KLAUS DIETER HOLZHEY

GESTÃO DE ESTOQUES DE PEÇAS COM MÚLTIPLOS
FORNECEDORES

São Paulo

2013

KLAUS DIETER HOLZHEY

GESTÃO DE ESTOQUES DE PEÇAS COM MÚLTIPLOS
FORNECEDORES

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

São Paulo

2013

KLAUS DIETER HOLZHEY

GESTÃO DE ESTOQUES DE PEÇAS COM MÚLTIPLOS
FORNECEDORES

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

Área de concentração:
Engenharia de Sistemas Logísticos

Orientador: Professor Livre-docente
Miguel Cezar Santoro

São Paulo

2013

FICHA CATALOGRÁFICA

Holzhey, Klaus Dieter

**Gestão de estoques de peças com múltiplos fornecedores /
K.D. Holzhey. -- São Paulo, 2013.**

p.

**Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.
Sistemas Logísticos.**

**1. Administração de estoques (Modelos) 2. Logística I. Uni-
versidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de
Engenharia de Transportes II. t.**

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Stella, que pacientemente abriu mão de inúmeros fins de semana durante os dois anos que me dediquei a este trabalho, que se viu preterida por um punhado de livros, artigos e um computador, mas que mesmo assim me apoiou e incentivou ao longo de toda jornada, principalmente nos momentos de estagnação criativa;

Aos meus pais Elke e German, cujos ensinamentos, valores e apoio desde minhas primeiras letras aprendidas na escola, me permitiram estudar e alcançar um programa de mestrado;

Ao irmão Ralf que como exemplo de perseverança e através de suas ideias e críticas, sempre me incentivou a buscar algo a mais e desafiou para que este algo a mais sempre fosse o melhor possível;

Ao amigo Luiz Paulo, cujo incentivo foi fundamental para que eu iniciasse esse trabalho;

Aos inúmeros amigos que pacientemente ouviram durante dois anos “quando eu terminar o mestrado..” e souberam entender minha falta de tempo durante esse período;

À Escola Politécnica da USP e todos seus membros, professores, funcionários e alunos, cuja convivência desde as épocas da graduação contribuiu para minha formação e para conclusão deste trabalho;

Em especial ao Professor Miguel Cezar Santoro, cuja orientação e apoio tornaram o trabalho possível.

RESUMO

O trabalho a seguir apresenta o desenvolvimento e resultados da pesquisa acerca de modelos de estoques para múltiplos fornecedores, baseado na distribuição de peças de manutenção de empresas de tecnologia no Brasil. Em função de características de demandas erráticas, altos custos das peças e demanda por tempos de entrega reduzidos, costuma-se adotar uma estratégia de distribuir peças em diversos centros de estoques por todo território nacional. Entretanto, manter altos estoques em cada uma das localidades do sistema pode trazer custos elevados. Devido às características da demanda, muitas vezes ocorrem faltas de estoques de itens críticos, que são enviados aos locais de demanda por meio de transportes emergenciais de alto custo e prazos de entregas reduzidos. Entretanto, os modelos convencionais de estoques adotados, não consideram as possibilidades de envios emergenciais em suas formulações, fazendo desta solução uma situação não prevista na modelagem e potencialmente não ótima. A presente pesquisa tem por objetivo desenvolver e avaliar os modelos convencionais de estoques para a situação de múltiplos fornecedores considerando custos e prazos de entregas diferentes, como alternativa para os modelos adotados na distribuição de peças de manutenção. Sua aplicação a outros problemas, inclusive ambientes de múltiplos fornecedores independentemente de diferenças de transportes é imediata. A pesquisa abrange sete modelos, sendo três modelos reativos (reposição da base, reposição do máximo e lote fixo) em regimes de revisão periódica e contínua, e um modelo ativo considerando previsão de demanda. Foi utilizada busca local com simulação de eventos discretos para resolver os modelos propostos.

PALAVRAS CHAVE: Modelos de estoques com múltiplos fornecedores. Múltiplos pontos de reposição. Busca local com simulação de eventos discretos.

ABSTRACT

The present work presents research and development of multiple supplier inventory models, based on the service parts logistics in the technology industry. Because of the lumpy demand characteristics, high costs of parts and low delivery time expectations, a strategy to spread parts inventories all over the country was adopted. However, maintaining high inventory in every location of the system can lead to high costs. Because of the demand characteristics critical items can get unavailable in certain location, which are supplied by emergency shipment from supplying locations with high transportation costs and reduced delivery times. However, the conventional inventory models that are used do not consider the possibility of emergency shipments, leading to potential non optimal distribution of parts. The present research aims to develop and evaluate the inventory models considering multiple transportation modals with different lead times and costs, to serve as an alternative to the current inventory models used. The application to other problems, including different suppliers independent of transportation mode, is immediate. The research covers seven different models: three reactive, (s, S) , $(S-1, S)$ and (R, Q) in continuous and periodic review, and one demand prediction based model. Local search and discrete events simulation was used to resolve the models.

KEYWORDS: Multiple suppliers inventory models. Multiple reorder points. Local search with discrete events simulation.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1. Descrição do Problema.....	9
1.2. Objetivos e decisões do problema.....	12
1.3. Motivação	13
1.4. Organização do trabalho	16
2. PROPOSTA DE PESQUISA	18
2.1. Hipóteses e restrições da pesquisa.....	21
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
3.1. O problema da distribuição de peças de manutenção	23
3.2. Determinação de modelos de estoques através de busca local com simulação de eventos discretos	29
4. FUNCIONAMENTO DOS MODELOS.....	31
4.1. Modelos de estoque com um fornecedor.....	32
4.1.1. Modelos reativos com um fornecedor.....	32
4.1.1.1. Modelo reativo de reposição do máximo com um fornecedor (s, S)	33
4.1.1.2. Modelo reativo de reposição da base com um fornecedor $(S-1, S)$	34
4.1.1.3. Modelo reativo de lote fixo com um fornecedor (R, Q)	36
4.2. Modelos de estoque com múltiplos fornecedores	39
4.2.1. Modelos reativos com múltiplos fornecedores	40
4.2.1.1. Modelo reativo de reposição do máximo com múltiplos fornecedores (s_i, S_i) 41	
4.2.1.2. Modelo reativo de reposição da base com múltiplos fornecedores (S_i-1, S_i) 44	
4.2.1.3. Modelo reativo de lote fixo com múltiplos fornecedores (R_i, Q_i)	45
4.2.2. Modelo ativo com múltiplos fornecedores.....	47
5. MODELAGEM.....	49
5.1. Modelos reativos com múltiplos fornecedores.....	54
5.2. Modelo de reposição do máximo com múltiplos fornecedores (s_i, S_i)	55
5.3. Modelo de reposição da base com múltiplos fornecedores (S_i-1, S_i)	57
5.4. Modelo de lote fixo com múltiplos fornecedores (R_i, Q_i)	58
5.5. Modelo ativo com múltiplos fornecedores	59

6. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL	62
6.1. Fluxo geral da solução computacional	62
6.2. Dados de entrada do sistema	64
6.2.1. Dados de demanda e previsão de demanda para cada item	64
6.2.2. Dados de características de cada item	65
6.2.3. Dados de configuração do sistema	66
6.3. Sementes de busca	67
6.3.1. Sementes de busca para modelos reativos	68
6.3.2. Sementes de busca para modelo ativo	70
6.4. Busca local	70
6.4.1. Busca local – Avaliação de desempenho por simulação	72
6.4.2. Busca local – Viabilização de semente	72
6.4.3. Busca local – Geração de solução vizinha para busca	73
6.4.4. Busca local – Critério de parada de busca	75
6.5. Apresentação dos resultados	75
7. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E RESULTADOS	77
7.1. Procedimento experimental	77
7.2. Resultados obtidos	79
8. ANÁLISE DOS RESULTADOS	81
8.1. Análise geral	81
8.2. Análise detalhada	83
8.2.1. Análise detalhada – custo de compra	84
8.2.2. Análise detalhada – custo de manutenção de estoques	86
8.2.3. Análise detalhada – custo de pedido	88
8.2.4. Análise detalhada – nível de atendimento mínimo	89
8.2.5. Análise detalhada – cenários de transportes	90
8.2.6. Análise detalhada – modelos de estoques	92
8.2.7. Análise detalhada – padrões de demanda	94
9. CONCLUSÕES E PRÓXIMOS PASSOS	96
10. BIBLIOGRAFIA	98

1. INTRODUÇÃO

1.1. Descrição do Problema

O problema proposto para a presente pesquisa consiste na distribuição eficiente de peças para atendimentos de garantia e/ou contratos de manutenção de empresas de tecnologia na realidade brasileira, de forma a garantir menor custo no processo logístico, englobando custos de aquisição, transportes e estocagem, dentro dos prazos adequados.

As empresas em questão são, por exemplo, fabricantes de computadores, periféricos e servidores com vendas a pessoas físicas e jurídicas em todo território nacional. Além da venda de equipamentos, os quais são providos de período de garantia geralmente de um ano, as empresas vendem contratos de manutenção para seus equipamentos. Os contratos preveem a manutenção corretiva dentro de prazos máximos estipulados, às vezes de apenas 6 horas. Essa combinação de garantia e serviços faz necessária a estruturação de uma rede de distribuição de peças de manutenção eficiente para atender às necessidades dos clientes.

Apesar da garantia oferecida aos clientes normalmente ser associada a um tempo de reparo da ordem de dias, os contratos de manutenção são em geral associados a tempos de resposta exíguos, fazendo com que o envio de peças em alguns casos seja feito em um prazo máximo de apenas duas horas entre o pedido e a entrega. Assim, faz-se necessário que as peças sejam armazenadas de forma que o seu envio se dê dentro dos padrões estabelecidos. O descumprimento dos prazos pode levar ao pagamento de multas, além de prejudicar a imagem do fabricante perante seus clientes.

Em geral, a cadeia logística de atendimento comum a estas empresas no Brasil consiste em: um Armazém Central (AC), Pontos de Estoques Descentralizados (PED) e Parceiros Reparadores com ou sem Estoques (PRE / PR).

A seguir segue uma breve descrição de cada ente dessa rede e atividades desempenhadas em cada um dos locais.

Armazém Central (AC): é a maior estrutura física do sistema, que mantém o principal estoque de peças de manutenção. Este armazém é responsável pelo recebimento de compras (importadas e nacionais), distribuição de peças para outros centros de estoques e/ou diretamente para clientes, recebimento de peças defeituosas (logística reversa), envio de peças defeituosas para centros de recondicionamento, descarte de peças irreparáveis e exportação de peças.

Pontos de Estoque Descentralizado (PED): são estruturas logísticas de médio porte que tem como função manter estoques de peças críticas próximos a centros de consumo, objetivando atendimentos em tempos dentro dos padrões de demanda contratuais. Em geral estas estruturas estão localizadas em grandes centros de consumo de peças. Dentre as atividades destes centros estão o recebimento, armazenagem e envio de peças para atendimentos dentro de uma área de cobertura restrita às proximidades destas. Nestes centros, todas as peças de retorno são imediatamente despachadas para o AC, sendo que nenhuma atividade de triagem, envio para centros de recondicionamento, destruição ou exportação é realizada nos mesmos. Os PED enviam peças apenas para chamados de contratos de manutenção, não fazendo parte do escopo de atendimentos o envio de peças para atendimentos de garantias, que têm tempos de atendimentos maiores.

Parceiros Reparadores com Estoques (PRE): consistem de pessoas jurídicas e/ou físicas que executam os reparos dos equipamentos dos clientes e que possuem em seu poder pequenos estoques de peças para atendimento imediato de contratos de manutenção. Em geral estes parceiros estão localizados em pequenos centros consumidores e/ou dedicados a contratos específicos. Todas as peças defeituosas são imediatamente retornadas para sua origem, sendo que nenhuma atividade de triagem, envio para recondicionamento, destruição ou exportação é realizada nos PRE.

Parceiros Reparadores (PR): diferem-se dos PRE por não possuírem estoques de peças. Estes parceiros são apenas pontos de demanda no processo logístico apresentado. Apesar de não possuírem estoques, são de extrema relevância no processo devido à geração de demanda por peças. Na discussão do

problema, a seguir, será adotada apenas a existência de PRE, uma vez que os PR podem ser representados como caso particular de PRE com estoque zero.

O envio de peças para os PRE é feito a partir de um PED ou do AC. Cada PRE tem um PED determinado para seu abastecimento, sendo que abastecimento dos outros PED, apesar de possível, é considerado caso de exceção.

O transporte entre AC, PED, PRE e PR é feito através de três modalidades: normal (casos não urgentes), urgente e emergencial, sendo o custo de transportes crescente na sequência apresentada e podendo variar até mais de 50 vezes entre a modalidade mais econômica e a mais eficiente. Para redução do custo de transportes na cadeia, utilizam-se na maior abrangência possível os transportes normais, entretanto em caso de falta de estoques em PED ou PRE, é necessário fazer uso de modalidades de transporte mais onerosas e eficientes.

Em situação de normalidade de abastecimento, ou seja, enquanto não há falta de peças em PRE, todos transportes de abastecimento de PRE e PED são feitos por modalidades normais, menos onerosas. Entretanto, na prática, toda vez que um PRE tem falta de estoque, pedidos emergenciais são colocados para garantir o reabastecimento rapidamente, eliminando risco de falta de estoques.

Todos os atendimentos de garantias, para os quais os prazos de entrega são da ordem de dias, são feitos a partir do AC, utilizando-se modalidade normal de transportes.

A *figura 1* apresenta o funcionamento desta cadeia logística, na qual foram omitidos os PR por conveniência, sendo estes representados por PRE em condições particulares, conforme descrito. Apesar de representadas todas rotas de transportes, nesta figura não estão representados diferentes modais de transportes que podem existir entre os diferentes entes do sistema.

Figura 1: Representação do modelo do sistema de distribuição de peças de manutenção

1.2. Objetivos e decisões do problema

O objetivo do problema apresentado é o atendimento ao menor custo possível com nível de atendimento igual ou maior que o mínimo requerido. Neste sentido, são considerados os seguintes custos no sistema: custo de aquisição de peças, custo de manutenção de estoques, custo de transportes de peças e custos de não atendimento de pedidos no prazo.

Resolver o problema proposto, ou seja, planejar o inventário do sistema descrito de tal sorte que os níveis de atendimentos mínimos sejam atingidos com menor custo possível, implica em decidir/determinar as compras que levam o sistema ao nível de inventário e alocação de peças ótimos, considerando as restrições impostas. Essa determinação de compras considera quantidades a serem

compradas e instante de colocação dos pedidos de compras, ou seja, quanto e quando comprar de forma a atingir o objetivo mencionado acima. Se por um lado uma compra maior garante maior quantidade em estoque, o que leva a aumento do nível de atendimento, manter estoques maiores implica em custos de manutenção de estoques maiores. Por outro lado, comprar menos implica em redução de custos de manutenção de estoques, porém aumenta a quantidade de pedidos e consequentemente os custos de pedidos, além de levar o sistema a maior suscetibilidade de perda de nível de serviços e consequentemente a maiores custos de não atendimento. Encontrar o ponto de equilíbrio entre manter estoques, efetuar compras maiores e menos frequentes ou compras menores e mais frequentes e incorrer em perdas de níveis de atendimento é um dos desafios do problema.

Além disso, a partir da possibilidade de fornecimento por múltiplos fornecedores com prazos e custos diferentes, é lançado um segundo desafio mais complexo de ser resolvido, que é a determinação de qual fornecedor comprar. Neste sentido, pode-se optar por comprar de fornecedores mais lentos, porém com custos reduzidos, levando à necessidade de manutenção de estoques maiores, ou então comprar de fornecedores mais rápidos com custos maiores, reduzindo os estoques.

1.3.Motivação

Segundo Cohen et al (2006), o negócio de manutenção de equipamentos ganhou relevância ao longo dos últimos anos. Somente nos Estados Unidos da América são gastos anualmente mais de um trilhão de dólares com manutenção de equipamentos de todos os tipos, desde eletrodomésticos até turbinas de aviões. Entende-se que atualmente o mercado para reparo de equipamentos é muito maior que o mercado para venda de equipamentos novos devido a expansão da venda ocorrida nas últimas décadas, que elevou o parque de equipamentos em uso a um patamar muito maior que o mercado de venda de equipamentos novos. Além disso, os resultados financeiros (margem de lucro) de manutenção e/ou serviços são

maiores que na manufatura, levando muitas empresas a redirecionarem seu foco à prestação de serviços.

Ao longo das últimas décadas vários fatores contribuíram para o crescimento do setor de serviços de manutenção: a evolução tecnológica de produtos (que podem ser reparados apenas por profissionais da área), alto valor agregado de equipamentos (que faz necessário reparo imediato para evitar lucros cessantes), dependência da sociedade de seus equipamentos, muitas contratuais e obrigações legais (manutenção de garantia), entre outros. Em geral, equipamentos são reparados através da substituição de seus componentes defeituosos por outros funcionais, fazendo com que o tempo de parada seja o mínimo. A disponibilidade de peças para manutenção tornou-se um desafio constante para os profissionais de logística, que precisam prover um estoque de peças disponíveis aonde e quando necessárias para evitar paradas prolongadas de equipamentos, ao menor custo possível.

O mercado de tecnologia brasileiro, foco desta pesquisa, é dominado por algumas características próprias. Além das características comuns neste tipo de operação, ou seja, a dependência da sociedade por tecnologia, a demanda imprevisível, o elevado custo das peças, a dispersão dos clientes e a dimensão do território tornam a solução mais complexa.

