

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

**PROPOSTA DE UM MODELO DE PROGRAMA MESTRE DE DESMONTAGEM  
DE PRODUTOS EM UM SISTEMA DE REMANUFATURA COM ROTEIROS  
ESTOCÁSTICOS**

**MURIS LAGE JUNIOR**

**TESE DE DOUTORADO**

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

**PROPOSTA DE UM MODELO DE PROGRAMA MESTRE DE DESMONTAGEM  
DE PRODUTOS EM UM SISTEMA DE REMANUFATURA COM ROTEIROS  
ESTOCÁSTICOS**

**Muris Lage Junior**

**Tese de Doutorado apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Produção da Universidade  
Federal de São Carlos, como parte dos  
requisitos para a obtenção do título de  
Doutor em Engenharia de Produção.**

**Orientador: Prof. Dr. Moacir Godinho Filho**

**SÃO CARLOS  
2012**

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da  
Biblioteca Comunitária/UFSCar**

L174pm

Lage Junior, Muris.

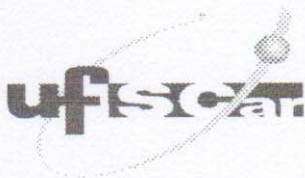
Proposta de um modelo de programa mestre de  
desmontagem de produtos em um sistema de remanufatura  
com roteiros estocásticos / Muris Lage Junior. -- São Carlos  
: UFSCar, 2012.

160 f.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos,  
2012.

1. Planejamento da produção. 2. Controle de produção. 3.  
Remanufatura. 4. Indústria de autopeças. I. Título.

CDD: 658.5038 (20<sup>a</sup>)



## FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno(a): Muris Lage Junior

TESE DE DOUTORADO DEFENDIDA E APROVADA EM 28/02/2012 PELA  
COMISSÃO JULGADORA:

Prof. Dr. Moacir Godinho Filho  
Orientador(a) PPGE/UFSCar

Prof. Dr. Paulo Rogério Politano  
DC/PPGE/UFSCar

Prof. Dr. Fábio Muller Guerrini  
EESC/USP

Prof. Dr. Miguel Cezar Santoro  
POLI/USP

Prof. Dr. Néocles Alves Pereira  
PPGE/UFSCar

Prof. Dr. Mário Otávio Batalha  
Coordenador do PPGE

## RESUMO

A remanufatura é uma importante fonte de desenvolvimento sustentável. Os produtos remanufaturados são de qualidade e de baixo custo. Além disso, as empresas remanufatureiras representam um potencial crescimento no nível de emprego, pois são intensivas em mão-de-obra devido às operações de desmontagem, recondicionamento e remontagem. Em função das características singulares dos processos de remanufatura, esta possui claramente muitas diferenças em relação à manufatura convencional. Essas características, que a torna uma atividade complexa, requerem um bom desempenho das atividades de Planejamento e Controle da Produção (PCP). Nesta pesquisa pretende-se atuar justamente nas atividades do PCP, mais especificamente no PCP para a remanufatura de autopeças, uma das maiores representantes da categoria no Brasil. Os objetivos da pesquisa são: identificar as principais características e dificuldades da remanufatura de autopeças, no que se refere ao PCP; identificar as principais características, ferramentas gerenciais e dificuldades da remanufatura na literatura, no que se refere ao PCP; e propor um modelo/método para preencher uma das lacunas identificadas a respeito das dificuldades na prática e na literatura sobre PCP na remanufatura. O método proposto, para preencher uma das lacunas identificadas, é para realização da programação mestre de desmontagem considerando roteiros estocásticos. Com isso, os resultados da presente pesquisa contribuem efetivamente para o desenvolvimento da teoria e para a aplicação prática com relação ao PCP na remanufatura.

Palavras-Chave: Remanufatura; Planejamento e Controle da Produção; Setor de Autopeças.

## **ABSTRACT**

Remanufacturing is an important source of sustainable development. Remanufactured products provide quality standards of new products with low cost. In addition, remanufacturing companies represent a potential growth in employment, as are intensive in manpower due to the operations of disassembly, reconditioning and reassembly. Due to the unique characteristics of the remanufacturing process, it clearly has many differences compared to conventional manufacturing. These characteristics, which makes it a complex activity, requiring a good performance of the activities of the Production Planning and Control (PPC). In this research we intend to cope with PPC, specifically for the automotive parts remanufacturing, one of the most representative of the category in Brazil. The research objectives are to identify the main characteristics and challenges of remanufacturing auto parts, with respect to PPC, identifying the main features, management tools and challenges of remanufacturing in the literature with regard to PPC, and propose a model / method to fill the identified gaps about the difficulties in practice and literature on PPC in remanufacturing. The proposed method, to fill one of the gaps identified, is to perform the disassembly master production scheduling considering stochastic routings. Thus, the results of this study contribute effectively to the development of theory and practical application with respect to PPC in remanufacturing.

**Keywords:** Remanufacturing; Production Planning and Control; Auto parts industry.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – Passos, capítulos e procedimentos de pesquisa desta tese.....	21
FIGURA 2.1 – Atividades do planejamento e controle da produção.....	24
FIGURA 2.2 – Subsistemas principais de um processo de remanufatura.....	27
FIGURA 2.3 – Sistema híbrido de manufatura e remanufatura.....	29
FIGURA 2.4 – Diferença entre a remanufatura e a reciclagem .....	33
FIGURA 2.5 – Estrutura genérica de um canal de distribuição reverso .....	35
FIGURA 2.6 – Sistema da corrente de descarte.....	36
FIGURA 2.7 – Sistema dirigido ao mercado .....	37
FIGURA 2.8 – Padrão de consumo linear.....	41
FIGURA 2.9 – Rede de cidades .....	51
FIGURA 2.10 – Decomposição do problema em estágios.....	52
FIGURA 3.1 – Pesquisas de acordo com o tipo de remanufatura estudada.....	72
FIGURA 3.2 – Digrama de Venn dos subsistemas estudados .....	73
FIGURA 3.3 – Características específicas da remanufatura tratadas nas pesquisas.....	74
FIGURA 3.4 – Atividades do PCP tratadas nas pesquisas.....	75
FIGURA 3.5 – Diagrama de Venn das atividades do PCP tratadas nos artigos .....	75
FIGURA 4.1 – Estrutura dos estudos de caso nesta pesquisa. ....	81
FIGURA 5.1 – Representação de um sistema de remanufatura com roteiros estocásticos....	114
FIGURA 5.2 – Análise de sensibilidade do caso real com variação do custo da rota 2 .....	136

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Decisão no estágio 3 .....	54
TABELA 2.2 – Decisão no estágio 2 .....	54
TABELA 2.3 – Decisão no estágio 1 .....	54
TABELA 5.1 – Resultados do exemplo numérico ilustrativo.....	131
TABELA 5.2 – Resultados da aplicação prática do modelo .....	135



