ITERACAO O ESTOQUE É IGUAL AO LOTE CALCULADO

STK_NB = LOTE_NB

STK_EOQ = LOTE_EOQ + SS

'na primeira iteração o ponto de reposição é zero

R_NB = 0

R_EOQ = 0

'as faltas são 0 no primeiro ponto

FALTAS_EOQ = 0

FALTAS_NB = 0

k = 0

'ZERA A VARIÁVEL DE ESTOQUE ACUMULADO (MÉDIO)

STK_ACUM_EOQ = 0

STK_ACUM_NB = 0

!*****

'PERÍODO DE WARMUP

For j = 1 To 4

'CÁLCULO DOS MODELOS NEWBOY E MODELO ATUAL + REORDER POINT

'ESTOQUE INICIAL NO PERÍODO

STK_NB = STK_NB + R_NB

STK_EOQ = STK_EOQ + R_EOQ

'FUNÇÃO DO EASYFIT PARA GERAR UM NÚMERO ALEATORIO COM A DISTRIBUIÇÃO
NORMAL (DESVPAD, MÉDIA)

'DEMANDA NO PERÍODO

demanda = NormalRand(desvpad, media)

'ESTOQUE NO FINAL DO PERÍODO

STK_NB = STK_NB - demanda

STK_EOQ = STK_EOQ - demanda

'VARIÁVEL DE DECISÃO DE PEDIR

'NEWSBOY

If LOTE_NB > STK_NB Then

R_NB = (LOTE_NB - STK_NB)

Else

R_NB = 0

End If

'MODELO ATUAL

'AVALIA SE O ESTOQUE NO FINAL DO PERIODO É MAIOR QUE A SEGURANÇA E A
DEMANDA MEDIA

'PARA DECISAO DE PEDIR OU NAO

If STK_EOQ < SS + DEMANDA_MEDIA Then 'TEM QUE PEDIR

'VERIFICA O QUANTO FALTA PEDIR, E QTAS VEZES O LOTE EOQ SERÁ NECESSARIO NO
PERIODO

PONDERACAO = (SS + DEMANDA_MEDIA) - STK_EOQ

'ESTA PARTE CONSIDERA O ARREDONDAMENTO PARA O EOQ, CASO SEJA NECESSÁRIO
MAIS DE UM PEDIDO NO MÊS

ARRED = Round(PONDERACAO / LOTE_EOQ, 0)

If ARRED <= 1 Then

R_EOQ = LOTE_EOQ

Else

R_EOQ = LOTE_EOQ * ARRED

End If

Else

'CASO O STK_EOQ NO PERIODO JÁ SEJA MAIOR QUE A SEGURANCA + DEMANDA MEDIA,
NÃO SERÁ PEDIDO NADA

R_EOQ = 0

'CONSIDERAÇÃO SIMULANDO A DEMANDA DO PRÓXIMO PERÍODO - SE FERIR O ESTOQUE
DE SEGURANCA

'JÁ ACIONA UM LOTE PARA PREVINIR A FALTA

'TEMP = NormalRand(desvpad, media)

'If (STK_EOQ - TEMP) < SS Then

```

'R_EOQ = LOTE_EOQ
'Else
'R_EOQ = 0
'End If

End If

Next

*****
*****

'FIM DO PERIODO DE WARMUP

'NOVA ITERAÇÃO PARA AVALIAR 12 MESES DE ESTOQUE
For j = 1 To 12

'CALCULO DOS MODELOS NEWBOY E MODELO ATUAL + REORDER POINT
'ESTOQUE INICIAL NO PERIODO
STK_NB = STK_NB + R_NB
STK_EOQ = STK_EOQ + R_EOQ

'FUNCAO DO EASYFIT PARA GERAR UM NUMERO ALEATORIO COM A DISTRIBUICAO
NORMAL (DESVPAD, MEDIA)
'DEMANDA NO PERIODO
demanda = NormalRand(desvpad, media)

'ESTOQUE NO FINAL DO PERIODO
STK_NB = STK_NB - demanda
STK_EOQ = STK_EOQ - demanda

'GUARDA O VALOR NA TABELA RESULTADOS

```

```

RG2.Cells(i + 1, j + 1) = STK_NB
RG2.Cells(i + 1, j + 13) = STK_EOQ
'ITERACAO
RG2.Cells(i + 1, 1) = i

```

```

'VARIÁVEL DE DECISÃO DE PEDIR

```

```

'NEWSBOY

```

```

If LOTE_NB > STK_NB Then

```

```

R_NB = (LOTE_NB - STK_NB)