A dependência da sociedade por equipamentos de tecnologia faz com que muitas indisponibilidades de sistemas de empresas afetem milhares de pessoas diretamente, como, por exemplo, falhas nos servidores de empresas de telefonia, de serviços públicos ou de empresas aéreas, entre outros. Por outro lado, a sociedade civil também está cada vez mais dependente de seus próprios equipamentos de tecnologia, tais como computadores e notebooks, cuja falha lhes traz enormes desconfortos. Desta forma, o tempo de resposta exigido pelos clientes para falhas de equipamentos de tecnologia é bastante exíguo, podendo ser em alguns casos da ordem de horas entre a detecção da falha e o reestabelecimento da funcionalidade. Além disso, considera-se que um dos fatores de maior insatisfação no atendimento de manutenção é a demora na conclusão do serviço, muitas vezes devido à indisponibilidade de peças, tornando o atendimento rápido uma estratégia competitiva de muitas empresas. Cohen et al (2006) exemplificam o aumento da exigência de nível de serviços. Os autores mencionam que, em 1980 na indústria de

semicondutores, o nível de serviços era da ordem de 2 dias para reparos, tendo sido reduzido para 15 minutos atualmente.

Por outro lado, a quebra de componentes dos equipamentos não é previsível. Apesar do controle de qualidade no processo produtivo, que reduz a quantidade de falhas e da estatística de falhas ter evoluído ao longo dos últimos anos, a previsibilidade de falhas ainda é um campo desconhecido. Desta forma, saber qual peça apresentará falha, aonde e quando, e conseqüentemente determinar antecipadamente a necessidade futura de substituição, permanece incógnito para as empresas.

O elevado custo de grande parte dos componentes de equipamentos de tecnologia é um terceiro aspecto característico neste mercado. Apesar de muitos componentes serem de baixo custo, alguns têm custo elevado. Desta forma, manter grandes estoques de peças distribuídas ao longo de todo território nacional, pode tornar-se um processo oneroso para as empresas.

Outro fator característico que dificulta o planejamento de peças de manutenção para indústria de tecnologia é a dispersão de clientes ao longo de todo território nacional. Essa dispersão dos clientes faz com que haja necessidade de ter as peças de manutenção distribuídas por toda extensão do território nacional. Manter peças distribuídas para atender todos os clientes em prazos reduzidos, torna-se também um grande desafio para a logística.

Huiskonen (2001) analisou os aspectos característicos do problema da logística de peças de manutenção. Em seu estudo identificou quatro fatores importantes a serem considerados, que são: criticidade das peças, especificidade das peças, padrões de demanda (em geral errática) e valor das peças.

Todas as questões apresentadas acima podem ser, em conjunto ou individualmente, associadas ao mercado de peças de manutenção em geral, tais como: peças automotivas, equipamentos industriais, aeronaves, equipamentos hospitalares entre outros. Desta forma, o problema estudado, apesar de focado em indústrias de tecnologia, poderá ser facilmente adaptado para aplicação em outros mercados. Assim, sua relevância torna-se notória e a aplicabilidade dos resultados pode ser bastante ampla.

1.4. Organização do trabalho

O trabalho está organizado em nove partes, visando facilitar o entendimento da pesquisa realizada. A primeira parte, referente à introdução ao problema proposto, visa situar a pesquisa na realidade encontrada que motivou a mesma, a fim de proporcionar ao leitor familiarização com o problema.

A segunda parte do trabalho apresenta a proposta da pesquisa, delimitando o campo de pesquisa e definindo o problema a ser resolvido na presente pesquisa. Nesta parte é apresentada a proposta do modelo a ser adotado, bem como a limitação do mesmo na solução do problema completo existente. É apresentada ainda a questão levantada a ser respondida com o desenvolvimento da pesquisa.

Em seguida uma revisão bibliográfica a respeito do tema pesquisado será abordada na terceira parte. Essa pesquisa tem por objetivo apresentar uma visão de alguns estudos feitos sobre o tema, os quais proporcionam direcionamento para o desenvolvimento do trabalho como um todo. A partir dessa revisão bibliográfica são determinados alguns campos de pesquisa que serão explorados no trabalho.

Na quarta parte da pesquisa é apresentada uma explicação do funcionamento dos diferentes modelos de estoque que serão abordados na pesquisa. Nesta parte serão apresentados os modelos de estoques atualmente existentes e em uso, bem como a proposta de funcionamento dos modelos propostos na presente pesquisa. Entretanto, a apresentação do funcionamento ainda se dá de forma superficial nesta parte do trabalho, ficando para a quinta parte a modelagem destes modelos. Nesta, os modelos são modelados matematicamente para que se possa fazer a implementação computacional.

A sexta parte apresenta aspectos da implementação computacional utilizados na solução dos modelos. Primeiramente demonstra-se uma visão geral do fluxo do processo de solução proposto, e posteriormente o detalhamento do programa desenvolvido.

A sétima parte apresenta detalhes do processo de simulação e resultados obtidos com os novos modelos.

A análise e comparação de resultados obtidos é descrita na oitava parte do trabalho, cujo objetivo é formar a base para conclusão. Esta é explorada na nona parte do trabalho. Nesta parte ainda, é discutida a utilidade dos resultados bem como a apresentação de campos de oportunidade para continuidade do trabalho realizado.

Por fim, a bibliografia de referência é apresentada ao final do trabalho, na décima parte.

A proposta de leitura do trabalho é de acordo com a ordem de apresentação das partes. Entretanto, um leitor familiarizado com o tema pode iniciar a leitura na parte 4. Devido à adoção de alguns modelos muito singulares no trabalho, sugere-se, que a parte 4 seja lida mesmo por aqueles familiarizados com o tema, evitando o entendimento equivocado dos modelos propostos utilizados ao longo do restante do trabalho.

2. PROPOSTA DE PESQUISA

A solução do problema apresentado, ou seja, a distribuição de peças de forma eficiente visando atendimento de demanda na manutenção de equipamentos de tecnologia, em geral, se dá através da adoção de um modelo de estoque de reposição da base em regime contínuo. Este modelo é referenciado na literatura como sendo $(S-1, S)$, no qual a cada instante, assim que ocorrer uma demanda, é efetuado o cálculo de necessidade e colocado pedido de reposição de estoque. Este modelo é desenvolvido para cenários em que se considera apenas um fornecedor, com custo e prazo de entregas fixos e conhecidos. Na realidade, entretanto, existem diversos possíveis fornecedores, que podem ser desde armazéns ou fornecedores distintos até mesmo um único armazém, considerando transportes diferentes, podendo este ser representado por múltiplos fornecedores com custos e prazos de entregas diferentes. Surge, portanto, uma dúvida quanto à adequação do modelo de estoques adotado, abrindo espaço para a presente pesquisa, que pretende identificar a melhor adequação ou não de modelos de estoques considerando múltiplos fornecedores para o problema existente.

O projeto proposto será delimitado ao ente inferior do sistema, ou seja, o PRE apresentado na *figura 1*. Apesar dessa restrição, os modelos desenvolvidos são aplicáveis a qualquer situação real existente, uma vez que dependem dos entes intermediários e superiores do sistema apenas no sentido de serem fontes de fornecimento de peças com custos e prazos diferentes. Na *figura 2* está ilustrado o sistema a ser pesquisado e resolvido na presente pesquisa, no qual o ente *estoque* é o objeto da pesquisa. Este ente sofre demandas externas e deve atender a estas demandas de acordo com níveis de atendimento preestabelecido, contando com possibilidade de manutenção de estoques a um custo conhecido, compra de diferentes fornecedores, com custos e prazos de entregas diferentes e conhecidos, e custo de não atendimento de demanda igualmente conhecido. O objetivo é reduzir ao máximo o custo total do sistema, mantendo-se o nível de atendimento igual ou maior ao mínimo estipulado.

Figura 2: Modelo da proposta de pesquisa

A tabela 1 mostra as diferentes alternativas de fornecedores considerados para o modelo apresentado na figura 2. Nota-se que apesar de haver somente dois fornecedores na configuração real, devido às diferentes modalidades de transportes, o problema torna-se um problema de três fornecedores equivalentes com prazos de entregas e custos diferentes.

Fornecedor equivalente	Fornecedor original	Transporte	Prazo	Custo
A	1	1	3	2
B	2	2	2	3
C	2	3	1	4

Tabela. 1: tabela de fornecedores equivalentes para o problema apresentado na figura 2

A pesquisa visa entender se modelos de estoques que consideram múltiplos fornecedores podem ser parametrizados e empregados de forma a obter redução de custos e/ou aumento de nível de atendimentos. Para tal, foram idealizados modelos de estoques com múltiplos fornecedores, que serão apresentados e estudados da parte 4 do presente trabalho em diante.

O resultado da pesquisa poderá servir para aplicação direta e/ou de base para desenvolvimento futuro do modelo completo, conforme ilustrado na *figura 1*. Neste contexto, a solução da presente pesquisa representará os diferentes entes do sistema, montando uma rede estruturada interligada, proporcionando as diferentes fontes de abastecimento, com prazos e custos diferenciados. Para tal, há um desafio adicional na rede completa a ser considerado: o tratamento da capacidade finita dos entes superiores e intermediários em atender suas demandas imediatamente. O tratamento de capacidade finita de fornecedores, entretanto, não será objeto desta pesquisa e será deixado para pesquisas futuras, ou seja, a capacidade dos fornecedores será considerada infinita na presente pesquisa.

No contexto apresentado acima, a presente pesquisa pretende responder à seguinte pergunta:

É possível obter ganhos em termos de redução de custos e níveis de atendimento através da utilização de múltiplos fornecedores, valendo-se dos modelos de múltiplos fornecedores idealizados?

2.1. Hipóteses e restrições da pesquisa

A pesquisa considera hipóteses e restrições, as quais são apresentadas e listadas abaixo:

- 1) Custos de aquisição composto por custo unitário por peça, podendo ser diferente para cada fornecedor. Não são considerados descontos de quantidade.
- 2) Custo unitário de transportes, que pode ser diferente para os diferentes locais e modalidades de transportes.
- 3) Custo de colocação de pedido para cada pedido de compras, podendo ser diferente para cada fornecedor;
- 4) Custo de manutenção de estoque por peça por período de estocagem como percentual do valor do estoque. Para determinar o valor do estoque em cada período, em casos de custos de aquisição variável, será considerado o conceito de valor médio do estoque para saídas de peças e o custo de aquisição para entrada de peças, calculando desta maneira o custo médio do estoque disponível.
- 5) Custo de falta por peça e por período de não atendimento.
- 6) Capacidade infinita de suprimento de demanda nos fornecedores.
- 7) Pedidos não atendidos são mantidos pendentes e imediatamente atendidos quando da disponibilização de peças no local de demanda, ou seja, a falta resulta em atraso.
- 8) Demanda imediata, ou seja, toda demanda ocorrida no sistema é imediatamente atendida caso haja estoque disponível.
- 9) Independência total entre itens diferentes, não havendo possibilidade de substituição entre diferentes itens.
- 10) Em cada período o estoque é recebido no início do período, ou seja, é considerado disponibilizado para atendimento da demanda do mesmo período.

- 11) Nível de atendimento é calculado pelo atendimento imediato da demanda, considerando disponibilidade das peças no ponto de demanda. Desta forma, a existência de estoque da peça demandada no local e período de demanda é considerada demanda atendida no prazo, em caso contrário, a demanda permanece não atendida até que a peça seja recebida no local e disponibilizada para atendimento. O nível de atendimento é calculado a cada período, ou seja, a mesma demanda não atendida por períodos consecutivos implica em não atendimento em períodos múltiplos, penalizando repetidamente o nível de atendimentos, até que a demanda seja atendida.
- 12) A indisponibilidade de estoque de uma determinada peça somente afeta o nível de atendimento mediante demanda não atendida, ou seja, a indisponibilidade sem ocorrência de demanda não afeta o nível de atendimento.
- 13) O custo de não atendimento é fixo e constante por item não atendido e por período de atraso.
- 14) Quantidades de estoque são consideradas apenas inteiras, eliminando a possibilidade de fracionados;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica será dividida em duas partes, de forma a organizar e facilitar o entendimento. Numa primeira parte, o foco será na solução do problema de distribuição de peças de manutenção. Serão apresentados alguns trabalhos relevantes e as metodologias adotadas, bem como alguns dos resultados destas pesquisas, que serão usados como base da atual pesquisa. Na segunda parte, será discutida a metodologia de solução por busca local e avaliação de desempenho por simulação de eventos discretos, cuja metodologia será usada na presente pesquisa.

3.1.O problema da distribuição de peças de manutenção

O problema da distribuição de peças de manutenção é um problema complexo, no qual, segundo Bacchetti e Saccani (2012), quatro fatores principais contribuem com essa complexidade: quantidade de itens gerenciados, demanda intermitente ou irregular, níveis de serviço com tempos de atendimento exíguos e risco de obsolescência de estoques. Em seu artigo, afirmam ainda que o gerenciamento da distribuição de peças de manutenção, como parte do serviço de pós-venda, atualmente não recebe devida importância em grande parte das empresas, que acabam fazendo a gestão deste processo nos moldes da gestão dos produtos que produzem, não levando em conta as particularidades acima mencionadas. Em um estudo da logística de peças de manutenção a respeito da diferença entre a teoria existente e a prática adotada nas empresas, Bacchetti e Saccani (2012) identificaram que os modelos propostos pela literatura são entendidos pelos gerentes das empresas como complexos e tidos como custosos para implementação prática. Em função disso, gerentes tendem a orientar suas decisões em função de sua experiência prática.

As pesquisas em busca de um modelo de distribuição de peças de manutenção iniciaram-se com Sherbrooke (1968) que desenvolveu um dos primeiros modelos de otimização que se tem referência na literatura. Este modelo calcula os níveis de estoques de diferentes itens em um sistema de múltiplos níveis de estoques com peças reparáveis. O objetivo do sistema é de reduzir a indisponibilidade de sistemas a níveis esperados, considerando o menor custo de inventários possível. Este sistema é amplamente conhecido e estudado na literatura, que se refere a ele pelo nome METRIC.

Muckstadt (1973) propôs uma extensão ao modelo METRIC, incluindo análise de *multi-indenture* e chamou-o de MOD-METRIC. Entende-se por *multi-indenture*, o modelo em que uma peça defeituosa é substituída no equipamento falho, restaurando a condição de funcionalidade do mesmo. Esta peça defeituosa por sua vez é levada a um centro de reparo, que identifica e substitui o componente falho, restaurando a condição de funcionalidade, devolvendo a peça ao estoque. A adoção deste modelo permite que um componente possa ser usado para reparo de diversas peças defeituosas diferentes, otimizando o uso de recursos e tempo de resposta de reparos, e consequentemente reduzindo o custo logístico envolvido no processo de reparo de equipamentos.

Em Slay (1984) o modelo VARI-METRIC foi apresentado, incorporando melhoras significativas ao modelo original. Graves (1985) e Sherbrooke (1986) incorporaram melhorias ao sistema proposto por Slay. Este modelo, além de apresentar simplificações que o tornaram mais simples de ser implementado computacionalmente, incorporou a variância da quantidade de peças no circuito de reparo. O modelo anterior considerava apenas a quantidade média de peças neste circuito, ignorando a variância desta quantidade. Essa alteração reduziu significativamente o erro associado ao modelo com *multi-indenture*.

Duas características muito importantes do problema de distribuição de peças de manutenção são a baixa demanda e o alto custo das peças. Essas características são importantes, pois, se por um lado é muito oneroso manter um estoque grande de peças no sistema para garantir atendimentos dentro dos padrões especificados, por outro lado a baixa demanda proporciona um potencial de redução de custos através do uso comum de estoques por diversos centros de demanda, uma vez que a demanda dificilmente acontece ao mesmo tempo. Essas

características levaram ao desenvolvimento de estratégias de distribuição que consideram movimentações (transferências) laterais de peças. Estas movimentações acontecem quando uma demanda acontece em um ente de estoque que não tem estoque da peça demandada, sendo que neste caso a peça é movimentada (ou transferida) de outro ente para atender a demanda. Chama-se movimentação lateral, pois em geral consideram-se apenas movimentações entre entes do mesmo nível dentro da estrutura logística.

Essa estratégia foi amplamente pesquisada, sendo que muitas soluções para diferentes configurações foram propostas. Isso se deve ao fato de que a inclusão de movimentações laterais entre entes de estoque reduz de forma significativa o custo do processo logístico.

Kranenburg (2006) estudou o problema da distribuição de peças de manutenção e desenvolveu um modelo aplicado a uma indústria de semicondutores, que tem características muito semelhantes com às do problema proposto. Neste estudo, no tocante a movimentação lateral de peças entre entes do estoque, concluiu que a utilização de movimentação lateral de peças proporcionou uma redução de 50% dos custos logísticos no sistema.

Wong et al (2006) estudaram a influência da união de dois sistemas independentes de estocagem de peças de manutenção para indústria aeronáutica, criando assim um sistema único com dois pontos de estoque, interligados pela possibilidade de transportes laterais de peças. A similaridade da necessidade da indústria aeronáutica e da indústria de tecnologia é grande no contexto do presente estudo. Em ambos os casos, os tempos de resposta impostos são exíguos, os custos de aquisição de peças são altos e a demanda é baixa e imprevisível. Este estudo mostrou que, se considerados o inventário dos dois estoques conjuntos e a possibilidade de um estoque abastecer o outro em caso de falta, através de movimentação lateral, haveria uma redução significativa de custos no sistema. A influência da união dos estoques foi estimada em redução de 20% dos custos do sistema. No estudo, simulou-se que cerca de 11% a 13% da demanda seria atendida por movimentação lateral de peças.