## LISTA DE QUADROS

QUADRO 3.1 – Características específicas da remanufatura tratadas em pesquisas relativas a algumas das principais atividades do PCP .....	59
QUADRO 3.2 – Classificação dos artigos revisados .....	64
QUADRO 3.3 – Características específicas da remanufatura identificadas na literatura em relação às atividades do PCP .....	76
QUADRO 3.4 – Relacionamentos entre as características específicas da remanufatura e as atividades do PCP não tratados na literatura revisada .....	77
QUADRO 4.1 – Ações das empresas e consequências em relação à característica A (incerteza quanto à quantidade e momento de retorno de produtos usados).....	96
QUADRO 4.2 – Ações das empresas e consequências em relação à característica B (necessidade de balancear o retorno dos produtos com a demanda) .....	97
QUADRO 4.3 – Ações das empresas e consequências em relação à característica C (necessidade de desmontar os produtos retornados).....	98
QUADRO 4.4 – Ações das empresas e consequências em relação à característica D (incerteza quanto à taxa de recuperação dos materiais que compõem os produtos retornados) .....	98
QUADRO 4.5 – Ações das empresas e consequências em relação à característica E (necessidade de uma rede de logística reversa) .....	99
QUADRO 4.6 – Ações das empresas e consequências em relação à característica F (necessidade de rastreamento ao longo do processo) .....	100
QUADRO 4.7 – Ações das empresas e consequências em relação à característica G (alta variabilidade dos tempos de processamento) .....	100
QUADRO 4.8 – Ações das empresas e consequências em relação à característica H (roteiros estocásticos).....	101
QUADRO 4.9 – Identificação das necessidades de soluções para o PCP das empresas estudadas.....	102
QUADRO 4.10 – Lacunas na literatura sobre atividades do PCP na remanufatura em relação às características específicas da remanufatura.....	104
QUADRO 4.11 – Lacunas na prática sobre atividades do PCP na remanufatura em relação às características específicas da remanufatura identificadas nos estudos de caso .....	105
QUADRO 4.12 – Lacunas na prática sobre atividades do PCP na remanufatura em relação às características específicas da remanufatura identificadas nos estudos de caso .....	106

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Apresentação do trabalho .....	13
1.2 Questões de pesquisa e objetivos.....	15
1.3 Justificativa e contribuições esperadas .....	15
1.4 Método de pesquisa .....	17
1.5 Estrutura do trabalho .....	20
2 ASPECTOS TEÓRICOS: PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO, REMANUFATURA E PROGRAMAÇÃO DINÂMICA.....	22
2.1 Introdução.....	22
2.2 O planejamento e controle da produção .....	22
2.3 A remanufatura .....	26
2.3.1 Conceituação básica .....	26
2.3.2 Outros conceitos relacionados .....	32
2.3.3 Importância da remanufatura.....	40
2.3.4 As diferenças entre manufatura e remanufatura.....	42
2.3.5 A Remanufatura de Autopeças .....	47
2.4 Programação dinâmica .....	50
2.4.1 Exemplo numérico de programação dinâmica determinística.....	51
2.4.2 Exemplo numérico de programação dinâmica probabilística .....	55
2.4.3 Considerações sobre a programação dinâmica.....	56
3 O PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO PARA A REMANUFATURA: REVISÃO E ANÁLISE DA LITERATURA .....	58
3.1 Introdução.....	58
3.2 O sistema de classificação proposto .....	60
3.3 A literatura sobre o Planejamento e Controle da Produção para a remanufatura.....	64

3.3.1	Artigos que tratam de apenas uma atividade do PCP .....	64
3.3.1.1	Previsão .....	64
3.3.1.2	Planejamento agregado .....	65
3.3.1.3	Programa mestre de produção .....	65
3.3.1.4	Logística .....	66
3.3.1.5	Coordenação de ordens .....	66
3.3.1.6	Planejamento da capacidade .....	66
3.3.1.7	<i>Scheduling</i> .....	67
3.3.1.8	Gestão e controle de estoques .....	68
3.3.2	Artigos que tratam de mais de uma atividade do PCP .....	70
3.4	Análise da literatura revisada (anos 2000-2009) .....	71
3.5	Comparação entre a análise da literatura fornecida por Guide (2000) e as análises realizadas neste trabalho .....	76
3.6	Considerações finais .....	80
4	ESTUDO DE MÚLTIPLOS CASOS SOBRE O PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO NA REMANUFATURA .....	81
4.1	Introdução .....	81
4.2	Estudo de caso 1 .....	83
4.2.1	Descrição da empresa 1 .....	83
4.2.2	Características específicas da remanufatura na empresa 1 .....	83
4.3	Estudo de caso 2 .....	86
4.3.1	Descrição da empresa 2 .....	86
4.3.2	Características específicas da remanufatura na empresa 2 .....	86
4.4	Estudo de caso 3 .....	89
4.4.1	Descrição da empresa 3 .....	89
4.4.2	Características específicas da remanufatura na empresa 3 .....	90

4.5 Estudo de caso 4 .....	92
4.5.1 Descrição da empresa 4 .....	92
4.5.2 Características específicas da remanufatura na empresa 4.....	93
4.6 Análise conjunta dos casos .....	95
4.7 Comparação entre a revisão da literatura e os estudos de caso .....	103
4.8 Considerações finais .....	106
<b>5 MODELAGEM MATEMÁTICA PARA OTIMIZAR O PROGRAMA MESTRE DE DESMONTAGEM CONSIDERANDO ROTEIROS ESTOCÁSTICOS.....</b>	<b>109</b>
5.1 Introdução.....	109
5.2 Pesquisa bibliográfica sobre o problema estudado.....	110
5.3 Modelagem matemática.....	114
5.3.1 Definição do problema .....	114
5.3.2 Construção do modelo matemático .....	115
5.3.3 Solução do modelo matemático.....	119
5.3.3.1 Ilustração do uso do modelo proposto.....	119
5.3.3.2 Análise de sensibilidade .....	132
5.3.4 Validação do modelo matemático .....	133
5.4 Aplicação prática do modelo .....	134
5.5 Considerações finais .....	137
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>139</b>
6.1 Introdução.....	139
6.2 Respostas às questões de pesquisa .....	139
6.3 Avaliação dos objetivos.....	140
6.4 Contribuições.....	141
6.5 Limitações da pesquisa.....	141

6.6 Trabalhos Futuros .....	142
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	143
APÊNDICE A .....	158

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Apresentação do trabalho

A eficiência de qualquer sistema produtivo depende da forma como os problemas administrativos são resolvidos, quer dizer do planejamento, programação e controle do sistema (TUBINO, 2000). Em outras palavras, para se usufruir de todos os ganhos advindos da divisão do trabalho e especialização, é necessário que haja coordenação entre as atividades produtivas, garantida pelo Planejamento e Controle da Produção (PCP).

Novas tecnologias, novos produtos e processos, sistemas e técnicas permitem diferentes iniciativas competitivas para as empresas industriais. O mercado exige novas leituras nas estratégias das companhias, as quais frequentemente requerem mudanças na manufatura, nos processos e nos sistemas de PCP e suas respectivas ferramentas.