```

```

Else

```

```

R_NB = 0

```

```

End If

```

```

'MODELO ATUAL

```

```

'AVLIA SE O ESTOQUE NO FINAL DO PERIODO É MAIOR QUE A SEGURANÇA E A
DEMANDA MEDIA

```

```

'PARA DECISAO DE PEDIR OU NAO

```

```

If STK_EOQ < SS + DEMANDA_MEDIA Then 'TEM QUE PEDIR

```

```

'VERIFICA O QUANTO FALTA PEDIR, E QTAS VEZES O LOTE EOQ SERÁ NECESSARIO NO
PERIODO

```

```

PONDERACAO = (SS + DEMANDA_MEDIA) - STK_EOQ

```

```

'ESTA PARTE CONSIDERA O ARREDONDAMENTO PARA O EOQ, CASO SEJA NECESSÁRIO
MAIS DE UM PEDIDO NO MÊS

```

```

ARRED = Round(PONDERACAO / LOTE_EOQ, 0)

```

```

If ARRED <= 1 Then

```

```

R_EOQ = LOTE_EOQ

```

```

Else

```

```

R_EOQ = LOTE_EOQ * ARRED

```

```

End If

```

```
'R_EOQ = LOTE_EOQ + (SS - STK_EOQ)
```

```
Else
```

```
'CASO O STK_EOQ NO PERIODO JÁ SEJA MAIOR QUE A SEGURANCA + DEMANDA MEDIA,  
NÃO SERÁ PEDIDO NADA
```

```
R_EOQ = 0
```

```
'CONSIDERAÇÃO SIMULANDO A DEMANDA DO PRÓXIMO PERÍODO - SE FERIR O ESTOQUE  
DE SEGURANCA
```

```
'JÁ ACIONA UM LOTE PARA PREVINIR A FALTA
```

```
'TEMP = NormalRand(desvpad, media)
```

```
'If (STK_EOQ - TEMP) < SS Then
```

```
'R_EOQ = LOTE_EOQ
```

```
'Else
```

```
'R_EOQ = 0
```

```
'End If
```

```
End If
```

```
'AVALIA AS FALTAS E 'GUARDA O VALOR DO MES PARA NO FINAL AVALIAR O ESTOQUE  
MEDIO DO PERIODO (12 MESES)
```

```
If STK_NB < 0 Then
```

```
STK_ACUM_NB = STK_ACUM_NB 'GUARDA O STK ACUM
```

```
FALTAS_NB = FALTAS_NB + 1
```

```
Else
```

```
STK_ACUM_NB = STK_NB + STK_ACUM_NB
```

```
End If
```

```
If STK_EOQ < 0 Then
```

```
STK_ACUM_EOQ = STK_ACUM_EOQ 'GUARDA O STK ACUM EOQ
```

FALTAS_EOQ = FALTAS_EOQ + 1

Else

STK_ACUM_EOQ = STK_EOQ + STK_ACUM_EOQ

End If

Next

'GUARDA O VALOR NA TABELA RESULTADOS

RG2.Cells(i + 1, 26) = FALTAS_NB

RG2.Cells(i + 1, 28) = FALTAS_EOQ

'CALCULA O ESTOQUE MEDIO NO PERIODO PARA AVALIAR O CUSTO

STK_MEDIO_EOQ = Round((STK_ACUM_EOQ / 12), 0)

STK_MEDIO_NB = Round((STK_ACUM_NB / 12), 0)

RG2.Cells(i + 1, 27) = STK_MEDIO_NB

RG2.Cells(i + 1, 29) = STK_MEDIO_EOQ

'CALCULA O CUSTO - NB E EOQ

CUSTO_NB = (STK_MEDIO_NB * TX_CARREGAMENTO * CUSTO_UNIT) + (FALTAS_NB *
TX_FALTA)

CUSTO_EOQ = (STK_MEDIO_EOQ * TX_CARREGAMENTO * CUSTO_UNIT) + (FALTAS_EOQ *
TX_FALTA)

RG2.Cells(i + 1, 30) = CUSTO_NB

RG2.Cells(i + 1, 31) = CUSTO_EOQ

Next

'GRAVA OS TITULOS DAS COLUNAS

Worksheets("RESULTADOS").Cells(1, 1) = "ITERAÇÃO"

For i = 1 To 12

Worksheets("RESULTADOS").Cells(1, i + 1) = "NB - MES " & i

Worksheets("RESULTADOS").Cells(1, i + 13) = "ATUAL - MES " & i

Next

Worksheets("RESULTADOS").Cells(1, 26) = "FALTAS NB"

Worksheets("RESULTADOS").Cells(1, 27) = "STK MÉDIO NB"

Worksheets("RESULTADOS").Cells(1, 28) = "FALTAS EOQ"

Worksheets("RESULTADOS").Cells(1, 29) = "STK MÉDIO EOQ"

Worksheets("RESULTADOS").Cells(1, 30) = "CUSTO NB"

Worksheets("RESULTADOS").Cells(1, 31) = "CUSTO EOQ"

'FINALIZA O CALCULO DO TEMPO E PLOTA OS VALORES NA PLANILHA

FIM = Now

Worksheets("ENTRADAS").Cells(12, 2) = INICIO

Worksheets("ENTRADAS").Cells(13, 2) = FIM

Set RG2 = Nothing

Set RG = Nothing

Application.DisplayAlerts = True

MsgBox ("FIM !")

End Sub