Kutanoglu e Mahajan (2009) também estudaram e propuseram um método de alocação de peças de manutenção em modelo de dois níveis de estoque com movimentação lateral de peças entre pontos de estoque do mesmo nível. Neste

estudo foi considerada a possibilidade de priorização de atendimento de demanda não satisfeita em um ponto de estoque pelo ponto de estoque mais próximo geograficamente. Além disso, o estudo visou comparar o custo total de operação mediante restrição de atendimento a um determinado nível de serviços. Foram comparados três cenários: sem movimentação lateral de peças entre pontos de estoque, com movimentação, porém sem prioridade entre pontos de estoque e finalmente com movimentação com prioridade determinada pela proximidade geográfica entre os pontos de estoque. Assim como nos estudos anteriores, este estudo também mostrou que a utilização de movimentação lateral de peças entre pontos de estocagem pode reduzir os custos totais da operação, chegando a 35%, dependendo dos parâmetros utilizados.

Outro aspecto relevante na solução do problema é a utilização de movimentações emergenciais para envio de peças quando a demanda não pode ser satisfeita a partir de estoques do sistema. Na prática, é muito comum esse tipo de movimentação, que consiste em enviar diretamente de fornecedores e/ou entes externos ao sistema as peças demandadas com transportes expressos. Com isso, reduz-se o tempo de transporte e consequentemente o tempo de equipamento parado por indisponibilidade de peças. Apesar de na prática ser utilizado comumente a título de correção de erros, este recurso pode ser incorporado ao sistema logístico como forma de aumentar a disponibilidade de peças e consequentemente reduzir o custo de inventário.

Em um estudo mais abrangente, Utterbeeck et al (2009) consideraram três tipos de estruturas para atendimento da demanda: sem flexibilidade, com flexibilidade, e com flexibilidade e envios emergenciais entre fornecedor e pontos de estoque. Para cada um destes três tipos, foi feita a avaliação de desempenho para modelos sem e com armazém central (considerados respectivamente modelo de nível simples e modelo de dois níveis), totalizando seis modelos comparados. Entende-se por estrutura sem flexibilidade como sendo uma estrutura de estoques independentes que não estão sujeitos a movimentações laterais de peças entre os pontos de estoque. Estruturas com flexibilidade são estruturas de estoques em que os pontos de estoque estão sujeitos à movimentação lateral de peças entre si. Estruturas com flexibilidade e com envios emergenciais são aquelas que estão sujeitas a movimentações laterais de peças entre pontos de estoque e envios

emergenciais de peças do armazém central e/ou fornecedor. A representação gráfica dos seis modelos estudados e comparados por Utterbeeck et al (2009) está na figura 3.

A conclusão da pesquisa de Utterbeeck et al (2009) para um modelo com 4 pontos de estoque local é de que o modelo com flexibilidade e com envios emergenciais (c) é o mais apropriado em 85% dos casos, incorrendo em 35,8% de atendimentos através de envios por movimentação lateral. Pelos dados apresentados, percebe-se ainda que a inclusão de entregas emergenciais a partir do fornecedor (de b para c) proporciona uma redução de 32% no custo da operação, mas que a inclusão de movimentação lateral entre os armazéns (de a para b) reduz em 51% o custo da operação. Percebe-se, portanto, o potencial de redução de custo do sistema mediante inclusão de movimentação lateral entre pontos de estoque e envios emergenciais de peças.

Figura 3: Modelos estudados por Utterbeeck et al (2009)

Van der Heijden et al (2012) identificaram em seu estudo que a adoção de modalidades de reparo e transportes mais onerosos porém com tempos de resposta mais exíguos, pode levar a redução de custos no sistema logístico da ordem de 20%. Com esse estudo, demonstram que em determinados casos a adoção de serviços de transportes mais caros pode levar a economia global, principalmente devido à redução da necessidade de manutenção de estoques elevados. Em seu estudo, identificaram que o maior potencial de ganho para esta estratégia está em priorizações nos níveis mais baixos do sistema.

Em um estudo amplo dos modelos desenvolvidos para movimentação lateral entre entes de estoques, Paterson et al (2011) listaram um total de 94 diferentes modelos, classificando-os de acordo com suas características. Deste estudo, nota-se que apenas um modelo considera mais de dois níveis de estoques, mesmo assim, com restrições. Percebe-se a partir desse estudo que a movimentação lateral em sistemas com mais de dois níveis ainda encontra-se pouco explorada.

Os modelos de distribuição de peças de manutenção das pesquisas apresentadas acima são todos baseados no modelo de reposição do máximo, ou comumente referenciados como (s, S) . Nos casos específicos de peças de manutenção, nota-se que o modelo genérico (s, S) é simplificado, utilizando-se o modelo de reposição da base, conhecido como $(S-1, S)$. Este modelo assume que sempre que houver uma demanda, independentemente da quantidade demandada, a reposição da base será feita ao final do período (ou imediatamente em caso de modelo contínuo). Este modelo é ótimo para casos de baixas demandas e custos altos de aquisição (e consequentemente altos custos de manutenção). Entretanto, na realidade de peças de manutenção de empresas de tecnologia, principalmente aquelas cujo público alvo são consumidores de massa com equipamentos de uso pessoal, ambas hipóteses podem não ser válidas para alguns itens. Desta forma, as hipóteses adotadas nos modelos apresentados e estudados acima não são necessariamente válidas e consequentemente o modelo $(S-1, S)$ pode não oferecer bons resultados.

Matta e Guerrero (1990) analisam um modelo de estoques com múltiplos pontos de reposição. O modelo é adotado para controle de estoques de peças de manutenção a bordo de navios da marinha dos Estados Unidos da América. O sistema compara a cada período o estoque físico com os pontos de reposição,

efetuando pedidos para retornar a quantidade física mais a quantidade em pedidos para o nível máximo. Entretanto, nesse modelo o prazo de entregas é determinado por instantes predeterminados, ou seja, somente quando o navio está no porto é que ocorrem entregas. Desta forma, a vantagem do modelo analisado é de antecipar pedidos e garantir que haja reabastecimentos.

Percebe-se que, de acordo com os estudos apresentados acima, duas características dos modelos de estoques podem melhorar a eficiência dos modelos no caso de peças de manutenção: consideração de movimentação lateral de peças e envios emergenciais de peças. Estas características formam a base que justifica a utilização de modelos de estoques com múltiplos fornecedores e múltiplos modais de transportes, que serão desenvolvidos na presente pesquisa.

3.2.Determinação de modelos de estoques através de busca local com simulação de eventos discretos

Otimização baseada em simulação, segundo Wan et al (2005), é um dos métodos mais utilizados para análise de cadeias de suprimentos sujeitas à incertezas. Segundo os autores, a simulação proporciona flexibilidade para acomodar arbitrariedades dos elementos estocásticos e modelagem de muitas complexidades do mundo real, em contraponto dos modelos analíticos otimizantes, que em geral utilizam-se de muitas simplificações e hipóteses que impactam severamente a aderência do modelo à realidade. Entretanto, otimização baseada em simulação pode apresentar duas desvantagens: o elevado tempo computacional e o fato de responder apenas à pergunta “o que seria se?”, não garantindo a solução ótima. Em seu estudo, Wan et al (2005) propuseram uma forma alternativa através de modelos substitutos, ou seja, substituiu-se a simulação por modelos empíricos com objetivo de reduzir o tempo computacional.

Jung et al (2004) utilizaram otimização baseada em simulação para resolver o problema de determinação de estoques de segurança para indústria química. Os

autores avaliaram que os estudos disponíveis para determinação de estoques de segurança de forma analítica não consideram a complexidade do sistema real e a arbitrariedade das demandas e prazos de produção e entregas.

Ambos os estudos mencionados acima consideraram otimização baseada em simulação como forma de substituir cálculos estocásticos por simulações de Monte Carlo. Em ambos casos a aderência com que uma simulação pode representar a realidade foi apresentada como diferencial positivo. Há, entretanto, uma desvantagem considerável na adoção deste processo, mencionada em ambos os casos, que é o elevado tempo computacional dos processos de simulação de Monte Carlo.

Santoro e Freire (2007), em um contexto simplificado, de apenas um armazém, pesquisaram a adequação de diferentes modelos de estoques através de busca local com simulação de eventos discretos. Em seu estudo foi utilizada busca local com simulação para séries históricas de demanda, perfazendo assim uma busca de parâmetros ideais de estoques, ou seja, Santoro e Freire (2007) utilizaram busca local com avaliação da função objetivo através de simulação de eventos discretos. Neste estudo, obtiveram resultados entre 7,6% e 9,4% de redução de custos totais, comparando o custo do mesmo sistema utilizando o método proposto, que escolhe o melhor modelo de estoques para cada item, com um único modelo de estoques selecionado a partir da adequação da maior quantidade de itens do sistema estudado. Este estudo apresenta um modelo de solução viável para resolver problemas complexos de estoque através de busca local com simulação de eventos discretos. Esta abordagem resulta em tempos computacionais aceitáveis sem detrimento da aderência do modelo à realidade.

De acordo com as pesquisas apresentadas acima, a simulação é indicada para avaliação de cenários reais, dada a possibilidade de considerar complexidades existentes no mundo real. Desta forma, a busca local com emprego de simulação de eventos discretos pode apresentar grandes vantagens para resolver problemas com complexidade elevada. Conforme visto, a alta complexidade dos modelos pode ser facilmente incorporada a modelos com simulação, que através de busca local podem levar a resultados satisfatórios. A busca local com simulação de eventos discretos será utilizada na resolução do problema proposto, mais adiante.

4. FUNCIONAMENTO DOS MODELOS

A seguir será apresentada uma breve explicação do funcionamento dos modelos que serão estudados, de forma a garantir o entendimento dos modelos que serão formulados na sequência. Serão apresentados e explicados inicialmente modelos simples, de um fornecedor, que servirão de base para o desenvolvimento do problema proposto na pesquisa, e em seguida serão apresentados os modelos de múltiplos fornecedores, que consistem na proposta de pesquisa propriamente dita. Vale ressaltar que o objetivo desta explicação não é apresentação da formulação, mas apenas o entendimento dos modelos que serão estudados. Desta forma, nesta fase não serão explicadas as formulações, que são deixadas para a próxima parte do trabalho.

Para cada classe de modelos, de fornecedor único e de múltiplos fornecedores, serão desenvolvidos modelos reativos e modelo ativo. Entende-se por modelos reativos aqueles nos quais é mantida uma quantidade em estoque para suprir demandas desconhecidas. Periodicamente, a quantidade em estoque é comparada com os parâmetros do modelo e pedidos de compras são colocados para reabastecer os estoques ao seu ponto inicial. A denominação deste tipo de modelo advém do fato de seu funcionamento se dar pela reação a demandas desconhecidas após a ocorrência destas. O modelo ativo, em contrapartida, parte do conhecimento de uma previsão de demanda e efetua compras periodicamente para suprir a necessidade dos períodos futuros com base em uma previsão de demanda conhecida. Neste modelo, um parâmetro de estoques é introduzido para garantir atendimento de demandas em casos de erro na previsão de demanda. Pelo fato deste modelo trabalhar ativamente para atender uma previsão de demanda, sua denominação é modelo ativo.

Para os modelos reativos, há duas possibilidades de períodos de revisão: periódico e contínuo. O modelo contínuo é aquele em que sempre que ocorre demanda, imediatamente é recalculada a necessidade de compras, enquanto que no modelo periódico esse recálculo é feito em períodos predeterminados. Entretanto,

o princípio de funcionamento dos modelos é idêntico se não pelos momentos em que revisões e pedidos são feitos.

4.1. Modelos de estoque com um fornecedor

Os modelos de estoque que consideram um único fornecedor são largamente utilizados em aplicações práticas. Em muitos casos, eles representam a realidade com grande aderência, ou seja, de fato existe apenas um fornecedor no sistema. Em alguns casos, entretanto, utiliza-se o modelo de fornecedor único para representar realidades de vários fornecedores distintos, partindo-se do princípio de que todos fornecedores têm o mesmo prazo de entregas e o mesmo custo. Estas simplificações em muitos casos são possíveis e representam bem o sistema em que são aplicados. Os modelos de fornecedor único partem de hipótese de que o prazo de entregas e o custo unitário de aquisição são únicos e constantes.

4.1.1. Modelos reativos com um fornecedor

A seguir, será apresentado o funcionamento dos modelos reativos com um único fornecedor. Serão apresentados os três modelos diferentes separadamente, para facilitar o entendimento.

4.1.1.1. Modelo reativo de reposição do máximo com um fornecedor (s, S)

O modelo de reposição do máximo parte do estabelecimento de um parâmetro de estoque máximo (S) e um parâmetro de ponto de estoque de reposição (s). A cada instante ou período de revisão (contínuo e periódico respectivamente), verifica-se a posição de estoque e caso este estiver abaixo do ponto de estoque de reposição, um pedido é colocado de forma a reestabelecer a posição de estoque ao estoque máximo.

É importante mencionar que posição de estoque (PE) e nível de estoque (NE) são grandezas diferentes, que são definidas conforme abaixo:

NE – nível de estoque: consiste na quantidade física disponível em estoque, que pode ser utilizada para atendimento imediato de demanda;

PE – posição de estoque: consiste na quantidade física disponível em estoque somado à quantidade em pedidos realizados ainda não entregues;

Percebe-se que a posição de estoque (PE) sempre assume valores entre (S) e (s), enquanto que o nível de estoque (NE) pode assumir valores menores que (s). Esta característica é importante e será de extrema importância na análise do modelo de múltiplos fornecedores, que será apresentado mais adiante.

A *figura 4* mostra graficamente o funcionamento do modelo em regime contínuo.

Figura 4: representação gráfica do modelo relativo de reposição do máximo em regime contínuo

4.1.1.2. Modelo relativo de reposição da base com um fornecedor $(S-1, S)$

O modelo de reposição da base tem funcionamento similar ao modelo de reposição do máximo, entretanto, neste modelo os pedidos são colocados a cada instante ou período de revisão (contínuo e periódico respectivamente) de forma a reestabelecer o nível de estoques para o nível máximo, independentemente da quantidade que demanda. Este fato é responsável ao comum erro de nomenclatura que é dado a este modelo, denominando-o de modelo contínuo, apesar de o modelo de reposição da base poder ser de revisão contínua ou periódica.

A notação utilizada para designar esse modelo $(S-1, S)$, advém do fato de que o modelo de reposição da base pode ser representado pelo modelo de reposição do máximo quando $s = S - 1$.

Por se tratar de um caso particular do modelo de reposição do máximo, a explicação de maiores detalhes deste modelo é dispensável. Para o entendimento do modelo, basta considerar o modelo de reposição do máximo com $s = S - 1$.

Para o presente estudo é importante mencionar as vantagens e aplicações deste modelo. O modelo de reposição da base efetua pedidos de compra sempre que haja demanda, sendo fácil perceber que o modelo trabalha com elevado número de pedidos e quantidades de compra por pedido, em geral, reduzida. Em situações de demanda baixa ou valores dos itens elevados, ou seja, quando os custos de compras e de manutenção de estoques representam grande parte dos custos totais do sistema, é vantajoso utilizar esse modelo, que garante um nível de estoques baixo. Estas duas condições ocorrem muitas vezes simultaneamente no ambiente da presente pesquisa, ou seja, na distribuição de peças de manutenção. Desta forma, ao longo das últimas décadas, os estudos de distribuição de peças de manutenção foram focados nesse modelo. Essa conclusão já foi evidenciada e mencionada na revisão bibliográfica do presente trabalho.

A *figura 5* representa graficamente o funcionamento do modelo de reposição da base.

Figura 5: representação gráfica do modelo reativo de reposição da base em regime periódico

4.1.1.3. Modelo reativo de lote fixo com um fornecedor (R, Q)

O modelo de lote fixo tem em comum com o modelo da reposição do máximo a existência de um ponto de estoque de reposição, neste modelo representado por (R) , que serve de referência para disparar novos pedidos de compra. Da mesma forma como no modelo de reposição do máximo, sempre que a posição de estoque (PE) é menor que o ponto de estoque de reposição (R), um pedido é colocado. A diferença entre os dois modelos está na quantidade pedida. Enquanto que no modelo de reposição do máximo é colocado um pedido para atingir o estoque máximo, no modelo do lote fixo os pedidos são colocados como números inteiros de lotes fixos previamente determinados (Q), de forma a reestabelecer a posição de

estoque (PE) a um nível superior ao ponto de revisão de estoques (R). A figura 6 representa graficamente este modelo.

Figura 6: representação gráfica do modelo reativo de lote fixo em regime contínuo

$$\text{Compra} = \text{Previsão Demanda} - \text{Pedidos Pendentes} - \text{Estoque Disponível}$$

Em caso de conhecimento exato da demanda futura, o pedido de compras a cada período de revisão é dado pela demanda futura, uma vez que o estoque disponível e os pedidos pendentes são relativos a demandas imediatas e/ou anteriores à entrega do pedido colocado no período em questão. Entretanto, no mundo real, a previsão de demanda não corresponde com exatidão à demanda real. No caso de demanda real inferior à demanda prevista, o sistema incorre em manutenção de estoques excessivos, em caso contrário, de demanda real maior que a demanda prevista, o sistema incorre em faltas. Desta forma, para contornar essa

deficiência de previsão de demanda, há uma necessidade de inclusão de um parâmetro de estoques que garanta atendimento mesmo com os erros de previsão. Apesar de comumente ser denominado de estoque de segurança, o parâmetro de estoques pode assumir valores negativos, tornando a denominação incoerente, portanto, não será adotada nesta pesquisa. Valores negativos para o parâmetro de estoque podem acontecer em caso de uma previsão de demanda superior à real em ambiente de custos de aquisição e manutenção de estoques elevados, ou quando o custo de não atendimento é inferior ao custo de manutenção de estoques. Considerando o parâmetro de estoques, o cálculo dos pedidos de compra pode ser reescrito conforme abaixo:

$$\text{Compra} = \text{Prev. Demanda} - \text{Ped. Pendentes} - \text{Est. Disponível} + \text{Parâmetro Estoques}$$

A *figura 7* representa graficamente a lógica de funcionamento do modelo, considerando prazo de entregas de dois períodos, enquanto que a *figura 8* representa graficamente um exemplo do modelo ativo em funcionamento.