Recentemente as empresas industriais vêm se defrontando com a necessidade de diminuir os impactos ambientais causados pelas operações produtivas, seja pela imposição de leis governamentais ou pela exigência dos próprios consumidores que cada vez mais adquirem consciência ambiental. Além disso, como enfatizam Beamon e Fernandes (2004), o crescimento do consumo resulta em redução de recursos disponíveis para os sistemas produtivos e, ainda mais, o desenvolvimento da tecnologia encurta o ciclo de vida dos produtos e aumenta exponencialmente a quantidade de produtos descartados como lixo (BEHRET e KORUGAN, 2009). Mesmo os recursos renováveis têm sido consumidos além da habilidade da natureza em renová-los (FERRER e WHYBARK, 2001). Diante disso, muitas dessas empresas, ora motivadas por essas exigências e pela própria imagem corporativa resultante da adoção de ações em favor da preservação ambiental, ora motivadas por razões simplesmente econômicas, estão adotando procedimentos em direção à conservação ambiental. Dentre as diversas maneiras de se responder a essas pressões sociais, econômicas e legislativas pode-se citar a reciclagem, reutilização e, em especial para esta pesquisa, a remanufatura de produtos. Ao reciclar o produto retorna às suas formas de matéria-prima, e a identidade e funcionalidade do produto não são preservados. Reutilizar significa usar o produto para suas funções originais ou para outras funções, desde que possível.

Remanufaturar significa restaurar bens duráveis por meio da reposição de peças deterioradas ou gastas. Mais especificamente, a remanufatura é um processo industrial em que produtos já utilizados e descartados são recuperados, tornando-se operacionalmente novos. Isso é feito, primeiramente pela obtenção dos produtos usados. Após, esses produtos são completamente desmontados e inspecionados. As partes consideradas úteis são limpas, reformadas e estocadas. Por fim, produtos novos são (re)montados a partir dessas peças e, se necessário, com a utilização de peças novas. Dessa forma, a remanufatura recupera o valor agregado na forma de material, energia e trabalho que permanece nos produtos descartados.

Muitas empresas atuam somente com o processo de remanufatura. Outras empresas possuem a remanufatura como um processo paralelo ao da manufatura. Os principais produtos remanufaturados pelas indústrias são: copiadoras, *tonners* de impressoras, equipamentos médicos, autopeças, celulares, computadores, mobiliários, equipamentos de aviação, equipamento aeroespacial, equipamentos militares e pneus (GUIDE, 2000). Alguns exemplos de empresas internacionais que têm operações de remanufatura são: Pitney Bowes – sistemas de postagem de correspondência, Xerox – fotocopiadoras, Kodak - câmeras descartáveis, Lucent Technologies – aparelhos de telecomunicação e ReCellular – telefonia móvel. O destaque na indústria brasileira são as autopeças, que possuem uma associação – ANRAP (Associação Nacional dos Remanufuradores de Autopeças) – que promove e divulga essa atividade no Brasil, e uma feira nacional anual – Reman Recon (Feira de Peças Remanufuradas e Reconstruídas para Automóveis, Caminhões e Ônibus).

Para que a produção possa suportar as condições impostas por estas mudanças o sistema de PCP é vital. De acordo com Olhager e Wikner (2000), neste sentido, o sistema de PCP torna-se uma questão estratégica, uma vez que representa o primeiro elo entre o nível estratégico e os níveis abaixo, provendo a estrutura para traduzir as intenções estratégicas em planos táticos e operacionais concretos. É exatamente neste contexto de novas exigências em relação ao PCP das empresas industriais que esta pesquisa atua, mais especificamente nas novas exigências trazidas pela remanufatura.

## 1.2 Questões de pesquisa e objetivos

As atividades do PCP na remanufatura são bastante diferentes das mesmas atividades na manufatura. Essas diferenças se apresentam na forma de oito características específicas (tratadas na literatura como características complicadoras):

- a) incerteza quanto à quantidade e momento de retorno dos produtos usados;
- b) necessidade de balancear o retorno dos produtos com a demanda;
- c) necessidade de desmontar os produtos retornados;
- d) incerteza quanto à taxa de recuperação dos materiais que compõem os produtos retornados;
- e) necessidade de uma rede de logística reversa para coletar os produtos usados e transportá-los para a operação de remanufatura;
- f) necessidade de rastreamento ao longo do processo para itens desmontados de produtos cuja propriedade permanece do consumidor;
- g) alta variabilidade dos tempos de processamento; e
- h) roteiros estocásticos de processamento, em função das diferentes condições dos retornos.

Diante disso, as principais questões que norteiam esta pesquisa são:

- 1) Quais são as necessidades de métodos e modelos na literatura para a remanufatura, no que se refere ao PCP e as características específicas da remanufatura?
- 2) Quais são as necessidades de métodos e modelos na remanufatura na prática em algumas empresas instaladas no Brasil, no que se refere ao PCP e as características específicas da remanufatura?

Com base nas respostas às questões 1 e 2, o objetivo desta pesquisa é:

- 1) Propor um método/modelo para preencher uma lacuna comum entre a literatura e a prática no que se refere ao PCP levando-se em consideração as características específicas da remanufatura.

## 1.3 Justificativa e contribuições esperadas

No futuro, poucos produtos vão ser descartados antes de seu potencial de reuso, remanufatura e reciclagem ser totalmente explorado (DOWLATSHAHI, 2005). A



remanufatura é uma importante fonte de desenvolvimento sustentável (TANG *et al.*, 2007; VAN DER LAAN e TEUNTER, 2006; GUIDE, 2000; dentre outros), é reconhecidamente uma atividade lucrativa (LUND, 1998) e ainda precisa ser mais explorada em pesquisas (GUIDE *et al.*, 2005; IJOMAH, 2008; SUBRAMONIAM *et al.*, 2009). Segundo Atasu *et al.* (2008) “a literatura sobre remanufatura é pequena comparada com a importância das questões gerenciais que ela representa”. No Brasil, esse assunto ainda é pouco tratado. Alguns exemplos de trabalhos nacionais são Costa Filho *et al.* (2006), Kato e Laurindo (2004), Farias (2004) e Lage Junior (2008).

Para o mercado, uma das grandes vantagens dos remanufaturados reside na oportunidade de adquirir bens de qualidade a preços menores. Segundo a OMC (Organização Mundial do Comércio – Documento TN/MA/W/18) a remanufatura possibilita que o produto custe de 45 a 80% do preço de um produto equivalente novo. Além disso, estas operações compreendem um grande número de empresas, sobretudo as pequenas, que crescem a taxas entre 20 e 30% ao ano nos EUA. A remanufatura também tem a vantagem de oferecer um potencial crescimento no nível de emprego, pois é intensiva em mão-de-obra devido às operações de desmontagem, condicionamento e remontagem.

Mais do que isso, esse assunto apresenta uma visível lacuna no tocante ao conhecimento relacionado à utilização de sistemas de PCP. Segundo Chiu (2008), “a reciclagem e reuso de peças de automóveis não é um fenômeno recente, mas permanece não amplamente difundido ou não existem estudos suficientes realizados do panorama dos processos aplicados na indústria.” Ainda mais, Atasu *et al.* (2008) são enfáticos ao afirmar que as decisões na remanufatura são difíceis porque os gerentes têm poucos guias e a prática industrial é muito diversificada. Acrescentado a isso, tem-se que “a gestão confirma que são necessárias ferramentas mais sofisticadas para fazer com que as decisões na remanufatura sejam mais efetivas e diferenciadas” (ATASU *et al.*, 2008). Portanto, ferramentas de planejamento e de suporte à decisão raramente estão disponíveis ou são aplicadas na remanufatura, a necessidade de tais ferramentas é evidente, e existem características particulares na remanufatura que criam problemas quando os métodos tradicionais de PCP são usados (DENIZEL *et al.*, 2010; FERGUSON *et al.*, 2007; CHIOTELLIS *et al.*, 2008).

Segundo a Associação Paulista de Retífica de Motores (APAREM), nos Estados Unidos grande parte das autopeças vendidas são remanufaturadas. Na Alemanha, os remanufaturados correspondem à maior parte das vendas. Já no Brasil, esse volume é de apenas 6% (APAREM, 2008). Todas essas constatações demonstram que a remanufatura de autopeças é um campo de atuação com expansão promissora nos próximos anos no Brasil.

Com isso, o presente trabalho pretende fornecer contribuições e resultados que serão muito demandados nos próximos anos, por praticantes e pesquisadores.

Dessa forma, com a efetuação desta pesquisa, pretende-se contribuir efetivamente para o desenvolvimento da teoria com relação à remanufatura e com relação a essa atividade no Brasil. Em outras palavras, o produto final desta pesquisa pode auxiliar os tomadores de decisão da área de gestão da produção ou PCP que trabalham em remanufaturas de autopeças a lidar melhor com as características específicas da remanufatura.

#### **1.4 Método de pesquisa**

Segundo Ander-Egg (1978) citado em Lakatos e Marconi (2005), “a pesquisa é um procedimento reflexivo sistemático, controlado e crítico, que permite descobrir novos fatos ou dados, relações ou leis, em qualquer campo do conhecimento.” Dessa forma, a pesquisa nada mais é do que um caminho para o conhecimento, e requer um procedimento formal, métodos e tratamento científico.

Do ponto de vista da forma de abordagem do problema, a pesquisa pode ser quantitativa, o que significa traduzir em números opiniões e informações para classificá-las e analisá-las e qualitativa, em que o ambiente natural é a fonte direta para coleta de dados e o pesquisador é o instrumento-chave. Bryman (1989) expõe que as principais preocupações da abordagem quantitativa são a mensurabilidade, a generalização e a replicabilidade. Já com relação à abordagem qualitativa, Ghauri e Gronhaug (1995) enfatizam que esta é adequada para a realização de estudos de assuntos complexos como o comportamento organizacional, permitindo a obtenção de detalhes pelo pesquisador. Segundo Martins (1998), estas duas abordagens estão amplamente difundidas na área organizacional.

Bryman (1989) divide as pesquisas na área organizacional em quatro métodos principais:

- a) pesquisa experimental: por meio do controle sistemático das variáveis, o pesquisador examina suas relações de causalidade;
- b) pesquisa de avaliação (ou *survey*): o pesquisador utiliza geralmente questionários e ou entrevistas, coletando dados quantificáveis;

- c) estudo de caso: estudo das características das unidades de análise, de forma a testar teorias ou confirmar resultados;
- d) pesquisa-ação: o pesquisador, neste caso, colabora no desenvolvimento da solução do problema pesquisado.

Quanto à abordagem de pesquisa, neste trabalho utiliza-se tanto a qualitativa quanto a quantitativa, e como métodos o estudo de caso e a modelagem matemática.

O estudo de caso é uma forma de se fazer pesquisa social empírica, tendo como objetivo a investigação do fenômeno dentro de seu contexto. Para Yin (1990) os estudos de caso são apropriados para:

- a) explicar ligações causais que são relativamente complexas para serem tratadas com experimentação ou com levantamento de dados;
- b) descrever intervenções realizadas em um contexto de vida real;
- c) avaliar uma intervenção em curso e modificá-la; e
- d) exploração de situações nas quais não se tem clareza dos resultados.

De acordo com este mesmo autor, este tipo de pesquisa geralmente envolve o exame de um pequeno número de casos, não tendo por objetivo a generalização. O objetivo principal é criar relações e promover o entendimento de um fenômeno estudado. Este procedimento é do tipo qualitativo e pode ser usado para responder às questões “como” e “por que” estes fenômenos ocorrem.

Para a presente pesquisa, optou-se pela utilização do estudo de caso como um meio de explorar as situações das empresas que atuam na remanufatura, em que as peculiaridades de cada caso são complexas e, além disso, não se tinha clareza dos resultados que seriam alcançados. O estudo de caso é utilizado para identificar o perfil da atividade de remanufatura de autopeças em algumas empresas instaladas no Brasil. O objetivo é estabelecer, dentro de uma determinada amostra, quais os produtos remanufaturados, quais as dificuldades em termos de PCP e com relação às características específicas da remanufatura, quais os tipos de sistemas de PCP empregados, se essas empresas são grandes, médias ou pequenas, a classificação do sistema produtivo de cada uma etc. Uma segunda intenção desses estudos de caso é identificar quais são as necessidades de métodos e modelos na remanufatura de autopeças em algumas empresas instaladas no Brasil, no que se refere ao PCP e as características específicas da remanufatura.

Uma vez que o comportamento desses sistemas de remanufatura é complexo e contemporâneo e, além disso, as variáveis envolvidas (necessidades de métodos e modelos para o PCP na remanufatura) não podem ser controladas pelo pesquisador, a escolha deste

método está dentro das circunstâncias adequadas, segundo Bryman (1989), Ghauri e Gronhaug (1995) e Freitas *et al.* (2000).

As principais desvantagens dos estudos de caso são a dificuldade de generalização, dificuldade de estabelecer critérios rigorosos de seleção dos casos e natureza subjetiva do processo de mensuração. No presente estudo, não se pretende, porém generalizar os resultados; apenas, a partir das fontes primárias, entender o fenômeno por meio da perspectiva do objeto de estudo. Para contornar a natureza subjetiva da mensuração dos resultados, procurou-se adotar as medidas propostas por Yin (1990) e Lazzarini (1995):

- a) saber ouvir e ter postura neutra frente às respostas obtidas;
- b) formular questões capazes de fornecer as informações desejadas;
- c) criar um protocolo para a coleta dos dados;
- d) separar as informações obtidas da análise.

Também, em se tratando de uma situação complexa, a utilização de modelos permite compreender melhor o ambiente em questão e apoiar e sistematizar o processo de tomada de decisão (MIGUEL *et al.*, 2010). Na presente tese é realizada uma modelagem matemática para realização da programação mestre de desmontagem em sistemas de remanufatura com roteiros estocásticos para preencher uma lacuna comum identificada na pesquisa bibliográfica e nos estudos de caso. A modelagem realizada na presente pesquisa pode ser classificada como uma pesquisa empírica quantitativa normativa, pois o objetivo é propor um modelo baseado em observações da realidade com o propósito de prescrever uma decisão para um sistema de remanufatura com roteiros estocásticos.

Além dos estudos de caso e da modelagem matemática, neste trabalho é utilizada a pesquisa do tipo teórico-conceitual. A pesquisa teórica não implica imediata intervenção na realidade, mas nem por isso deixa de ser importante, pois seu papel é decisivo na criação de condições para a intervenção. De acordo com Berto e Nakano (1998) este procedimento “é fruto de uma série de reflexões fundamentadas em um fato observado ou exposto pela literatura”. A pesquisa bibliográfica pode ser aí enquadrada já que o objetivo é explicar um problema a partir de referências teóricas publicadas. A revisão bibliográfica é um método bastante utilizado para examinar, de forma abrangente, diferentes abordagens sobre o tema a ser estudado. No caso desta pesquisa, é revisada a literatura a respeito do Planejamento e Controle da Produção (PCP) e da remanufatura, por meio de teses, dissertações, artigos e livros. Neste trabalho, os principais objetivos da revisão da literatura são: i) identificar as necessidades de métodos e modelos para a remanufatura na literatura, no que se refere ao PCP e as características específicas da remanufatura e ii) embasar a elaboração de um sistema de

PCP para a remanufatura, compatível com as necessidades atuais em termos de pesquisa e prática.