Figura 7: representação gráfica da lógica de pedidos do modelo ativo

Figura 8: representação gráfica do funcionamento do modelo ativo

4.2. Modelos de estoque com múltiplos fornecedores

Em algumas aplicações práticas, dentre as quais está a modelagem da distribuição de peças de manutenção, pode ser interessante considerar múltiplos fornecedores. Especificamente no problema da distribuição de peças, duas situações para uso desta modelagem são identificadas: locais que podem ser abastecidos (receber peças) de diversos locais ou fornecedores, e a existência de diversos tipos de transportes, com custos e prazos distintos, para entrega de peças a um determinado local. O entendimento do primeiro é imediato, pois efetivamente

trata-se de diversos fornecedores que podem ter custos e prazos de entregas diferenciados. O segundo, apesar de não ser tão imediato, é de fácil entendimento: quando existe apenas um fornecedor, mediante circunstâncias especiais, pode ser vantajoso entregar a peça com modalidades de transportes urgentes, muitas vezes incorrendo em custos de transportes maiores, considerando que estas modalidades reduzem o prazo de entrega. Para efeitos da presente pesquisa, este segundo caso será representado por fornecedores distintos cujos prazos e custos são diferentes. Em outras palavras, será considerado como fornecedor o par fornecedor e transportes, e para tal o custo e o prazo de entregas será considerado também em conjunto.

Há pesquisas, como por exemplo, Sajadieh e Eshghi (2009), que estudaram emprego de múltiplos fornecedores com objetivo de buscar minimização de risco e/ou incorrer em vantagens de compra, assim como por decisões estratégicas de eliminação de dependência de um único fornecedor. Entretanto, o enfoque da atual pesquisa na proposta de múltiplos fornecedores não é esta, fazendo com que esta abordagem não seja estudada. Desta forma, a explicação a seguir resume-se a situações em que alternativas de fornecedores inserem no modelo possibilidades de receber pedidos em prazos diferentes e com custos diferentes.

A seguir será apresentado o funcionamento de modelos com fornecedores distintos.

4.2.1. Modelos reativos com múltiplos fornecedores

A utilização de múltiplos fornecedores pode ser benéfica para um sistema para que compras sejam feitas na modalidade menos custosa possível, principalmente em ambientes de demanda errática. Nestas situações, pode-se entender como grande parte da demanda atendida por fornecedores menos custosos, sendo que os picos de demanda são atendidos por fornecedores mais custosos, porém com prazo de entregas reduzido. Devido à menor incidência de

demandas altas, relativamente a demandas baixas (considerando que a demanda alta é composta por um componente de demanda baixa e outro de adicional de demanda), entende-se facilmente que a maior parte das compras será feita em modalidades menos custosas. Por outro lado, o prazo de entregas mais reduzido, pode tornar o balanceamento entre custo de não atendimento, custo de compra com entregas em prazos reduzidos e custo de manutenção de estoques favorável à manutenção de baixos estoques.

4.2.1.1. Modelo reativo de reposição do máximo com múltiplos fornecedores

(s_i, S_i)

O modelo de reposição do máximo com múltiplos fornecedores sugere que exista mais de um ponto de estoque de reposição, sendo um ponto para cada fornecedor. Desta forma, dependendo da demanda ocorrida, diferentes fornecedores com prazos diferentes são acionados para reposição dos estoques. Para simplificar o entendimento, a *figura 9* apresenta a lógica do funcionamento deste modelo, que será descrita a seguir:

A *figura 9* representa diversas situações, enumeradas de 1 a 5. Em cada uma destas situações, representa-se uma posição do estoque do sistema e a quantidade comprada de cada fornecedor. Nota-se que para cada fornecedor (i) há um ponto de estoque de reposição representado por (s_i) , e um ponto de estoque máximo, representado por (S_i) . Os pedidos de compras para cada fornecedor são representados por (P_i) . Considera-se que os fornecedores têm custos crescentes e prazos de entregas decrescentes na ordem do fornecedor 1 ao fornecedor 3.

O modelo considera que dado um estoque inicial, verifica-se em qual faixa de estoque de reposição se encontra, ou seja, imediatamente abaixo de qual (s_i) o estoque inicial se encontra. Identificada a faixa, pedidos de compras são colocados para o devido fornecedor para suprir a quantidade que eleve o estoque até o estoque máximo daquele fornecedor. Conforme pode ser visto na *figura 9*, há

situações (3 a 5) em que pedidos de compras para diferentes fornecedores são colocados. Nestas situações, o pedido complementar é colocado a partir do estoque depois das compras anteriores.

Neste novo modelo, a ordem de colocação de pedidos deve respeitar sempre a ordem crescente de prazos de entregas dos fornecedores, ou seja, coloca-se pedidos para os fornecedores mais ágeis antes de pedidos para os fornecedores com prazos de entregas maiores, respeitando as regras de determinação do primeiro fornecedor a receber pedidos que serão mencionadas adiante.

Figura 9: representação gráfica da lógica de determinação de pedidos de compras para modelo de reposição do máximo com múltiplos fornecedores

Nota-se que na explicação e na *figura 9* não foram empregados os conceitos de posição de estoques (PE) e nível de estoque (NE). A razão para não adotar a posição de estoque para determinação do fornecedor a ser utilizado, advém de neste caso correr-se o risco de adotar somente um fornecedor. A explicação segue de um exemplo:

Supõe-se que o fornecedor A com menor custo tenha um tempo de entregas de 5 períodos, e que está sujeito a uma demanda constante de 3 unidades por período. Supõe-se ainda que haja um segundo fornecedor B que tem prazo de entregas imediato. A posição de estoque inicial é de 7 unidades, o ponto de reposição de estoques do fornecedor A é de 6 unidades e do fornecedor B é de 3 unidades, e a posição de estoque máximo é de 8 unidades. Após a ocorrência da primeira demanda a posição de estoque do sistema é reduzido para 4 unidades, satisfazendo assim a necessidade de pedido de compras de 4 unidades para o fornecedor A tal que a posição de estoque máximo seja restaurado. A previsão de entregas deste pedido, no entanto, é o período 6, devido ao prazo do fornecedor. No período seguinte, nova demanda ocorre, reduzindo em 3 unidades a posição de estoque que passa para 5 unidades. Novamente, um pedido de compras de 3 unidades é colocado para o fornecedor A. Neste momento, a posição de estoque é de 8 unidades, porém o nível de estoque é de apenas 1 unidade. No terceiro período, com uma demanda de 3 unidades, há falta de estoque e a demanda não é atendida. Porém, a posição de estoque após essa demanda permanece em 5 unidades, resultando em novo pedido de 3 unidades para o fornecedor A. Nesta configuração, considerando a posição de estoque para identificação do fornecedor que recebe os pedidos, fornecedor B somente será acionado se houver uma demanda maior que 5 unidades no exemplo adotado, pois esta é a única forma de reduzir a posição de estoque para um nível inferior ao ponto de reposição de estoques do fornecedor B.

Desta forma, adotar a posição de estoque como parâmetro de determinação da necessidade de compra para um determinado fornecedor não é uma medida adequada para esse novo modelo. Essa dificuldade pode ser resolvida utilizando-se o nível de estoque em lugar da posição de estoque para determinação do fornecedor a receber o primeiro pedido a cada período, bem como a quantidade a ser pedida para este fornecedor. Colocado o primeiro pedido, os fornecedores subsequentes serão acionados, considerando limitação do total pedido de forma que a posição de estoque (PE) não ultrapasse estoque máximo (S_1), ou seja, $S_1 - PE = \sum_i P_i$. Esta necessidade será discutida e resolvida na modelagem dos modelos, mais adiante.

A notação que será utilizada para representação deste modelo será (s_i, S_i) , onde (s_i) representa os diferentes pontos de estoque de reposição para cada

fornecedor (i) disponível, e (S_i) é o estoque máximo para cada fornecedor. Nota-se que (S_i) é o estoque máximo do sistema.

4.2.1.2. Modelo reativo de reposição da base com múltiplos fornecedores

(S_i-1, S_i)

De maneira similar aos modelos simples, o modelo de reposição da base com múltiplos fornecedores é um caso particular do modelo de reposição do máximo com múltiplos fornecedores. Seu funcionamento é igual ao modelo explicado acima, notando-se apenas que os parâmetros $s_i = S_i - 1$. A notação utilizada para este modelo será (S_i-1, S_i) . A *figura 10* representa graficamente o funcionamento do modelo.

Figura 10: representação gráfica da lógica de determinação de pedidos de compras para modelo de reposição da base com múltiplos fornecedores

4.2.1.3. Modelo reativo de lote fixo com múltiplos fornecedores (R_i, Q_i)

O modelo de lote fixo com múltiplos fornecedores difere-se do modelo de fornecedor único pela opção de colocação de pedidos para diferentes fornecedores que têm custos e prazos de entregas diferentes. Neste modelo, cada fornecedor tem um lote fixo diferente, que se representa na notação como sendo (R_i, Q_i) onde (i) representa os diferentes fornecedores.

O funcionamento do modelo se dá de forma similar aos outros dois modelos de múltiplos fornecedores apresentados anteriormente, porém com as particularidades do modelo original (R, Q) . Analogamente ao modelo de reposição do máximo, deve ser adotado o nível de estoque para determinação do fornecedor que

receberá o pedido a cada período. Uma vez definido o fornecedor que receberá o pedido inicial no período, é colocado o pedido que eleva o nível de estoques imediatamente acima do ponto de revisão do fornecedor em questão, correspondendo ao menor número de lotes inteiros daquele fornecedor que satisfazem a condição. Colocado o primeiro pedido, os fornecedores subsequentes serão acionados, considerando limitação do total pedido de forma que a posição de estoque (PE) não ultrapasse estoque máximo (R_1+Q_1), ou seja, $R_1 + Q_1 - PE \geq \sum_i P_i$. Esta necessidade será discutida e resolvida na modelagem dos modelos, mais adiante.

A figura 11 representa o modelo de lote fixo com múltiplos fornecedores, representando as 5 situações possíveis para modelo com 3 fornecedores.

Figura 11: representação gráfica da lógica de determinação de pedidos de compras para modelo de lote fixo múltiplos fornecedores

4.2.2. Modelo ativo com múltiplos fornecedores

O modelo ativo com múltiplos fornecedores busca, assim como nos modelos reativos, tirar proveito da disponibilidade de múltiplos fornecedores com custos e prazos diferentes. Seu funcionamento se dá através da aplicação em série do modelo equivalente para apenas um fornecedor, considerando os pedidos colocados anteriormente para todos fornecedores no cálculo dos pedidos. Nesta modelagem deve-se determinar um parâmetro de estoque para cada fornecedor. Apesar do parâmetro de estoques não apresentar nenhuma dependência direta com o fornecedor, sua dependência com prazo de entregas e, portanto com o prazo de previsão de demanda que o pedido de compras deve atender, torna a relação entre parâmetro de estoques e fornecedor conveniente.

A aplicação do modelo se dá pela determinação da ordem de colocação de pedidos aos diferentes fornecedores. Esta deve sempre seguir a ordem crescente dos prazos de entregas, ou seja, fornecedores com prazos menores recebem os pedidos primeiro, deixando os fornecedores com prazos mais extensos por último.

O pedido de compras para o primeiro fornecedor é calculado utilizando a metodologia aplicada no modelo de fornecedor único, considerando todos pedidos pendentes de todos fornecedores, repetindo-se o processo para o segundo fornecedor, e sequencialmente para todos outros fornecedores. Neste processo deve ser sempre considerado o total de pedidos pendentes, incluindo os pedidos realizados no mesmo período, para fornecedores com prazos de entregas menores (cujos pedidos são realizados antes do fornecedor em consideração).

A *figura 12* representa o modelo e o cálculo dos pedidos. A formulação do cálculo dos pedidos é apresentada apenas para fins de entendimento, sendo que a modelagem mais adiante abordará o tema formalmente.

Figura 12: representação da lógica de determinação de pedidos de compras para modelo ativo com múltiplos fornecedores

5. MODELAGEM

A seguir será apresentada a modelagem do problema proposto para múltiplos fornecedores apenas, sendo que o caso de fornecedor único é um caso particular deste. Neste modelo, busca-se otimizar o emprego de diferentes fornecedores, com custos e prazos de entregas diferentes. Em cada período determina-se a quantidade de peças a ser comprada de cada fornecedor. Na condição de múltiplos fornecedores, é possível que haja cruzamento de pedidos, ou seja, a ordem de entrega de pedidos não é necessariamente a mesma da colocação dos pedidos, devido ao prazo de entregas diferenciado.

A modelagem será desenvolvida para um total de sete modelos de estoque, sendo um modelo ativo e seis modelos reativos, conforme apresentado na parte 4 da presente pesquisa.

Para a modelagem proposta, serão definidas e utilizadas algumas variáveis conforme abaixo.

i – índice que identifica os diferentes fornecedores, variando entre 1 e I . É importante considerar os fornecedores ordenados de forma crescente de prazo de entregas, ou seja, $LT_i > LT_{i+1}$.

t – índice que identifica cada período variando entre 1 e T ;

D_t – demanda no período t ;

LT_i – prazo de entrega do fornecedor i ;

$P_{i,t}$ – pedido de compras para o fornecedor i no período t ;

NE_t – nível de estoque no período t : consiste na quantidade disponível em estoque, medido ao final do período t , ou seja, após a ocorrência de demandas e/ou recebimento de pedidos no período;

PE_t – posição de estoque no período t : consiste na quantidade disponível em estoque somado à quantidade em pedidos realizados ainda não entregues, medido após a ocorrência de demandas e/ou recebimento de pedidos no período;

NA – nível de atendimento do sistema no período total considerado;

SLA – nível de atendimento mínimo requerido para o sistema no período total considerado;

CC_i – custo de unitário de compra do fornecedor i ;

CP_i – custo de colocação de pedido compra do fornecedor i ;

CME – custo de manutenção de estoque pelo prazo de um período (percentual para aplicação sobre o valor do estoque);

CNA – custo de não atendimento associado ao não atendimento de cada unidade por período de tempo;

CT – custo total do sistema no período completo considerado;

VTC_t – valor total de compra dos pedidos recebidos em t ;

$VTMNE_t$ – valor total de manutenção do estoque disponível em t ;

$VTNE_t$ – valor total do estoque inicial em t ;

$VMNE_t$ – valor médio do estoque inicial em t ;

VNA_t – valor total de não atendimento no período considerado;

Entende-se que, para comparar diferentes modelos de estoques em seu grau de adequação e eficiência na solução de um problema, os critérios de avaliação de desempenho devem ser idênticos. Desta forma, apresenta-se abaixo a formulação de avaliação de desempenho e o objetivo final do problema, os quais serão aplicados a todos sete modelos de estoque estudados. Nota-se que a diferença entre os sete modelos que serão apresentados está na decisão de quando e quanto comprar, e neste sentido, essa é a única decisão que influencia diretamente o desempenho do sistema. Os parâmetros dos sistemas, que são efetivamente as variáveis a serem determinadas para solução do problema, são parâmetros que

determinam a decisão de compras. Entretanto, percebe-se que a diferença de quantidade e período de compras dada pelos diferentes modelos, influencia diretamente a quantidade de estoques disponíveis, que por consequência é diferente para cada modelo, determinando custos e desempenhos diferentes.

Uma vez determinados os pedidos e estoques disponíveis, pode-se avaliar o desempenho do sistema a partir das equações apresentadas a seguir. Esta avaliação é feita para o nível de atendimento e custo de operação do sistema.

O nível de atendimento é definido como sendo a razão da quantidade de eventos em que a demanda real pode ser atendida imediatamente do estoque disponível, relativo à quantidade total de eventos, ou seja, a quantidade de eventos em que há estoque disponível em quantidade suficiente quando acontece uma demanda. Entende-se portanto, que o não atendimento somente ocorrerá quando o nível de estoque (NE_t) assumir valores negativos, indicando que a demanda não pôde ser atendida em sua totalidade pelo estoque disponível. Para calcular essa razão, basta contar a quantidade de eventos em que o nível de estoque é maior ou igual a zero, e dividir essa quantidade pela quantidade total de eventos. As expressões (1) e (2) solucionam esse problema, sendo que (NA) representa o nível de atendimento para uma dada solução do problema em valor percentual.

$$na_t = \begin{cases} 1, & \text{se } NE_t \geq 0 \\ 0, & \text{se } NE_t < 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$NA = \frac{\sum_{t=1}^T na_t}{T} \times 100 \quad (2)$$

O custo de operação do sistema é dado pela soma do valor total de compras, valor total de manutenção de estoques e valor de não atendimento de pedidos, considerando todos os períodos, conforme equação (3). O detalhamento de cada componente do custo será feito a seguir.

$$CT = \sum_{t=1}^T (VTC_t + VTMNE_t + VNA_t) \quad (3)$$

O (VTC_t) é calculado pelo valor unitário de compra multiplicado pela quantidade comprada, considerando todos fornecedores do sistema. Nota-se também que o custo de pedido pode ser diferenciado entre os diferentes fornecedores, incorrendo somente para os fornecedores que recebem pedidos a cada período. A equação (4) representa o cálculo do (VTC_t) .

$$VTC_t = \sum_{i=1}^I (P_{i,t} \times CC_i + \alpha_{i,t} \times CP_i) \quad (4)$$

$$\alpha_{i,t} = \begin{cases} 1 & \text{se } P_{i,t} > 0 \\ 0 & \text{em caso contrário} \end{cases}$$

O $(VTMNE_t)$ é calculado como sendo produto do valor do estoque disponível $(VTNE_t)$ e do (CME) , conforme equação (5). Entretanto, o valor do estoque disponível tem formulação mais complexa, uma vez que o custo de aquisição varia de acordo com o fornecedor. Define-se valor médio de estoque disponível em (t) $(VMNE_t)$ como sendo o valor total do estoque dividido pela quantidade em estoque. A cada período, o $(VMNE_t)$ é recalculado considerando o valor total do estoque anterior, o custo de aquisição para pedidos recebidos no período e o custo médio multiplicado pela quantidade demandada no período anterior. A equação (5c) demonstra o cálculo de $(VMNE_t)$.

$$VTMNE_t = VTNE_t \times CME \quad (5)$$

$$VTNE_t = \max(0 | VMNE_t \times NE_t) \quad (5b)$$

$$VMNE_t = \max \left(0, \frac{VTNE_{t-1} + \sum_{i=1}^I P_{i,t-LT_i} \times CC_i}{NE_{t-1} + \sum_{i=1}^I P_{i,t-LT_i}} \times \left(1 - \frac{D_t}{NE_{t-1} + \sum_{i=1}^I P_{i,t-LT_i}} \right) \right) \quad (5c)$$

O valor de não atendimento em cada período (VNA_t) corresponde ao custo incorrido pelo não atendimento imediato de uma demanda. Desta forma, este custo somente deve ser considerado em caso de o nível de estoque (NE_t) ser negativo. Sua determinação é uma função da quantidade não atendida por período (NE_t) e de um custo unitário de não atendimento (CNA). O cálculo do (VNA_t) é dado pela equação (6):

$$VNA_t = \max (0 | -ED_t \times CNA) \quad (6)$$

O problema a ser resolvido é a determinação de parâmetros para os diferentes modelos, tal que o custo total do sistema seja mínimo, respeitando um nível de atendimentos mínimo. Este problema pode ser explicitado através da expressão (7), que deve ser adotada para todos os modelos que serão estudados.

$$\min CT \quad (7)$$

$$\text{s.a.:} \quad NA \geq SLA$$

Adicionalmente à restrição apresentada acima, podem ser introduzidas restrições tais como valor total do estoque disponível máximo, ou seja, restrição ao capital máximo investido em estoques, ou (VNA) total máximo. Entretanto, a introdução destas restrições não torna o problema diferente se não pela sua

limitação de espaço de soluções viáveis, sendo que tais restrições adicionais não serão consideradas na presente pesquisa.

5.1. Modelos reativos com múltiplos fornecedores

Para formulação dos modelos reativos, é necessário primeiramente definir dois conceitos: a posição de estoque (PE_t) e o nível de estoque (NE_t). A nomenclatura adotada para estas duas grandezas é a tradução direta da literatura em inglês, que denomina estas grandezas respectivamente Inventory Position (IP) e Inventory Level (IL).

O nível de estoque em cada período (NE_t), conforme equação (8), consiste em quantidade de estoque disponível no local para atendimento imediato de demanda no final de cada período, ou seja, o nível de estoque no período anterior somado à quantidade de pedidos entregues no período e subtraída a quantidade demandada no período. É importante ressaltar que o (NE_t) pode assumir valores negativos, em casos de demanda não atendida. Nestes casos, a premissa do problema considera que a demanda é mantida para atendimento futuro. O (NE_t) negativo é o fator que garante que o custo de não atendimento seja considerado no custo total do sistema, conforme apresentado anteriormente na equação (6). Por outro lado, um (NE_t) positivo, ou seja, existência de estoques disponíveis para atendimento, incorre em custos de manutenção de estoques, conforme equação (5).

$$NE_t = NE_{t-1} + \sum_{i=1}^I P_{i,t-LT_i} - D_t$$

(8)

A posição de estoque em cada período (PE_t), consiste no nível de estoque (NE_t), somado à quantidade em pedidos realizados ainda não entregues, antes da

colocação de pedidos no período considerado. A equação (9) representa essa definição.

$$PE_t = NE_t + \sum_{i=1}^I \sum_{t=t-LT_i+1}^{t-1} P_{i,t} \quad (9)$$

5.2. Modelo de reposição do máximo com múltiplos fornecedores (s_i, S_i)

Resolver o modelo de reposição do máximo com múltiplos fornecedores consiste em determinar dois parâmetros para cada fornecedor, o estoque máximo (S_i) e o ponto de estoque de reposição (s_i), de forma que em cada período a posição de estoque (NE_t) é comparado com estes parâmetros para determinação da quantidade a ser comprada. Em caso da posição de estoque (NE_t) ser menor que o ponto (s_i), um pedido de compras pode ser colocado. A decisão da colocação ou não e da quantidade a ser comprada é determinada através das formulas apresentadas a seguir.

Para formulação deste modelo, é necessário definir os seguintes parâmetros:

S_i – estoque máximo para o fornecedor i ;

s_i – ponto de estoque de reposição para o fornecedor i ;

Conforme mencionado anteriormente, os fatores de influência na solução final dos modelos a serem otimizados são as definições das compras, ou seja, quando e quanto comprar. A complexidade para determinação das compras é influenciada nos modelos de múltiplos fornecedores pela decisão de qual fornecedor deve ser feita a compra, além das decisões de quanto e quando.

O funcionamento do modelo de reposição do máximo com múltiplos fornecedores foi detalhadamente descrito na parte 4.2.1.1. Conforme visto, deve-se colocar pedidos a partir do fornecedor mais ágil, colocando pedidos sucessivamente conforme (10).

$$P_{i,t} = \max(0 | P_{i,t}^*) \quad (10)$$

$$P_{i,t}^* = \begin{cases} \min \left(S_i - \left(NE_t + \sum_{i=i+1}^I P_{i,t} \right) \middle| S_1 - \left(PE_t + \sum_{i=i+1}^I P_{i,t} \right) \right) & , se NE_t \leq S_i \\ 0 & , se NE_t > S_i \end{cases}$$

É importante relembrar que nos modelos de múltiplos fornecedores a formulação considera que os fornecedores estão ordenados de forma decrescente de prazo de entregas, ou seja, $LT_i > LT_{i+1}$.

Determinados os pedidos de compras, o sistema da expressão (7) pode ser resolvido utilizando-se as equações (1), (2) e (8) a (10).

A formulação dos pedidos de compras apresentada em (10) refere-se ao caso de regime contínuo, entretanto, a única alteração no modelo para o regime periódico é a inclusão de restrição adicional de condição de periodicidade, ou seja, inclusão de restrição para que pedidos sejam colocados apenas em períodos de revisão, conforme (11).

$$P_{i,t} = \begin{cases} P_{i,t} & (\text{conforme equação 10}), \text{ se } t \in PR \\ 0 & , \text{ em caso contrário} \end{cases} \quad (11)$$

$$PR = \{\text{Conjunto dos períodos de revisão}\}$$

5.3. Modelo de reposição da base com múltiplos fornecedores ($S_i - 1, S_i$)

O modelo de reposição da base consiste em determinar apenas os parâmetros do estoque base (S_i) para cada fornecedor. O modelo é similar ao modelo de reposição do máximo, apresentado acima, porém considera que sempre que houver demanda, independentemente da quantidade demandada, um pedido é colocado para retomar a posição de estoque ao estoque base (S_i). Este modelo é idêntico ao modelo de reposição do máximo no caso particular de ($s_i = S_i - 1$), sendo essa a motivação para a notação adotada.

Ao exemplo do modelo de reposição do máximo os pedidos para os diferentes fornecedores devem necessariamente ser colocados na ordem do fornecedor mais ágil para o fornecedor mais demorado. A formulação está descrita na expressão (12). Sua diferença está na comparação com (S_i) no lugar de (s_i) do modelo anterior, denotando que a qualquer demanda existe pelo menos um pedido no sistema.

A expressão (12) determina o pedido de compra, que utilizada com as equações (1), (2), (8) e (9) resolvem o problema da equação (7).

$$P_{i,t} = \max(0 | P_{i,t}^*) \quad (12)$$

$$P_{i,t}^* = \begin{cases} \min \left(S_i - \left(NE_t + \sum_{i=i+1}^I P_{i,t} \right) \middle| S_1 - \left(PE_t + \sum_{i=i+1}^I P_{i,t} \right) \right) & , se NE_t \leq S_i \\ 0 & , se NE_t > S_i \end{cases}$$

Analogamente ao modelo anterior, em regime de revisão periódica, este modelo é adicionado de uma restrição, reescrevendo a expressão (12) conforme a expressão (13):

$$P_{i,t} = \begin{cases} P_{i,t} & (\text{conforme equação 12}), \text{ se } t \in PR \\ 0 & , \text{ em caso contrário} \end{cases} \quad (13)$$

$$PR = \{\text{Conjunto dos períodos de revisão}\}$$

5.4. Modelo de lote fixo com múltiplos fornecedores (R_i, Q_i)

O modelo de lote fixo consiste em determinar lotes fixos (Q_i) e pontos de reposição (R_i) para cada fornecedor de forma a otimizar a operação do sistema. A quantidade a ser comprada sempre que a posição de estoques se torna menor do que (R_i), é igual ao mínimo de n_i lotes (Q_i) tal que a posição de estoques se torne maior que ($R_i + Q_i$).

Para formulação deste modelo, adicionalmente às variáveis definidas anteriormente serão consideradas os seguintes parâmetros:

R_i – ponto de reposição de estoque para o fornecedor i ;

Q_i – lote fixo de compra para o fornecedor i ;

A determinação de pedidos de compras para o modelo de lote fixo com múltiplos fornecedores depende, a exemplo dos modelos anteriores, do (NE_t) e (PE_t). Pedidos de compras (P_i) são colocados para reestabelecer a (PE_t) a nível superior que (R_i), seguindo regras de prioridades, conforme visto na explicação do funcionamento dos pedidos. A formulação dos pedidos de compras é dada por (14), a seguir. Novamente, é importante ressaltar que o cálculo dos pedidos deve ser feito de forma sequencial, iniciando pelo fornecedor com menor prazo de entregas e sequencialmente calculando os pedidos para os fornecedores com prazos de entrega imediatamente maiores. Este modelo pode levar o sistema a determinar pedidos nulos para alguns fornecedores em determinadas condições, o que é

considerado normal, dependendo apenas das variáveis (PE_t) e (NE_t) e de (Q_i) para que essa condição ocorra.

$$P_{i,t} = \begin{cases} n_{i,t} \times Q_i \times \beta_{i,t}, & \text{se } NE_t + \sum_{i=i+1}^I P_{i,t} \leq R_i \\ 0 & , \quad \text{se } NE_t + \sum_{i=i+1}^I P_{i,t} > R_i \end{cases}$$

$n_{i,t}$ é o menor inteiro de forma que $n_{i,t} \times Q_i + \left(NE_t + \sum_{i=i+1}^I P_{i,t} \right) \geq R_i$

$$\beta_{i,t} = \begin{cases} 0, & \text{se } n_{i,t} \times Q_i + \left(NE_t + \sum_{i=i+1}^I P_{i,t} \right) > (R_1 + Q_1) \\ 1, & \text{em caso contrário} \end{cases} \quad (14)$$

Com a determinação dos pedidos de compras conforme (14), o problema (7) é resolvido utilizando-se as equações (1), (2), (8) e (9).

A formulação do problema apresentado refere-se ao regime de revisão contínua, sendo que para o regime de revisão periódica é necessário adotar restrição adicional de condição de periodicidade, apresentada na equação (15).

$$P_{i,t} = \begin{cases} P_{i,t} & (\text{conforme equação 14}), \text{ se } t \in PR \\ 0 & , \text{ em caso contrário} \end{cases} \quad (15)$$

$PR = \{\text{Conjunto dos períodos de revisão}\}$

5.5. Modelo ativo com múltiplos fornecedores

O modelo de estoques ativo, diferentemente dos modelos propostos anteriormente, é um modelo que determina todos pedidos de compra com base na

demanda futura. Para tal, faz uso de uma previsão de demanda, para a qual determina a condição ótima de compra que minimiza o custo total de operação do sistema.

Comumente a previsão de demanda não é exata, levando à necessidade de manter um estoque adicional a fim de suprir demandas reais maiores que as demandas previstas. Analogamente, em caso de demandas reais menores do que as previstas, o sistema fará compra de quantidades desnecessárias, incorrendo em estoques excessivos e custos desnecessários. Para contornar estas situações, um parâmetro de estoques é introduzido, que pode assumir valores positivos e/ou negativos e é somado à previsão de demanda. É comum que se denomine este parâmetro de estoques como Estoque de Segurança. Entretanto, devido à possibilidade de assumir valores negativos para os quais a nomenclatura se torna incoerente, esta não será utilizada na presente pesquisa, adotando-se o nome parâmetro de estoques (PS).

Na presente modelagem, busca-se apenas apresentar o modelo e resolvê-lo partindo de uma previsão de demanda conhecida. Desta forma, é definida a grandeza de previsão de demanda, que é um dado de entrada do problema.

PD_t – previsão de demanda do período t ;

Enquanto os modelos anteriormente estudados calculam o pedido de compras com base no nível de estoque e nos pedidos de compra já efetuados, o modelo com previsão de demanda toma decisões de compra em função da demanda futura prevista (PD_t) e do parâmetro de estoque (PS), além de considerar os pedidos colocados ainda não entregues. Para melhor aproveitamento do modelo, um parâmetro de estoques deve ser determinado para cada fornecedor (PS_i).

PS_i – parâmetro de estoque para cada fornecedor;

O pedido de compras para um dado fornecedor i , no modelo ativo, é dado pela previsão de demanda futura (PD_t) e nível de estoque (NE_t) do período

considerado, além do parâmetro de estoques (PS_i) e pedidos ($P_{i,t}$) ainda não entregues. Em cada período, soma-se a quantidade da previsão de demanda (PD_t) dos próximos períodos correspondentes ao prazo de entregas do fornecedor (LT_i). Entende-se que esta quantidade deve ser suprida por todos os pedidos que serão entregues neste mesmo prazo, ou seja, pelos pedidos já realizados porém ainda não entregues a serem entregues no prazo (LT_i), e pelo pedido que será feito no período considerado. Além disso, a posição de estoque (PE_t) também é considerada como possibilidade de atendimento desta demanda. Por fim, o parâmetro de estoques (PS_i) deve ser sempre mantido, e neste caso é somado à quantidade demandada. Considerando estes fatores, obtém-se a equação (16), que determina o pedido de compras para o modelo ativo:

$$P_{i,t} = \sum_{t=t+1}^{t+LT_i} PD_t - \sum_{t=t-LT_j+1}^{t-1} \sum_{j=1}^I P_{j,t} - \sum_{i+1}^I P_{j,t} - PE_t + PS_i \quad (16)$$

A equação (16) em conjunto com as equações (1), (2), (8) e (9) podem ser aplicadas para resolver o problema da equação (7).

6. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

O objetivo de uma implementação computacional para o problema apresentado é a verificação do funcionamento e vantagens de aplicação dos modelos de múltiplos fornecedores propostos. Desta forma, a implementação tem como foco o resultado qualitativo, e não o desempenho computacional.

A resolução dos modelos propostos, apresentados e modelados anteriormente se dará através de programa computacional, desenvolvido para tal finalidade. O programa desenvolvido, bem como particularidades importantes e detalhamento serão apresentados a seguir.

Para desenvolvimento deste programa, utilizou-se a linguagem VBA e planilha eletrônica Excel. A escolha por esta plataforma foi feita devido à facilidade de interação com usuário, dada a difusão e conhecimento da plataforma. A linguagem de programação mostra-se bastante eficiente em termos de tempos de processamento, considerando o tamanho do problema apresentado.

6.1. Fluxo geral da solução computacional

O programa desenvolvido funciona através da leitura de dados, processamento para determinação de sementes de busca para cada modelo, busca local pela melhor solução de cada modelo, identificação do melhor modelo para os dados apresentados e apresentação dos resultados. Esse fluxo é seguido para cada item a ser analisado. Desta forma, será apresentado e discutido apenas um ciclo deste fluxo, ou seja, o processo completo para apenas um item. A figura 13 apresenta esse fluxo para melhor visualização e entendimento.

Figura 13: representação do fluxo do programa computacional proposto.

O termo simulação foi utilizado anteriormente na presente pesquisa, com intuito de caracterizar o método de avaliação de desempenho dos modelos para um conjunto de parâmetros. Pode-se neste sentido descrever o método de solução do problema como sendo uma aplicação de resolução de um problema matemático através de busca local por parâmetros adequados, cuja função objetivo é avaliada através de simulação de eventos discretos.

O detalhamento do programa será apresentado e discutido para cada processo individualmente, considerando os seguintes processos: dados de entrada, determinação de sementes de busca, busca local e determinação e apresentação de resultados.

6.2. Dados de entrada do sistema

Os dados de entrada do sistema são a base de informações a partir da qual o problema será resolvido. Existem três grupos de dados distintos a serem inseridos no sistema, que são: dados de demanda e previsão de demanda para cada item, dados de características de cada item e os dados de configuração do sistema. Cada um destes grupos de dados será apresentado a seguir em conjunto com descrições e detalhes que se fazem necessários e/ou importantes para o entendimento do sistema.

6.2.1. Dados de demanda e previsão de demanda para cada item

Os dados de demanda dos itens servem de base para o trabalho proposto. Através destes dados será definido o melhor modelo a ser utilizado, os parâmetros ideais e o resultado esperado do sistema. Os dados de demanda a serem utilizados, quando conhecidos, devem ser dados coletados de histórico passado dos itens. Quando estes dados não são conhecidos, é possível fazer uma simulação de diversas demandas com características diferentes para avaliar a adequação de cada um dos diferentes modelos a certas características de demanda.