## 1.5 Estrutura do trabalho

A presente tese de doutoramento está estruturada em 7 capítulos, incluindo esta introdução.

No segundo capítulo é feita uma revisão bibliográfica sobre Planejamento e Controle da Produção (PCP), sobre remanufatura e sobre a programação dinâmica como abordagem científica da pesquisa operacional. O objetivo é fazer uma exploração dos principais conceitos necessários à condução desta pesquisa, por meio da apresentação dos termos e conceitos essenciais ligados ao tema de pesquisa.

No capítulo três é feita uma revisão bibliográfica sobre o planejamento e controle da produção na remanufatura. O objetivo é responder à primeira questão de pesquisa: quais são as necessidades de métodos e modelos na literatura para a remanufatura, no que se refere ao PCP e as características específicas da remanufatura?

No capítulo quatro são feitos estudos de caso em quatro diferentes empresas de remanufatura de autopeças instaladas no Brasil. O objetivo é responder à segunda questão de pesquisa: quais são as necessidades de métodos e modelos na remanufatura de autopeças em algumas empresas instaladas no Brasil, no que se refere ao PCP e as características específicas da remanufatura?

Com base nos resultados dos capítulos 3 e 4, ou seja, no que foi verificado como sendo necessidade tanto na literatura como na prática, no capítulo cinco é proposto um modelo para preencher uma das lacunas identificadas.

O capítulo seis, as conclusões, finaliza esta pesquisa, concluindo o trabalho com o levantamento de todos os pontos relevantes do estudo, além da exposição das limitações da pesquisa e proposição de trabalhos futuros.

O capítulo sete dispõe a relação da bibliografia utilizada para a realização deste trabalho.

A figura 1.1 a seguir mostra os passos, capítulos e procedimentos de pesquisa para este trabalho.

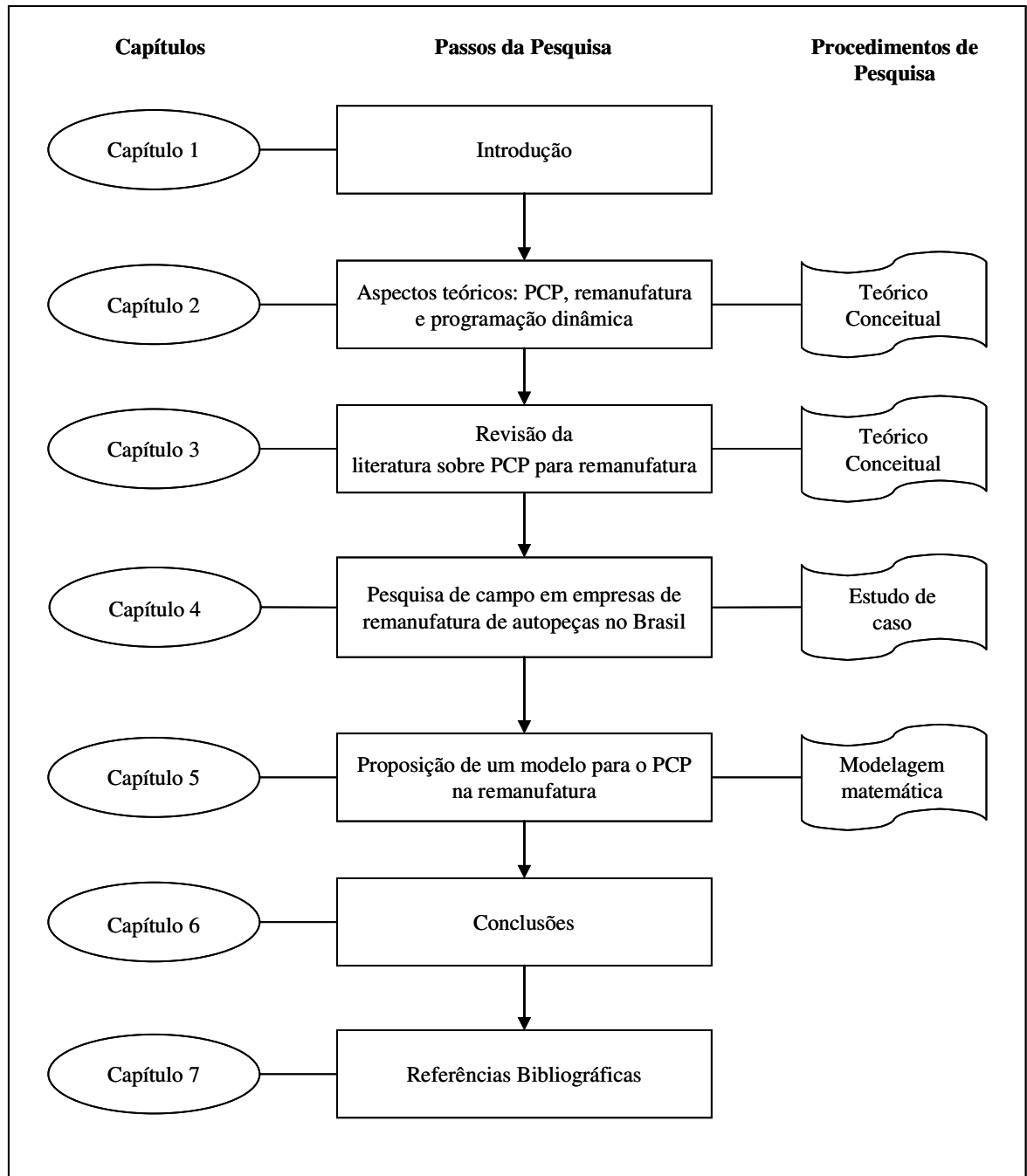


FIGURA 1.1 – Passos, capítulos e procedimentos de pesquisa desta tese.

## **2 ASPECTOS TEÓRICOS: PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO, REMANUFATURA E PROGRAMAÇÃO DINÂMICA**

### **2.1 Introdução**

O presente capítulo tem como objetivo fazer uma exploração dos principais conceitos necessários à condução desta pesquisa, por meio da apresentação do contexto, do referencial teórico e dos principais termos relativos ao Planejamento e Controle da Produção (PCP), à remanufatura e à programação dinâmica. Para o cumprimento desse objetivo, a estrutura é a seguinte: a seção 2.2 trata do PCP e descreve suas principais atividades. A seção 2.3 apresenta o tema remanufatura, alguns conceitos relacionados, sua importância, as diferenças entre manufatura e remanufatura e finda com o tratamento do setor de remanufatura de autopeças, que é o foco desta tese de doutoramento. Por fim, na seção 2.4 são expostas as particularidades da programação dinâmica, pois é o método de modelagem matemática em pesquisa operacional utilizado na presente tese.

### **2.2 O planejamento e controle da produção**

A eficiência de qualquer sistema produtivo depende da forma como os problemas administrativos são resolvidos, quer dizer do planejamento, programação e controle do sistema (TUBINO, 2000). Em outras palavras, para se usufruir de todos os ganhos advindos da divisão do trabalho e especialização, é necessário que haja coordenação entre as atividades produtivas.

Na literatura existem diversos entendimentos diferentes e complementares com relação ao PCP. Uma referência que oferece uma contribuição importante com relação aos principais autores do planejamento e controle da produção é Azeka (2003).

Contador e Contador (1997) ressaltam o papel do PCP de conexão com os demais setores da empresa, com os fornecedores e clientes, além naturalmente, do objetivo de comandar o processo produtivo e os serviços correlatos entre si. Esses mesmos autores, assim

como Corrêa e Giancesi (1997), tratam também de uma característica bastante discutida do PCP: a existência de fases hierarquizadas no processo decisório. Estes últimos, acrescentam ainda que um dos papéis do PCP é garantir adequação entre as decisões operacionais e as decisões ou necessidades estratégicas da organização.

Sipper e Bulfin (1997) apresentam o PCP como uma parte significativa da tecnologia de gerenciamento da produção, desempenhando a função de combinar os fluxos físicos e de informações para gerenciar o sistema de produção, relacionando-se com o ambiente externo e com o chão de fábrica. Esses autores salientam que as funções principais do PCP são estabelecer metas e medir desvios na produção, ou seja, a essência do PCP é gerenciar desvios enquanto mantém os objetivos consistentes com os da organização como um todo.

Stevenson *et al.* (2005) afirmam que as funções típicas de um sistema de PCP são planejamento das necessidades de materiais, gerenciamento da demanda, planejamento da capacidade, *scheduling* etc. Os propósitos-chaves destas funções são reduzir estoque em processo, minimizar os tempos de atravessamento (*throughput time*) e *lead times*, diminuir os custos de estoques, melhorar a responsividade a mudanças, melhorar a aderência das datas de entrega, dentre outros.

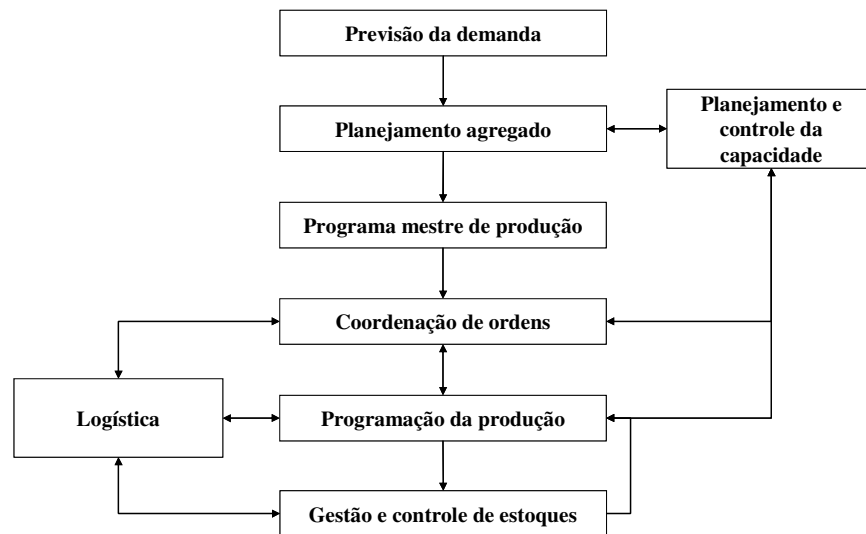
Muitos autores separam o PCP em Planejamento da Produção (PP) e Controle da Produção (CP), como, por exemplo, Corrêa *et al.* (2001) que argumentam que a necessidade de planejamento deriva da inércia intrínseca dos processos decisórios, ou seja, do tempo que necessariamente tem de decorrer desde que se toma determinada decisão até que ela tome efeito. Burbidge (1990) trata especificamente do CP, caracterizando-o como função gerencial que planeja, direciona e controla o suprimento de materiais e as atividades de processamento em uma empresa. É destacada ainda a relação estreita entre as funções do CP e as funções de compra, sendo que, em algumas indústrias, são tratadas como uma única função de gerenciamento de materiais. Vollmann *et al.* (2006) acrescentam que um controle de produção efetivo pode assegurar que a companhia atinja seus objetivos. Para Tubino (2000), o objetivo do CP é fornecer uma ligação entre o planejamento e a execução das atividades operacionais.

Nesta tese é adotada uma definição de PCP que congrega a visão de diversos autores da área (FERNANDES e GODINHO FILHO, 2010; CORRÊA *et al.*, 2001; PINEDO (2005); SILVER *et al.*, 1998; HOPP e SPEARMAN, 2008; SIPPER e BULFIN, 1997; e NAHMÍAS, 2009). Essa definição consiste em considerar o PCP como o conjunto das seguintes atividades: previsão, planejamento agregado, programação mestre da produção,



logística, coordenação de ordens, planejamento da capacidade, programação da produção (*scheduling*) e gestão e controle de estoques.

Essas atividades têm o objetivo geral de compatibilizar a demanda e a capacidade de produção, além de regular o fluxo de materiais, por meio de decisões em termos de o que produzir, comprar e entregar; quanto produzir, comprar e entregar; quando produzir, comprar e entregar; e quem e/ou onde e/ou como produzir. A figura 2.1 a seguir ilustra a hierarquia de relações entre essas atividades.



**FIGURA 2.1 – Atividades do planejamento e controle da produção**

Fonte: adaptado de Silver *et al.* (1998), Hopp e Spearman (2008) e Sipper e Bulfin (1997)

A previsão consiste em determinar informações sobre o futuro. No caso de um sistema produtivo, as previsões são principalmente a respeito das vendas. Para a realização dessas previsões podem ser utilizadas abordagens qualitativas e quantitativas. Maiores detalhes sobre sistemas de previsão podem ser obtidos em Makridakis (1998).

O planejamento agregado visa compatibilizar a taxa de produção com a taxa de demanda no médio prazo (de um a doze meses). Nesse horizonte de planejamento, as unidades são agregadas, ou seja, os produtos são agrupados em famílias e, assim, custos, capacidade e outras variáveis são tratadas globalmente.

A programação mestre da produção determina o quanto produzir e quando produzir em termos de produtos finais.

A logística planeja, implanta, e controla o fluxo de materiais direto e reverso entre o ponto de uso e o ponto de consumo, para atender às necessidades dos consumidores

(BALLOU, 2006). São funções típicas da logística a armazenagem e transporte de materiais dentro e fora do sistema produtivo.

A coordenação de ordens nada mais é do que uma sistematização da forma como as necessidades dadas em produtos finais, determinadas na programação mestre da produção, são convertidas em termos de itens e componentes, quais sejam, comprados ou fabricados internamente. Esta conversão é feita por meio da programação e/ou controle e/ou execução das ordens de produção e compra. Muitos são os sistemas que exercem essa função como, por exemplo, *Material Requirements Planning* (MRP), *kanban* e *Constant Work In Process* (ConWIP). Revisões sobre sistemas de coordenação de ordens podem ser vistas em Fernandes e Godinho Filho (2007), Lage Junior e Godinho Filho (2010) e Graves *et al* (1995).