Os dados de demanda, em geral, constituem pares de informação de quantidade e instante em que ocorre a demanda. Considera-se neste caso, que toda demanda recebida tem efeito imediato, ou seja, o atendimento da demanda deve ser imediato.

Os dados de demanda são representados por pares de período e quantidade demandada. Apesar de existirem modelos para tratamento de demandas negativas, estas não serão consideradas na presente pesquisa. Desta forma, a demanda será

apresentada como histórico de quantidade demandada por período para cada item analisado.

Nos modelos reativos, utiliza-se a demanda para avaliação do desempenho do modelo com os parâmetros definidos. Essa avaliação é feita através de simulação, apresentando um resultado em termos de custos e nível de atendimento. A partir de busca local por parâmetros mais adequados, repetindo a avaliação por simulação para os mesmos dados de demanda, obtém-se parâmetros eficientes. Por se tratar de um algoritmo de busca, a condição de solução ótima não pode ser garantida.

Nos modelos ativos, além da demanda, os dados de entrada contemplam a previsão de demanda. Na presente pesquisa a previsão de demanda é um dado de entrada do sistema. Desta forma, seu cálculo e adequação não são objetos de estudo nesta pesquisa, ficando apenas a comparação do desempenho de modelos ativos de fornecedor único e múltiplos fornecedores sujeitos à mesma demanda e previsão de demanda como objeto de pesquisa.

6.2.2. Dados de características de cada item

Os dados das características dos itens são compostos por informações em nível de itens que serão utilizadas na resolução dos modelos. Abaixo seguem os dados que são considerados na presente pesquisa:

Código do item – número de identificação individual do item;

Nível de atendimento mínimo do item – fração representativa do nível de atendimento mínimo requerido para o item;

Custo de aquisição do item – custo unitário de aquisição do item considerado, não estando incluído o custo de transportes;

Custo de pedido do item – custo unitário de colocação de pedido para o item.

Este custo incidirá uma vez para cada pedido colocado, independentemente da quantidade pedida;

Custo de manutenção de estoque do item – percentual considerado do valor de estoque, que representa o custo de manutenção do item, incorporando custos de armazenagem, manuseio e seguros;

Custo de não atendimento do item – custo incorrido por período de não atendimento por unidade de demanda não atendida do item;

6.2.3. Dados de configuração do sistema

Os dados de configuração do sistema consistem em dados de parametrização do sistema para viabilizar a resolução através do processo proposto. Estes dados são aplicados ao sistema como um todo e não são características dos itens. Abaixo seguem os dados de configuração do sistema que serão utilizados, e uma breve descrição dos mesmos:

Modalidades de transportes – código de identificação para diferentes modalidades de transportes;

Prazo de transportes – parâmetro que define o prazo de transportes para cada modalidade;

Custos de transportes – parâmetro que define o custo de transportes para cada modalidade;

6.3. Sementes de busca

A semente de busca corresponde a valores iniciais das variáveis a serem determinadas para, a partir destes valores, iniciar o processo de busca local. É conhecido que, quanto mais próximo da solução ótima estes valores iniciais estiverem, mais eficiente será o algoritmo de busca. Apesar disso, a semente não tem propósito em ser a solução ideal, e desta forma sua determinação parte de critérios não necessariamente ótimos.

A seguir, será apresentada a metodologia de determinação de sementes de busca utilizada. Para os modelos de fornecedor único, utilizaram-se cálculos conhecidos que serão descritos adiante. A determinação das sementes de busca para os modelos com múltiplos fornecedores, tanto reativos quanto ativos, entretanto, será feita diretamente a partir das sementes de busca dos modelos de fornecedor único. Desta forma, o modelo com dois fornecedores utilizará como semente de busca as sementes dos dois modelos equivalentes de um fornecedor respectivamente. Em alguns casos poderia acontecer de sementes de busca não serem viáveis. Para tal, uma rotina de viabilização de sementes de busca foi incluída no programa, a qual viabiliza sementes se necessário, alterando valores das variáveis calculadas.

Será apresentado a seguir o detalhamento da determinação de sementes de busca para modelos de fornecedor único apenas, sabendo-se que no caso de múltiplos fornecedores a determinação é idêntica individualmente.

A rotina de viabilização de sementes de busca será apresentada mais adiante, na parte 6.4.2.

6.3.1. Sementes de busca para modelos reativos

Os modelos reativos detêm similaridades entre si, facilitando a determinação de sementes de busca. Os modelos de reposição do máximo e reposição da base são similares no sentido de que o segundo, conforme visto anteriormente, é um caso particular do primeiro, quando $s = S - 1$. Desta forma, uma vez determinada a semente de busca para o modelo de reposição do máximo, facilmente obtém-se a semente de busca do modelo de reposição da base, bastando para isso considerar $S = s + 1$. Por outro lado, conforme descrito a seguir, a semente de busca do modelo de reposição do máximo adota critérios de demanda máxima durante um período equivalente ao prazo de entregas do fornecedor, e lote econômico de compras. Ambos os critérios são válidos também para o caso do modelo de lote fixo, possibilitando que o mesmo critério de determinação de semente seja usado para este modelo.

Para os parâmetros (s) e (R) , dos modelos de reposição do máximo e de lote fixo respectivamente, determina-se a quantidade necessária para suprir a demanda do sistema durante um período igual ao prazo de entregas (LT) . Este pode ser calculado a partir da demanda média do período somado ao desvio médio absoluto do período, multiplicados pelo prazo de entregas, conforme equação (17).

O parâmetro (Q) do modelo de lote fixo é determinado através da equação referente ao lote econômico de compras, conforme (18).

Para semente do parâmetro (S) , utilizou-se a soma do parâmetro (s) com o lote fixo (Q) , conforme equação (19) abaixo.

O parâmetro (S) do modelo reativo de reposição da base, conforme mencionado acima, consiste em $S = s + 1$. Deve ser tomado um cuidado especial para não confundir os parâmetros (S) dos modelos de reposição da base e reposição do máximo, que apesar de terem a mesma representação, são grandezas diferentes.

A inclusão do termo (PR) referente ao período de revisão na equação (16) torna o cálculo desta semente válido para os regimes contínuo e periódico. No caso

de regime contínuo, o (PR) é adotado como valendo zero, e conseqüentemente não tem influência no valor do (s) calculado. No caso do modelo periódico, (PR) representa o valor do período de revisão e aumenta o valor de (s) para contemplar o prazo máximo de espera para uma entrega acontecer, que é de $LT + PR$.

D_t – demanda no período t ;

PR – período de revisão, considerado zero em caso de revisão contínua;

LT – prazo de entrega;

CC – custo de compra. O custo de compra é formado pela soma do custo de aquisição com custo do transporte correspondente;

CP – custo de colocação de pedido;

CME – custo de manutenção de estoque pelo prazo de um período (percentual para aplicação sobre o valor do estoque);

EOQ – Lote econômico de compras (Economic Order Quantity);

DMA – desvio médio absoluto;

$$\bar{D} = \left(\frac{1}{T} \times \sum_{t=0}^T D_t \right)$$

$$DMA = \frac{1}{T} \times \sum_{t=0}^T |D_t - \bar{D}|$$

$$s = R = (\bar{D} + DMA) \times (LT + PR)$$

(17)

$$Q = EOQ = \sqrt{\frac{2 \times \bar{D} \times CP}{CME \times CC}} \quad (18)$$

$$S = s + Q \quad (19)$$

6.3.2. Sementes de busca para modelo ativo

O modelo ativo tem apenas o parâmetro de estoque (PS) a ser determinado. Conforme visto anteriormente, este parâmetro é responsável por compensar os erros de previsão de demanda equilibrando os custos de manutenção de estoques excessivos com os custos de faltas por estoques muito baixos, além de garantir o nível de atendimentos mínimo exigido. A semente de busca para este parâmetro pode, portanto, ser associada à incerteza da previsão de demanda considerada. Na presente pesquisa entretanto, foi considerada semente de busca igual a zero para todas buscas, considerando que esta hipótese não prejudicaria o resultado da busca.

6.4. Busca local

O processo de busca local consiste numa inteligência de identificação dos melhores valores para variáveis que resolvem o problema com cada um dos modelos descritos anteriormente. Este processo visa avaliar o desempenho do modelo para um conjunto de parâmetros e variáveis e, através de sucessivas

alterações dos valores das variáveis, encontrar um conjunto de valores das variáveis que resulte no melhor desempenho. O processo é repetitivo até que determinadas condições de parada são atingidas. Neste momento, entende-se que o processo convergiu para um resultado bom e/ou aceitável. Entretanto, não é garantido que o melhor resultado, ou condição ótima, tenha sido atingido.

Para melhorar o desempenho da busca proposta, foi utilizado o método de busca tabu. Apesar de apresentado no fluxo do processo de busca local, o processo de busca tabu não é objeto da presente pesquisa, e não será abordado em detalhes.

A seguir, na *figura 14* está representado o fluxo do processo de resolução do problema da busca local. Nesta figura estão identificados os quatro processos mais críticos, numerados de 1 a 4, que serão detalhados a seguir. Os processos decisórios e processo de armazenagem de parâmetros e desempenho não serão descritos dada sua simplicidade e entendimento imediato a partir do fluxo.

Figura 14: representação do fluxo do processo de busca local.

6.4.1. Busca local – Avaliação de desempenho por simulação

O processo de avaliação de desempenho por simulação de eventos discretos é responsável pela avaliação do desempenho dos modelos para um conjunto de parâmetros e valores de variáveis. Sua denominação de *Avaliação de Desempenho por Simulação* é dada pelo fato de que o processo de avaliação é feito a partir de uma simulação computacional do funcionamento do modelo para um determinado conjunto de parâmetros e valores de variáveis. Em outras palavras, o processo inicialmente considera os parâmetros de entrada do sistema, e para um dado conjunto de valores de variáveis, simula o funcionamento do modelo. Desta forma, para cada um dos períodos considerados na série de demanda, determina a possibilidade de atendimento ou não a partir do estoque disponível, determina a necessidade ou não de compras e atualiza os dados de estoque disponível. Ao final do ciclo, é possível avaliar o custo do processo logístico no período considerado e o desempenho através do nível de atendimentos. Com estes dois resultados obtêm-se a viabilidade e adequação do modelo com os valores das variáveis considerados.

6.4.2. Busca local – Viabilização de semente

O processo de determinação de sementes, mencionado anteriormente, não garante sementes viáveis. Considera-se viabilidade sob a perspectiva das restrições impostas no modelo, que na presente pesquisa resumem-se ao atendimento de nível de atendimento mínimo. Desta forma, uma semente determinada anteriormente pode ou não ser viável. Para iniciar o processo de busca, é necessário que sementes inviáveis sejam viabilizadas, ou seja, as sementes que não garantem níveis de atendimento conforme restrições impostas devem ser alteradas para satisfazer esta condição.

Adotou-se como procedimento para viabilização de sementes o aumento dos parâmetros de estoque. Sabe-se que quanto maior o estoque disponível, maior o nível de atendimento de um sistema. O aumento dos parâmetros, para qualquer um dos modelos estudados, garante aumento dos estoques disponíveis. Desta forma, a rotina de viabilização das sementes é simples, consistindo em aumento de um percentual preestabelecido do valor de todos os parâmetros do modelo, considerando um aumento mínimo unitário. Além disso, a restrição de estoques com quantidades inteiras também foi considerada, e em caso de o percentual aplicado aos parâmetros inviáveis ser uma fração, a quantidade é truncada, ou seja, apenas a quantidade inteira do aumento dos parâmetros é considerada, considerando sempre o aumento mínimo unitário.

É importante ressaltar que a viabilização consiste em aumento simultâneo de todos parâmetros do modelo, ou seja, em modelos de múltiplos fornecedores, todos os parâmetros de estoques são simultaneamente incrementados.

6.4.3. Busca local – Geração de solução vizinha para busca

O processo de geração de solução vizinha para busca local tem por objetivo criar um novo conjunto de parâmetros de estoque que será avaliado quanto à viabilidade e desempenho. Em caso deste novo conjunto de parâmetros ser viável e garantir um desempenho melhor do sistema, é temporariamente adotado, e em caso contrário, descartado. Sucessivamente, novos conjuntos de parâmetros são determinados e avaliados.

Desta forma, o objetivo da geração de vizinhas é a obtenção de conjuntos de parâmetros que melhorem o desempenho do sistema dentro de condição de viabilidade.

Na explicação a seguir, considera-se solução inicial a solução a partir da qual serão geradas as vizinhas em cada interação. Desta forma, o conceito de solução inicial é um conjunto de parâmetros que variam com o desenvolvimento da solução.

Inicialmente, a busca se dará através da criação de vizinhanças incrementando e reduzindo todos os parâmetros da solução inicial em um percentual preestabelecido e criando todas alternativas para os novos valores dos parâmetros. Desta forma, a quantidade de soluções vizinhas criadas será de até n^3 , onde n é a quantidade de parâmetros do modelo. Uma rotina para validação de parâmetros é utilizada para eliminar as soluções cujos parâmetros tenham valores não permitidos, cujas restrições são apresentadas e justificadas a seguir.

$$s_i < S_i \quad (20)$$

$$s_i \geq s_{i+1} \quad (21)$$

$$R_i \geq R_{i+1} \quad (22)$$

$$S_1 \geq S_i \quad (23)$$

A restrição (20) tem como função garantir que os pontos de estoque de reposição dos modelos de reposição do máximo sejam sempre inferiores aos estoques máximos. Apesar da representação genérica com índice i representando diversos fornecedores dos modelos de múltiplos fornecedores, essa restrição é válida para o modelo de fornecedor único, no qual o índice pode ser omitido.

As restrições (21) e (22) garantem que nos modelos de múltiplos fornecedores os parâmetros equivalentes dos diferentes fornecedores não assumam valores incompatíveis. Entende-se por incompatíveis, um fornecedor com prazo de entregas menor (portanto com custo maior) ter um ponto de reposição maior. Nesta configuração, este fornecedor poderia ser acionado antes do fornecedor com custo mais baixo, o que deve ser evitado. É importante lembrar que é premissa dos modelos que os fornecedores têm custos crescentes e prazos de entregas decrescentes, quando considerada a ordem de índices dos mesmos.

A restrição (23) garante que o estoque máximo dos modelos de reposição do máximo e reposição da base seja o estoque máximo do fornecedor mais lento e menos custoso.

A geração de vizinhanças se repete até que critérios de parada sejam atingidos, sendo a melhor solução encontrada a solução adotada para o determinado modelo.

Entretanto, o processo pode perder sua eficácia se em determinado momento a vizinhança não conter nenhuma solução viável. Para evitar que isso ocorra, quando o processo se encontrar nesta situação, a vizinhança gerada é ampliada. Para tal, considera-se o mesmo processo de criação de vizinhança adotado inicialmente porém com uma alteração: considera-se o incremento e a redução maior que o percentual de variação dos parâmetros preestabelecido. O aumento da geração de vizinhança pode ser repetido inúmeras vezes, até que os critérios de parada sejam atingidos. No caso de a nova vizinhança conter soluções viáveis, os parâmetros de criação de vizinhança são reestabelecidos aos valores iniciais.

6.4.4. Busca local – Critério de parada de busca

O processo de busca descrito acima é composto por rotinas recorrentes. Desta forma, caso não haja um critério de parada, o sistema repetirá indefinidamente suas rotinas. Para evitar que isso ocorra, são introduzidos critérios de parada. Na presente pesquisa, o critério de parada adotado foi a quantidade máxima de iterações.

6.5. Apresentação dos resultados

Após atingido o critério de parada para todos modelos, a melhor solução e o resultado para o problema de cada modelo é apresentada no campo de resultados da planilha eletrônica utilizada. Os resultados apresentados consistem em valores

das variáveis que obtiveram melhor desempenho de custos, considerando nível de atendimento mínimo. Além dos valores das variáveis, são apresentados o custo total da operação do sistema e o nível de atendimento. Com base nestas informações, pode-se optar pelo modelo mais adequado e/ou comparar os desempenhos dos diferentes modelos.

7. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E RESULTADOS

A busca local para obtenção de resultados para análise consiste em aplicação de um procedimento experimental desenvolvido tal que os resultados obtidos possibilitem avaliar o desempenho dos modelos propostos, bem como comparar seu desempenho com os modelos existentes. A seguir será explanado o procedimento experimental e apresentados os resultados obtidos, que serão analisados na parte 8 do presente trabalho.

7.1. Procedimento experimental

O procedimento experimental adotado deve ser tal que diferentes cenários da realidade a ser pesquisada sejam considerados. Desta forma, busca-se através da experimentação de diversas instâncias abranger todos cenários possíveis. A quantidade de instâncias é um produto da quantidade de variação nos parâmetros considerados no problema.

Na presente pesquisa, os parâmetros considerados são: padrão de demanda, custo de compra unitário (CC), custo de manutenção de estoques (CME), custo de pedido (CP), custo de não atendimento (CNA) e nível de atendimento mínimo (NA_{min}). Para cada um destes parâmetros, diferentes valores foram adotados, conforme abaixo:

Padrão de demanda – foram considerados 3 padrões de demanda diferentes: baixa variabilidade, média variabilidade e alta variabilidade. Para cada padrão de demanda, foram criadas 3 repetições de demandas. Os padrões de variabilidade foram definidos como sendo:

- Baixa variabilidade: demandas aleatórias entre zero e 10, para cada período;

- Média variabilidade: demandas aleatórias entre zero e 100, para cada período;
- Alta variabilidade: demandas aleatórias entre zero e 100 multiplicadas por aleatórios entre zero e um, para cada período;

Custo de compra unitário (CC) – foram considerados dois custos de compras unitários de 30 por unidade e 300 por unidade;

Custo de manutenção de estoques (CME) – foram considerados dois custos de manutenção de estoques, de 12% e 30% do valor dos produtos em estoque por período;

Custo de pedido (CP) – foram considerados dois custos de pedido, de 30 e de 90 por pedido colocado;

Custo de não atendimento (CNA) – o custo de não atendimento foi considerado constante e igual a zero na presente pesquisa para todas instâncias. Entendeu-se que esta simplificação não teria impacto relevante nos resultados, uma vez que o nível de atendimento mínimo considerado foi determinado em valores elevados;

Nível de atendimento mínimo (NA_{min}) – foram considerados dois valores para o nível de atendimento mínimo, sendo 90% e 97%.