O planejamento da capacidade é a atividade responsável por alterar o nível máximo de itens que o sistema produtivo pode produzir por período, no médio e longo prazo. Essa capacidade fornecida determinará se o sistema de produção poderá atender a uma determinada taxa de demanda e se haverá ou não ociosidade dos recursos produtivos. O controle da capacidade produtiva consiste em alterar o nível de capacidade no curto prazo, ou seja, dado o programa mestre de produção e/ou a programação da produção, compara-se a capacidade necessária com a capacidade disponível. Se a capacidade disponível for menor que a necessária, pequenos incrementos como, por exemplo, horas extras, devem ser providenciados, ou então, deve-se alterar o plano/programa de produção.

A programação da produção (*scheduling*) é a atividade que determina a alocação de tarefas em recursos produtivos. Ou seja, é a especificação do momento de início e término de cada tarefa em cada recurso para se obter as saídas desejadas nos momentos desejados. A literatura sobre *scheduling* é bastante vasta. Algumas revisões sobre o assunto podem ser vistas em Cheng e Sin (1990), Ernst *et al.* (2004), Allahverdi *et al.* (1999), Graves (1981) e Potts e Kovalyov (2000).

Por fim, a gestão e controle de estoques é a atividade que determina o que, quando, quanto pedir na forma de ordens, quanto manter de estoques de segurança, onde localizar esses estoques. Todas essas decisões têm influência principalmente nos custos e níveis de serviço ao consumidor. A literatura sobre gestão e controle de estoques é extensa, sendo alguns trabalhos que dão uma visão geral sobre o assunto Khouja (1999), Raafat (1991) e Silver *et al.* (1998).

## 2.3 A remanufatura

### 2.3.1 Conceituação básica

Antes de iniciar as definições relativas à remanufatura propriamente dita, é preciso fazer um esclarecimento. Na literatura é comum encontrar a denominação dos produtos manufaturados como “produtos novos” em contraste com os produtos remanufaturados. Nesta tese o autor não concorda com essa denominação, pois os produtos remanufaturados são novos também, embora tenham sido fabricados com aproveitamento de produtos usados. Isso se confirma pela definição da OMC, em que bens usados incluem reconicionados, reciclados, remoldados e de segunda-mão. Já bens remanufaturados são considerados equivalentes aos novos. Por isso, no presente trabalho, os produtos fabricados 100% a partir de matérias primas virgens são intitulados simplesmente com produtos manufaturados, e os produtos fabricados por processos de remanufatura, ou seja, a partir de produtos usados são intitulados produtos remanufaturados.

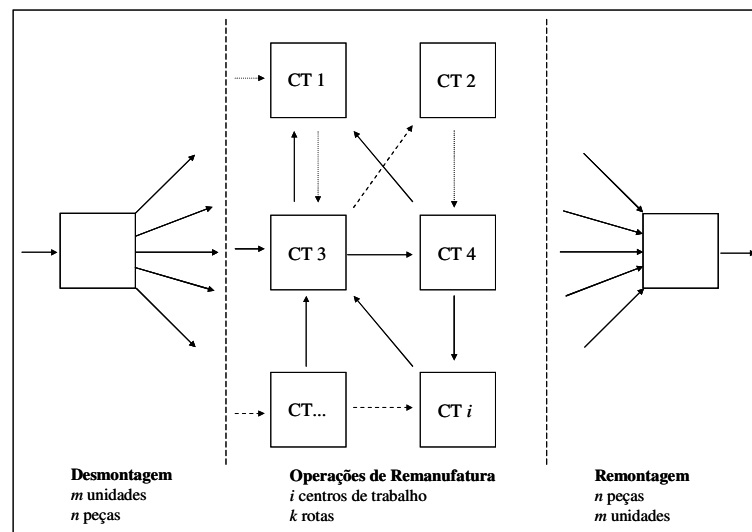
Em 2005, a Organização Mundial do Comércio (OMC) definiu por meio do documento TN/MA/W/18 o que é um produto remanufaturado. De acordo com esse documento, para ser considerado remanufaturado o produto deve passar por um processo industrial que o permita atender aos padrões técnicos ambientais e de segurança de um produto manufaturado. Além disso, esse produto deve receber da empresa responsável uma garantia de desempenho equivalente ao produto manufaturado. A definição precisa é a que segue:

*“Remanufacturing is the generic term that describes the process in which a recovered good, or core, is transformed through cleaning, testing, and other operations into a product that is tested and certified to meet technical and/or safety specifications and has a warranty similar to that of a new product. Different industries sometimes apply other terms, such as refurbishing, reconditioning, or rebuilding, to describe essentially the same process.”*  
(TN/MA/W/18/Add.11)

A remanufatura é definida ainda, por outros autores, como se segue. “Remanufatura é um processo industrial no qual produtos usados são restaurados a condição de novos” (LUND, 1983). Isso é feito por meio de uma série de processos que desmonta o produto, limpa e reforma algumas peças. O produto novo é remontado a partir dessas peças restauradas e eventualmente a partir de peças manufaturadas. Esses produtos remanufaturados

são equivalentes e às vezes superiores em desempenho em relação ao produto manufaturado. Essa superioridade é confirmada por outros autores, por exemplo, Ferrer e Ayres (2000) afirmam que defeitos que eventualmente existiam no produto originalmente manufaturado são eliminados. Já Sundin e Bras (2005) destacam que em várias etapas do processo são realizadas inspeções para assegurar que suas especificações atingem ou excedem as de um produto novo.

Segundo a *Environmental Protection Agency* (EPA) dos Estados Unidos da América, em essência, remanufaturar é “restaurar bens duráveis por meio da reposição de peças deterioradas ou gastas”. Isto é feito, primeiramente pela obtenção dos produtos usados. Após isso, esses produtos são completamente desmontados e inspecionados. As partes consideradas úteis são limpas, reformadas e estocadas. Por fim, produtos finais são (re)montados a partir dessas peças e, se necessário, com a utilização de peças manufaturadas. Dessa forma, a remanufatura recupera o valor agregado na forma de material, energia e trabalho que permanece nos produtos descartados. A figura 2.2, a seguir, ilustra os principais subsistemas de um processo de remanufatura.



**FIGURA 2.2 – Subsistemas principais de um processo de remanufatura**

Fonte: Guide *et al.* (2005)

O processo de desmontagem fornece as entradas (*inputs*) para os centros de trabalho (CT), na forma de materiais e informações, tais como: quantidade de peças a serem recuperadas, necessidade de compras de materiais, refugos, dentre outros. Clegg *et al.* (1994) constataram que a maioria das operações de desmontagem é feita manualmente. A automação somente é possível para produtos bastante padronizados e se a quantidade (volume) for alta.

Segundo Guide (2000) a desmontagem não é simplesmente a operação inversa da montagem, mesmo por que muitos produtos foram projetados para serem montados somente, ou seja, não havia previsão da necessidade de desmontá-los. Atualmente, ainda que incipiente, esta já é uma preocupação presente nos projetos de novos produtos.