Dos cenários identificados acima, obtém-se um total de 48 instâncias, com um total de 144 repetições devido à criação de 3 repetições de demanda para cada padrão mencionado.

Além da variação dos parâmetros mencionados acima, cada uma das 144 repetições criadas foi avaliada em três cenários de custos e tempos de transportes. Cada um destes cenários é composto por três possibilidades de transportes distintas, sendo que um total de sete combinações diferentes é possível para cada cenário: cada transporte individualmente (três combinações), conjuntos de dois transportes (três combinações) e os três transportes juntos (uma combinação).

Cenário 1 – tempos de transportes de 1, 3 e 5 períodos, com custos respectivamente de 90, 30 e 10;

Cenário 2 – tempos de transportes de 1, 3 e 5 períodos, com custos respectivamente de 90, 20 e 10;

Cenário 3 – tempos de transportes de 1, 3 e 5 períodos, com custos respectivamente de 90, 60 e 10;

Desta forma, o total de repetições criadas e avaliadas foi de sete variações de combinações de transportes, três cenários de transportes e 144 repetições, totalizando 3024 repetições.

Na presente pesquisa, apenas os modelos contínuos foram considerados, ou seja, não foram feitas avaliações experimentais para os modelos periódicos. Desta forma, cada uma das 3024 repetições foi avaliada para 4 modelos, sendo três reativos e o modelo ativo, totalizando 12.096 instâncias. Estas 12.096 instâncias foram avaliadas e comparadas, e os resultados são apresentados a seguir.

7.2. Resultados obtidos

A simulação do problema através do programa descrito na parte 6 considerando o total de 12.096 instâncias resultou em uma massa de dados para análise e comparação. Os resultados consistem em valores para as variáveis dos modelos que resultaram na melhor solução encontrada, seu correspondente custo total e o nível de atendimento.

Para todas as instâncias com os mesmo parâmetros, ou seja, para o conjunto de 28 instâncias cujos parâmetros são iguais, variando apenas os modelos aplicados e os conjuntos de transportes (ou fornecedores), foi feita uma classificação considerando o custo, adotando como primeiro colocado o modelo e conjunto de transportes (ou fornecedores) que obteve o menor custo, e como último aquele que obteve o maior custo na simulação. Essa classificação serviu de base para as análises que serão apresentadas a seguir.

A tabela 1 apresenta um exemplo dos resultados obtidos.

Item	CC	CME	CP	CNA	NA min	Modelo	Quantidade Fornecedores	Fornecedor 1	Fornecedor 2	Fornecedor 3	Parametro 1	Parametro 2	Parametro 3	Parametro 4	Parametro 5	Parametro 6	Custo	NA	Classificação
1	30	0,12	30	0	90%	(R, Q)	2	1	2	0	24	5	2	1	0	0	8.222	91,7%	1
1	30	0,12	30	0	90%	(R, Q)	1	1	0	0	25	8	0	0	0	0	8.256	91,7%	2
1	30	0,12	30	0	90%	(R, Q)	3	1	2	3	24	5	2	2	1	1	8.441	94,4%	3
1	30	0,12	30	0	90%	(S-1, S)	3	1	2	3	31	0	-3	0	-6	0	8.666	91,7%	4
1	30	0,12	30	0	90%	(s, S)	2	1	2	0	18	31	0	1	0	0	8.675	91,7%	5
1	30	0,12	30	0	90%	(s, S)	3	1	2	3	23	32	-5	-3	-6	-4	8.676	91,7%	6
1	30	0,12	30	0	90%	(R, Q)	2	1	3	0	24	5	2	1	0	0	8.723	91,7%	7
1	30	0,12	30	0	90%	(s, S)	1	1	0	0	19	34	0	0	0	0	8.864	91,7%	8
1	30	0,12	30	0	90%	(s, S)	2	1	3	0	19	34	-5	32	0	0	8.864	91,7%	9
1	30	0,12	30	0	90%	(S-1, S)	2	1	2	0	30	0	1	0	0	0	8.899	91,7%	10
1	30	0,12	30	0	90%	(S-1, S)	1	1	0	0	34	0	0	0	0	0	8.979	94,4%	11
1	30	0,12	30	0	90%	Ativo	1	1	0	0	7	0	0	0	0	0	9.261	91,7%	12
1	30	0,12	30	0	90%	Ativo	2	1	2	0	7	0	-1	0	0	0	9.261	91,7%	13
1	30	0,12	30	0	90%	Ativo	2	1	3	0	7	0	-5	0	0	0	9.261	91,7%	14
1	30	0,12	30	0	90%	Ativo	3	1	2	3	7	0	-5	0	-5	0	9.261	91,7%	15
1	30	0,12	30	0	90%	(S-1, S)	2	1	3	0	32	0	1	0	0	0	9.381	94,4%	16
1	30	0,12	30	0	90%	(R, Q)	1	2	0	0	16	1	0	0	0	0	12.073	91,7%	17
1	30	0,12	30	0	90%	(R, Q)	2	2	3	0	16	10	1	1	0	0	12.405	94,4%	18
1	30	0,12	30	0	90%	(s, S)	1	2	0	0	14	22	0	0	0	0	12.551	91,7%	19
1	30	0,12	30	0	90%	(s, S)	2	2	3	0	14	22	-3	20	0	0	12.551	91,7%	20
1	30	0,12	30	0	90%	(S-1, S)	1	2	0	0	22	0	0	0	0	0	12.826	91,7%	21
1	30	0,12	30	0	90%	Ativo	1	2	0	0	6	0	0	0	0	0	13.142	91,7%	22
1	30	0,12	30	0	90%	Ativo	2	2	3	0	6	0	-2	0	0	0	13.142	91,7%	23
1	30	0,12	30	0	90%	(S-1, S)	2	2	3	0	26	0	1	0	0	0	13.724	100,0%	24
1	30	0,12	30	0	90%	(R, Q)	1	3	0	0	7	7	0	0	0	0	23.106	97,2%	25
1	30	0,12	30	0	90%	(s, S)	1	3	0	0	6	9	0	0	0	0	23.403	91,7%	26
1	30	0,12	30	0	90%	Ativo	1	3	0	0	3	0	0	0	0	0	23.582	94,4%	27
1	30	0,12	30	0	90%	(S-1, S)	1	3	0	0	9	0	0	0	0	0	23.779	100,0%	28

Tabela 1: Exemplo de tabela de resultados para uma instância considerando todos modelos e cenários de transportes.

8. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos resultados obtidos através da busca local descrita anteriormente se deu em algumas etapas. Inicialmente a análise foi feita considerando a massa total de dados, e posteriormente refinada por modelo e considerando a influência dos diferentes parâmetros nos resultados. Por fim, as considerações finais consolidando todas análises individuais feitas será apresentada.

8.1. Análise geral

Análise geral compreende a amostragem completa. Esta análise é útil para entender a validade dos modelos de forma geral, ainda sem identificar uma aplicabilidade específica e/ou melhor desempenho em determinadas características de parâmetros.

O *gráfico 1* mostra a relação de classificação de soluções para as diferentes quantidades de fornecedores. Para tal, foram comparados os resultados em termos de custos das 28 variações para cada conjunto de parâmetros de demanda e características de itens e de transportes. Estes resultados foram classificados e a participação dos modelos de fornecedor único, dois fornecedores e três fornecedores, em termos relativos (percentuais) foram tabulados e apresentados graficamente.

Através da análise deste gráfico, percebe-se que há uma concentração de modelos de três fornecedores nas posições mais bem colocadas da classificação. Percebe-se também que os modelos de dois fornecedores são quase uniformemente distribuídos entre as classificações 1 e 24. Por fim, os modelos de fornecedor único aumentam sua participação nas últimas posições de classificação.

Esta análise indica que os modelos de múltiplos fornecedores propostos apresentam desempenho superior aos modelos adotados atualmente na maior parte das instâncias consideradas. A participação na primeira posição de classificação é de 11%, 44% e 45% respectivamente para modelos de fornecedor único, dois fornecedores e três fornecedores.

Gráfico 1: relação de classificação de soluções para as diferentes quantidades de fornecedores.

É interessante também, analisar qual o ganho em termos de custos ao se mudar de um modelo de fornecedor único para múltiplos fornecedores. Desta forma, foi analisado o percentual de diferença entre os modelos mais bem colocados para fornecedor único e múltiplos fornecedores. Em outras palavras, se para determinada instância um modelo de fornecedor único foi o primeiro classificado, identificou-se a diferença percentual entre o custo deste e o custo do primeiro classificado que utiliza mais de um fornecedor. Analogamente, o inverso também foi analisado, ou seja, em instâncias cujo primeiro colocado é um modelo de mais de um fornecedor, qual a distância percentual do custo deste para o primeiro colocado que utiliza apenas um fornecedor, para aquela determinada instância. A *tabela 2* mostra os resultados

desta análise divididos entre Geral, que contempla todas as instâncias analisadas, e por modelo, que será analisada mais adiante.

Percebe-se que, quando um modelo de fornecedor único tem o menor custo (primeiro classificado), o modelo de múltiplos fornecedores mais bem colocado tem um custo em média de apenas 0,5% maior. Entretanto, na situação inversa, quando um modelo de múltiplos fornecedores tem o menor custo (primeiro classificado), o modelo de fornecedor único mais bem classificado tem em média um custo de 10,6% maior.

Destas duas análises preliminares, percebe-se que os modelos de múltiplos fornecedores obtêm uma vantagem, tanto pela quantidade de instâncias em que obtêm melhor resultado, quanto pelo fato de que apresentam um ganho em termos de custos maior em relação aos modelos de fornecedor único.

	Custo relativo MF quando FU é vantajoso	Custo relativo FU quando MF é vantajoso
Geral	100,5%	110,6%
Modelo (s, S)	100,9%	112,0%
Modelo (S-1, S)	102,4%	107,4%
Modelo (R,Q)	107,1%	114,7%
Modelo Ativo	100,4%	104,8%

Tabela 2: custos relativos entre primeiros classificados de modelos de fornecedor único (FU) e de modelos de múltiplos fornecedores (MF).

8.2. Análise detalhada

A análise geral indica que há vantagem dos modelos de múltiplos fornecedores em relação aos modelos de fornecedor único. Entretanto, a análise deve ser detalhada para parâmetros com valores diferentes, para que se possa

identificar se há tendência de resultado diferente em casos de diferentes parâmetros.

A seguir, cada um dos parâmetros será analisado separadamente para identificar a existência ou não de padrões diferentes da análise geral apresentada anteriormente.

Outra análise que deve ser feita é a análise de cada modelo separadamente, para verificar se algum dos modelos considerados tem maior vantagem na utilização de múltiplos fornecedores, assim como análise comparando o desempenho dos modelos para os diferentes padrões de demanda.

8.2.1. Análise detalhada – custo de compra

Ao modelo da análise geral, os *gráficos 2* e *3* representam a relação de classificação de soluções para as diferentes quantidades de fornecedores, sendo que o *gráfico 2* refere-se a instâncias com $CC = 30$, e o *gráfico 3* refere-se a instâncias com $CC = 300$. A comparação destes dois gráficos visa entender se o parâmetro custo de compra unitário tem influência na escolha dos modelos em relação à quantidade de fornecedores.

Percebe-se que o *gráfico 2*, que representa a condição de custo de compras unitário mais baixo, mantém um padrão similar à análise geral, ou seja, apesar de uma vantagem de múltiplos fornecedores em relação a fornecedor único, este último ainda que em menor escala, mantém casos de vantagem sobre múltiplos fornecedores. Entretanto, no caso de um custo de compras mais elevado, representado no *gráfico 3*, a vantagem de múltiplos fornecedores torna-se absoluta para as quatro primeiras colocações na classificação dos modelos, ou seja, apenas 0,6% do total de instâncias presentes nas quatro primeiras colocações da classificação são representantes de modelos de fornecedor único. Além disso, nota-se uma grande concentração de modelos de três fornecedores nas primeiras dez

colocações, e uma quantidade maior de modelos de dois fornecedores nas melhores colocações.

Gráficos 2 e 3: relação de classificação de soluções para as diferentes quantidades de fornecedores, considerando diferentes CC , respectivamente $CC = 30$ e $CC = 300$.

A análise dos percentuais de incremento de custos dos modelos de fornecedor único para múltiplos fornecedores quando os primeiros são mais vantajosos, e a analogamente oposta, estão representados na *tabela 3*.

No caso de $CC = 30$, nota-se uma vantagem de apenas 0,5% em termos de custo total nos casos em que fornecedor único é o modelo mais vantajoso, entretanto, no caso de $CC = 300$, nenhuma instância obteve melhor ou igual desempenho para fornecedor único, comparado com múltiplos fornecedores. Por outro lado, com $CC = 30$, a vantagem de múltiplos fornecedores em relação a fornecedor único é de 5,9% quando o primeiro é o mais vantajoso, sendo que no caso de $CC = 300$, a vantagem dos modelos de múltiplos fornecedores em relação ao melhor modelo de fornecedor único é de 15,0%. A exemplo da análise dos *gráficos 2 e 3*, percebe-se que a vantagem de múltiplos fornecedores é crescente com o aumento do custo de compra unitário.

	Custo de Compra (CC = 30)		Custo de Compra (CC = 300)	
	Custo relativo MF quando FU é vantajoso	Custo relativo FU quando MF é vantajoso	Custo relativo MF quando FU é vantajoso	Custo relativo FU quando MF é vantajoso
Geral	100,5%	105,9%	N/A	115,0%
Modelo (s, S)	100,9%	109,0%	101,7%	114,7%
Modelo (S-1, S)	102,6%	104,1%	100,6%	110,4%
Modelo (R,Q)	107,1%	112,0%	N/A	116,8%
Modelo Ativo	100,1%	102,5%	101,9%	107,3%

Tabela 3: custos relativos entre primeiros classificados de modelos de fornecedor único e de modelos de múltiplos fornecedores, considerando CC diferentes.

8.2.2. Análise detalhada – custo de manutenção de estoques

Segundo o modelo de análise adotado, os *gráficos 4 e 5* representam a relação de classificação de soluções para as diferentes quantidades de fornecedores, considerando o custo de manutenção de estoques respectivamente $CME = 0,12$ e $CME = 0,30$.

Analisando estes gráficos, percebe-se que há uma tendência de alteração de padrão muito sutil, sugerindo que a influência do custo de manutenção de estoques tem impacto baixo na escolha de modelos. Entretanto a influência perceptível, apesar de pequena, mostra que para custo de manutenção de estoques maiores, modelos de múltiplos fornecedores são mais vantajosos. Percebe-se, entretanto, que a vantagem de modelos de múltiplos fornecedores continua válida.

Gráficos 4 e 5: relação de classificação de soluções para as diferentes quantidades de fornecedores, considerando diferentes CME , respectivamente $CME = 0,12$ e $CME = 0,30$

Na análise da vantagem de custos, representado na *tabela 4* para os casos de $CME = 0,12$ e $CME = 0,30$, percebe-se que quando fornecedor único é mais vantajoso, a diferença de custo para modelos de múltiplos fornecedores passa de 0,6% para 0,3% respectivamente. Analogamente, no caso de fornecedores múltiplos ser mais vantajoso, a diferença de custos para o modelo de fornecedor único mais vantajoso passa de 8,1% para 13,0% quando CME passa de 0,12 para 0,30 respectivamente. Esta análise evidencia novamente que a vantagem de múltiplos fornecedores continua válida, com ligeira vantagem no caso de custos de manutenção de estoques mais elevados.

	Custo de Manutenção de Estoques ($CME = 0,12$)		Custo de Manutenção de Estoques ($CME = 0,30$)	
	Custo relativo MF quando FU é vantajoso	Custo relativo FU quando MF é vantajoso	Custo relativo MF quando FU é vantajoso	Custo relativo FU quando MF é vantajoso
Geral	100,6%	108,1%	100,3%	113,0%
Modelo (s, S)	100,6%	109,3%	101,3%	114,7%
Modelo (S-1, S)	102,4%	104,7%	102,4%	110,0%
Modelo (R,Q)	107,4%	111,4%	106,4%	117,6%
Modelo Ativo	100,2%	103,1%	100,7%	106,6%

Tabela 4: custos relativos entre primeiros classificados de modelos de fornecedor único e de modelos de múltiplos fornecedores, considerando CME diferentes.

8.2.3. Análise detalhada – custo de pedido

Os *gráficos 6 e 7* representam a relação de classificação de soluções para as diferentes quantidades de fornecedores, considerando o custo de pedido. A análise destes dois gráficos demonstra que o custo de pedido tem pouca influência na determinação da quantidade de fornecedores para solução mais vantajosa. Percebe-se que o perfil de soluções permanece praticamente inalterado em relação ao perfil geral, indicando a pouca relevância deste parâmetro no custo total.

Gráficos 6 e 7: relação de classificação de soluções para as diferentes quantidades de fornecedores, considerando diferentes CP , respectivamente $CP = 30$ e $CP = 90$.

Na análise da vantagem de custos, representado na *tabela 5* para os casos de $CP = 30$ e $CP = 90$, confirma-se a conclusão mencionada acima. O aumento de custo de fornecedor único para múltiplos fornecedores, quando o primeiro é mais vantajoso, passa de 0,2% no caso de $CP = 30$ para 0,7% no caso de $CP = 90$. Por outro lado, o custo de múltiplos fornecedores para fornecedor único, no caso do primeiro ser mais vantajoso, passa de 10,3% para $CP = 30$ para 11,0% no caso de $CP = 90$. Desta forma, por apresentarem variações pequenas, podemos admitir que a variação de custo de pedido não influencia de forma relevante o desempenho dos modelos de estoques.

	Custo de Pedido (CP = 30)		Custo de Pedido (CP = 90)	
	Custo relativo MF quando FU é vantajoso	Custo relativo FU quando MF é vantajoso	Custo relativo MF quando FU é vantajoso	Custo relativo FU quando MF é vantajoso
Geral	100,2%	110,3%	100,7%	111,0%
Modelo (s, S)	101,2%	111,4%	100,7%	112,7%
Modelo (S-1, S)	102,4%	107,7%	102,4%	107,2%
Modelo (R,Q)	108,3%	114,9%	106,1%	114,4%
Modelo Ativo	100,5%	105,1%	100,3%	104,6%

Tabela 5: custos relativos entre primeiros classificados de modelos de fornecedor único e de modelos de múltiplos fornecedores, considerando *CP* diferentes.

8.2.4. Análise detalhada – nível de atendimento mínimo

Os *gráficos 8 e 9* representam a relação de classificação de soluções para as diferentes quantidades de fornecedores, considerando o nível de atendimento mínimo. Percebe-se que o nível de atendimento também não influencia a escolha da quantidade de fornecedores. Apesar de pequenas diferenças entre os dois gráficos, o perfil do desempenho dos modelos, considerando a quantidade de fornecedores não se altera de forma significativa.

Gráficos 8 e 9: relação de classificação de soluções para as diferentes quantidades de fornecedores, considerando diferentes *NA*, respectivamente *NA* = 90% e *NA* = 97%.

Na análise da *tabela 6*, igualmente se confirma a baixa influência do nível de atendimento na determinação da quantidade de fornecedores. Neste caso, o custo de múltiplos fornecedores reduz de 0,5% para $NA_{min} = 90\%$ e 0,4% para $NA_{min} = 97\%$, quando comparado com o custo de fornecedor único nos casos em que este tem vantagem. A mesma análise, entretanto para o aumento do custo de fornecedor único em relação a múltiplos fornecedores, quando estes tem vantagem, é de 9,8% para $NA_{min} = 90\%$ e 11,5% para $NA_{min} = 97\%$.

	Nível de Atendimento Mínimo (NA = 0,90)		Nível de Atendimento Mínimo (NA = 0,97)	
	Custo relativo MF quando FU é vantajoso	Custo relativo FU quando MF é vantajoso	Custo relativo MF quando FU é vantajoso	Custo relativo FU quando MF é vantajoso
Geral	100,5%	109,8%	100,4%	111,5%
Modelo (s, S)	100,3%	113,8%	101,2%	110,2%
Modelo (S-1, S)	102,4%	107,2%	102,4%	107,6%
Modelo (R,Q)	107,0%	113,3%	107,1%	116,1%
Modelo Ativo	100,8%	104,5%	100,1%	105,2%

Tabela 6: custos relativos entre primeiros classificados de modelos de fornecedor único e de modelos de múltiplos fornecedores, considerando NA_{min} diferentes, respectivamente $NA = 90\%$ e $NA = 97\%$.

8.2.5. Análise detalhada – cenários de transportes

A análise dos diferentes cenários de transportes é feita a partir dos *gráficos 10, 11 e 12*. Destes gráficos, nota-se a pouca variação e não existência de uma correlação clara entre alteração de cenário e alteração do perfil de modelos mais vantajosos, sugerindo que a influência dos cenários de transportes não tenha relevância na escolha da quantidade de fornecedores. Os diferentes cenários de transportes foram considerados conforme detalhamento na parte 7.1.

Gráficos 10 e 11: relação de classificação de soluções para as diferentes quantidades de fornecedores, considerando cenário de transportes 1 e 2 respectivamente.

Gráficos 12: relação de classificação de soluções para as diferentes quantidades de fornecedores, considerando cenário de transportes 3.

Da análise da *tabela 7*, conclui-se novamente que a relevância do cenário de transportes em relação à escolha da quantidade de fornecedores não é grande. Verifica-se que o custo para alteração de fornecedor único para múltiplos fornecedores aumenta em 0,3% no cenário de transportes 1, 0,1% no cenário de transportes 2 e 0,8% no cenário de transportes 3. Por outro lado, o custo de alteração de múltiplos fornecedores para fornecedor único é de 10,8% para o cenário de transportes 1, 10,9% para o cenário de transportes 2 e 10,2% para o cenário de transportes 3.

	Cenário de transportes 1		Cenário de transportes 2		Cenário de transportes 3	
	Custo relativo MF quando FU é vantajoso	Custo relativo FU quando MF é vantajoso	Custo relativo MF quando FU é vantajoso	Custo relativo FU quando MF é vantajoso	Custo relativo MF quando FU é vantajoso	Custo relativo FU quando MF é vantajoso
Geral	100,3%	110,8%	100,1%	110,9%	100,8%	110,2%
Modelo (s, S)	100,8%	112,0%	100,3%	112,2%	101,4%	112,0%
Modelo (S-1, S)	102,8%	107,7%	101,4%	108,1%	102,9%	106,5%
Modelo (R,Q)	106,8%	114,9%	103,3%	114,3%	107,7%	114,8%
Modelo Ativo	100,0%	104,8%	101,2%	104,9%	100,1%	104,9%

Tabela 7: custos relativos entre primeiros classificados de modelos de fornecedor único e de modelos de múltiplos fornecedores, considerando cenários de transportes diferentes.

8.2.6. Análise detalhada – modelos de estoques

A análise detalhada dos diferentes modelos de estoque, a exemplo das análises detalhadas anteriores, busca identificar uma tendência de benefício maior por algum modelo especificamente. Para tal, utilizou-se dos mesmos gráficos apresentados anteriormente, porém considerando separação por modelo de estoques, aqui apresentados como *gráficos 13, 14, 15 e 16*. Nota-se nestes gráficos, que a quantidade de classificações passou de 28 para 7. Isso se deve ao fato de que para o mesmo grupo de parâmetros, onde havia 4 modelos com 7 combinações de fornecedores totalizando 28 resultados diferentes passíveis de comparação entre si, há na presente análise apenas 7 combinações de fornecedores, gerando assim apenas 7 resultados passíveis de comparação entre si.

A análise gráfica sugere que o modelo que mais é favorecido pela condição de múltiplos fornecedores é o modelo (R, Q) , seguido por $Ativo$ e (s, S) em condição de equivalência, e $(S-1, S)$ na sequência. Comparando-se a participação média dos modelos de múltiplos fornecedores nas duas primeiras colocações para os diferentes modelos, obtemos: $(R, Q) = 88,8\%$, $(s, S) = 85,0\%$, $Ativo = 84,8\%$ e $(S-1, S) = 76,2\%$, comprovando a análise gráfica de que os modelos, na ordem apresentada, são mais favorecidos pelos modelos de múltiplos fornecedores.

Gráficos 13 e 14: relação de classificação de soluções para as diferentes quantidades de fornecedores, considerando modelos de estoques (s, S) e (S-1, S) respectivamente.

Gráficos 15 e 16: relação de classificação de soluções para as diferentes quantidades de fornecedores, considerando modelos de estoques (R, Q) e Ativo respectivamente.

Considerando a análise da *tabela 2*, nota-se que no caso do modelo (R, Q), que mais se beneficia da condição de múltiplos fornecedores, a vantagem de fornecedor único quando este é vantajoso em relação a múltiplos fornecedores, é de 7,1%, muito acima da vantagem análoga para os outros modelos, que varia entre 0,4% e 2,4%. Considerando a mesma análise, porém para os casos em que múltiplos fornecedores são a solução mais vantajosa, o modelo (R, Q) resulta em vantagem de 14,7% , e os outros três modelos apresentam vantagens entre 4,8% e 12,0%. Estas análises reforçam que o modelo (R, Q) apresenta maior vantagem que os outros modelos quando considerados múltiplos fornecedores.

Em uma análise das *tabelas 3 a 7*, percebe-se que mesmo sob a análise de diferentes valores para determinados parâmetros, as conclusões acima permanecem válidas.

8.2.7. Análise detalhada – padrões de demanda

A análise detalhada dos diferentes padrões de demanda e o comportamento dos modelos de estoque com diferentes quantidades de fornecedores para cada um deles busca identificar uma tendência de benefício maior para os modelos quando sujeitos a diferentes padrões de demanda. Para tal, utilizou-se da mesma metodologia e base de gráficos apresentados anteriormente, apresentados a seguir como *gráficos 17, 18 e 19*, representando respectivamente os padrões de demanda de baixa variabilidade, média variabilidade e alta variabilidade (conforme detalhamento na seção 7.1).

Nota-se graficamente que nenhum dos padrões de demanda oferece uma sensível diferença no padrão dos gráficos, ou seja, os modelos de fornecedor único e múltiplos fornecedores obtêm resultados similares quando comparados em sua aplicação para diferentes padrões de demanda. Apesar de variações principalmente nas últimas colocações, o padrão de concentração de modelos com três fornecedores nas primeiras colocações, dois fornecedores ao longo de todas as colocações e fornecedor único concentrado nas últimas colocações, não se altera.

Gráficos 17 e 18: relação de classificação de soluções para os diferentes modelos, considerando padrão de demanda 1 e 2 respectivamente.

Gráfico 19: relação de classificação de soluções para os diferentes modelos, considerando padrão de demanda 3.

9. CONCLUSÕES E PRÓXIMOS PASSOS

A análise de dados dos resultados para os diferentes modelos e parâmetros com diferentes quantidades de fornecedores mostra que a utilização de múltiplos fornecedores com os modelos propostos traz uma redução de custo para 89% das instâncias, com uma média de 10,6% de redução de custo nestes casos, conforme visto na análise geral (8.1). Além disso, analisou-se que para os 11% em que modelos de fornecedor único obtêm custos menores, o ganho destes é de apenas 0,5%. Desta forma, a conclusão geral é de que os modelos de múltiplos fornecedores, propostos na presente pesquisa, são mais eficientes em termos de custos, do que os modelos de fornecedor único.

Das análises detalhadas para diferentes parâmetros (8.2.1 a 8.2.5) conclui-se que apenas o fator custo unitário de aquisição tem uma influência significativa na alteração do padrão dos resultados. Neste caso, os modelos de múltiplos fornecedores são mais eficientes quanto maior o custo unitário de aquisição. A variação dos outros parâmetros não demonstrou alteração significativa na preferência dos modelos, mantendo-se, portanto, o padrão de preferência dos modelos de múltiplos fornecedores.

Percebeu-se ainda pela análise 8.2.6 que os modelos (R, Q) e (s, S) obtêm as maiores vantagens dos modelos de múltiplos fornecedores. Entretanto, é importante considerar que os modelos $(S-1, S)$ e Ativo também apresentam melhoria no desempenho de custos quando comparados com os seus respectivos modelos de fornecedor único.

A análise 8.2.7 mostrou que mesmo sob condições de demanda diferentes, o desempenho dos modelos de múltiplos fornecedores não apresenta alterações de comportamento, ou seja, sua vantagem continua presente e similar em condições de diferentes padrões de demanda.

Conclui-se que, por considerar as diferentes condições de prazos de entregas e custos de aquisição, os modelos de múltiplos fornecedores podem ser parametrizados de forma a apresentarem custos menores no sistema de aquisição,

transporte e armazenagem de produtos. Sua aplicação ao ambiente da presente pesquisa (detalhado em 1 e 2) pode trazer benefícios, principalmente para casos de peças de manutenção com custos elevados.

A presente pesquisa teve objetivo de desenvolver e avaliar os modelos de estoque de múltiplos fornecedores, portanto não objetivou o desenvolvimento de algoritmos específicos para sua solução. Apesar da metodologia utilizada para a avaliação, ou seja, busca local com simulação de eventos discretos, ser eficiente, entende-se que o desenvolvimento de soluções matemáticas e computacionais alternativas pode ser explorado com mais rigor.

Além disso, o fato de se obter vantagens com modelos de múltiplos fornecedores em todos cenários testados (considerando cenário como conjunto de instâncias com características similares) indica que estes modelos podem ser aplicados a situações fora do contexto de peças de manutenção em que foram propostos. Atualmente, com a globalização crescente de produtos e aumento das importações e exportações em todo mundo, modelos de múltiplos fornecedores podem ser implementados para melhorar atendimento de demandas em diversos setores.

A presente pesquisa adotou a simplificação de capacidade de fornecimento infinita para os fornecedores, a fim de tornar o problema mais simples e identificar o potencial de aplicação de modelos de múltiplos fornecedores numa realidade restrita. Entretanto, uma vez confirmada a vantagem destes modelos, poderão ser desenvolvidos modelos de múltiplos fornecedores que considerem a capacidade finita de fornecimento, ampliando a aplicabilidade na prática.

Outro campo de exploração futura é a integração do modelo para um ente num cenário de múltiplos entes (apresentado na *figura 1*). Esta integração completaria o modelo de distribuição de peças de manutenção, problema que motivou a presente pesquisa.

10. **BIBLIOGRAFIA**

AXSATER, S., Inventory Control. 2nd ed. New York: Springer. 2006

BACCETTI, A. e SACCANI, N. Spare parts classification and demand forecasting for stock control: Investigating the gap between research and practice. [S.l.] Omega 2012. 40, 722-737.

BALLOU, R.H. Gerenciamento da cadeia de suprimentos/logística empresarial. 5^a ed. São Paulo: Bookman. 2004

COHEN, M.A., AGRAWAL, N. AGRAWAL, V. Winning in the aftermarket [S.l.] *Haward Business Review* 2006. 84, 129-138.

GRAVES, S.C. A multi-Echelon Inventory Model for a Repairable Item with One-for-One Replenishment. [S.l.] *Management Science* 1985. 31, 1247-1256.

HUISKONEN, J. Maintenance spare parts logistics: Special characteristics and strategic choices. [S.l.] *International Journal of Production Economics* 2001. 71, 125-133.

JUNG, J.Y., BLAU, G., PEKNY, J.F., REKLAITIS, G.V., EVERSDYK, D. A simulation based optimization approach to supply chain management under demand uncertainty. [S.l.] *Computers and Chemical Engineering* 2004. 28, 2087-2106.

KRANENBURG, A.A. Spare parts inventory control under system availability constraints. Eindhoven: Ph.D. Dissertation, Eindhoven University of Technology 2006

KUTANOGLU, E. e MAHAJAN, M. An inventory sharing and allocation method for a multi-location service parts logistics network with time-based service levels. [S.l.] *European Journal of Operational Research*, 2009. 194, 728–742.

MAKRIDAKIS, S., WHEELWRIGHT, S.C., HYNDMAN, R.J. Forecasting Methods and Applications 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons 1998

- MATTA, K.F. e GUERRERO, H.H. Analyzing an inventory system with multiple reorder points and periodic replenishment. [S.l.] *Computers & Industrial Engineering*, 1990. v. 18 n. 4, 445-456.
- MUCKSTADT, J. A Model for Multi-Item, Multi-Echelon, Multi-Indenture Inventory System. [S.l.] *Management Science* 1973. 20, 472-481.
- MUCKSTADT, J.A., Analysis and Algorithms for Service Parts Supply Chains. New York: Springer 2010
- PATERSON, C., KIESMULLER, G., TEUNTER, R., GLAZEBROOK, K. Inventory models with lateral transshipment: A Review. [S.l.] *European Journal of Operational Research*. 2011 201, 125-136.
- SAJADIEH, M.S., ESHGHI, K. Sole versus dual sourcing under order dependent lead times and prices. [S.l.] *Computers & Operations Research*. 2009. 36, 3272-3280.
- SANTORO, M. C., FREIRE, G. Inventory System to Healthcare & Medical. 6th Annual HCTM Conference – HOF – Scuola Superiore Sant' Anna, Pisa, Italy. 2006
- SHERBROOKE, C.C. METRIC: A Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control. [S.l.] *Operations Research* 1966. 16, 122-141.
- SHERBROOKE, C.C. VARI-METRIC: Improved Approximations for Multi-Indenture, Multi-Echelon Availability Models. [S.l.] *Operations Research* 1986. 34, 311-319.
- SHERBROOKE, C.C. Optimal Inventory Modeling of Systems – Multi-Echelon Techniques, 2nd ed. Boston: Kluwer Academic Publishers 2004
- SLAY, F.M. VARI-METRIC: An Approach to Modelling Multi-Echelon Resupply when the Demand Process is Poisson with a Gamma Prior. Washington D.C.: Logistics Management Institute, Report AF301-3. 1984
- UTTERBEECK, F.V., WONG, H., OUDHEUSDEN, D.V. e CATTRISSE, D. The effects of resupply flexibility on the design of service parts supply systems. [S.l.] *Transportation Research*, 2009. E 45, 72–85.

- VAN der HEIJDEN, M.C., ALVAREZ, E.M., SCHUTTEN, J.M.J. Inventory reduction in spare parts networks by selective throughput time reduction. [S.l.] *International Journal Production Economics*, (artigo corrigido disponível online em 30 de março de 2012, em fase de publicação)
- WAN, X., PEKNY, J.F., REKLAITIS, G.V. Simulation-based optimization with surrogate models – Application to supply chain management. [S.l.] *Computers and Chemical Engineering*, 2002. 29, 1317-1328
- WONG, H., HOUTUM, G.J., CATTRISSE, D. e OUDHEUSDEN, D. Multi-item spare parts systems with lateral transshipments and waiting time constraints. [S.l.] *European Journal of Operational Research*, 2006. 171, 1071–1093.