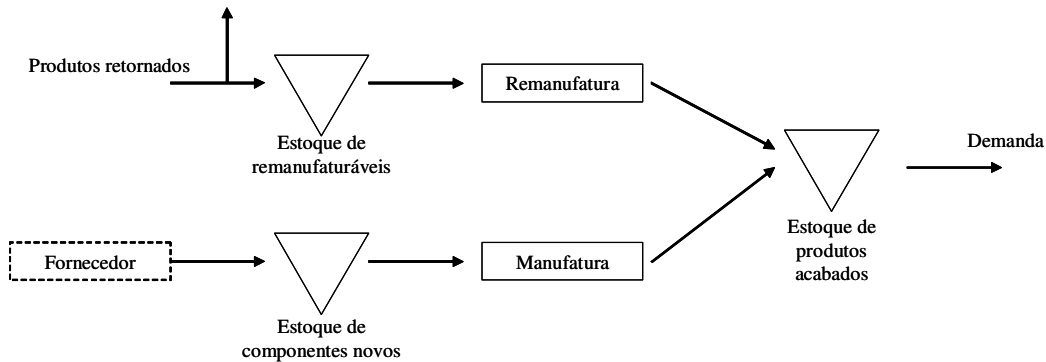
As operações de remanufatura propriamente dita consistem basicamente na inspeção, limpeza e reforma da peças por meio de operações como usinagem. Neste subsistema da remanufatura, as rotas, ou seja, as operações que deverão ser realizadas em cada uma das  $n$  peças são determinadas em função da condição de cada uma, sendo na maioria das vezes muito diferente mesmo para peças idênticas.

Por fim, as  $n$  peças recuperadas no processo de remanufatura são remontadas, formando  $m$  produtos finais remanufaturados. Dentre esses produtos finais, uma fração possui estritamente peças remanufaturadas outra fração possui tanto peças remanufaturadas como peças manufaturadas (nos casos em que a quantidade de peças remanufaturadas não forem suficientes).

A princípio, alguns produtos com mudanças tecnológicas rápidas podem parecer impróprios para a remanufatura. Isso é verdade se esse produto for revendido no mesmo mercado. No entanto, para mercados secundários, a remanufatura desse tipo de produto pode ser muito lucrativa como, por exemplo, a remanufatura de telefones móveis (celulares) na Europa para revenda na África do Sul (HERMANSSON e SUNDIN, 2005). Além desse aspecto, Lund (1998), em um esforço para fomentar a atividade de remanufatura, estabeleceu sete critérios da remanufaturabilidade:

- 1) o produto é um bem durável (hoje se sabe que pode ser descartável também, como por exemplo as câmeras de uso único da Kodak);
- 2) A funcionalidade do produto falhou;
- 3) o produto é padronizado e suas peças intercambiáveis (hoje se sabe que produtos customizados também fazem parte da indústria da remanufatura como, por exemplo, motores de aviões);
- 4) o valor agregado remanescente é alto;
- 5) o custo de se obter o produto de volta é pequeno em comparação ao valor agregado remanescente;
- 6) a tecnologia do produto é estável;
- 7) o consumidor está ciente de que existe esse produto sendo oferecido de forma remanufaturada.

Muitas empresas atuam somente com o processo de remanufatura. Outras empresas possuem a remanufatura como um processo paralelo ao da manufatura. Quando os dois processos coexistem na mesma planta industrial, o sistema é chamado híbrido. A figura 2.3 a seguir ilustra um sistema híbrido típico.



**FIGURA 2.3 – Sistema híbrido de manufatura e remanufatura**

Fonte: adaptado de Aras *et al.* (2006)

Nos casos de sistemas híbridos dois tipos de um mesmo produto (manufaturado e remanufatura) são oferecidos ao mercado, podendo ou não ser substitutos entre si. Na situação de substituição pode existir o conceito de *downward substitution*: o produto *i* pode ser substituído pelo produto *j*, mas o produto *j* não pode ser substituído pelo produto *i*. Exemplo: indústria de semicondutores. Circuitos de alta performance podem substituir circuitos de baixa performance, mas não vice-versa. Na remanufatura, geralmente os produtos manufaturados podem substituir os produtos remanufaturados, mas não o contrário.

Os principais produtos remanufaturados pelas indústrias são: copiadoras, *tonners* de impressoras, equipamentos médicos, autopeças, celulares, computadores, mobiliários, equipamentos de aviação, equipamento aeroespacial, equipamentos militares e pneus. As empresas responsáveis pela manufatura dos produtos são chamadas de *Original Equipment Manufacturer* (OEM). Alguns exemplos de remanufatura pelos próprios OEM são:

- a) Eastman Kodak e Fuji Film (câmeras descartáveis);
- b) Xerox (*tonners*);
- c) Fuji Xerox (fotocopiadoras);
- d) Electrolux (equipamentos de limpeza comercial);
- e) IBM e HP (computadores).

Alguns exemplos de remanufatura paralela (sem a participação dos OEMs):

- f) ENVIE (máquinas de lavar);
- g) ReUse Network (computadores pessoais);
- h) Teldon (acumuladores);
- i) Topp Companies (telefones sem fio, rádios);
- j) ReCellular e Greener Solutions (telefones móveis).

No caso das OEMs, diante das opções possíveis de ser remanufaturar internamente ou licenciar a operação, Darabă (2007) faz algumas observações. A integração da remanufatura com os OEMs tem as seguintes vantagens:

- a) obtenção das informações sobre a demanda e tecnologia;
- b) uso de recursos ótimos;
- c) obtenção do prestígio da companhia;
- d) conquista da confiança dos consumidores.

Já estabelecer uma companhia subsidiária para realizar a remanufatura tem as seguintes vantagens:

- a) mantém o prestígio da companhia em fabricar produtos manufaturados;
- b) acesso ilimitado às informações do produto;
- c) acesso a informações do mercado;
- d) manutenção da fidelidade dos consumidores.

As consequências para a externalização da atividade de remanufatura são a possibilidade da força de trabalho migrar para a remanufatura, o mercado da remanufatura pode ficar complexo, e o OEM pode perder o prestígio.

Existem também impedimentos legais para a atividade de remanufatura como, por exemplo, a proibição da divulgação de informações técnicas ou documentos de patente dos produtos. Além disso, algumas barreiras para a atividade de remanufatura são regulamentações sobre propriedade intelectual, regulamentações sobre procedimentos de reciclagem e falta de subsídios governamentais.

A remanufaturabilidade dos produtos é influenciada pelos fabricantes, devido à escolha dos materiais e da tecnologia de produção. Isso, porém, geralmente aumenta o custo de produção desses produtos (DEBO *et al.*, 2005). Um exemplo de empresa que investe na remanufaturabilidade de seus produtos é a Xerox. Segundo Debo *et al.* (2005), as questões chave a serem respondidas pelos fabricantes são:

- a) a oportunidade de alcançar outros consumidores supera os altos custos de se produzir um produto remanufaturável?

- b) quais são os direcionadores chave que determinam a lucratividade de se oferecer um *mix* de produtos manufaturados e remanufaturados?
- c) como os custos e percepções dos consumidores influenciam no valor da remanufaturabilidade?
- d) a decisão de remanufaturar depende do perfil dos consumidores?
- e) que estratégia de precificação e tecnologia de produção são mais adequados ao mercado alvo?

Em função de todas essas características singulares dos processos de remanufatura, esta possui claramente muitas diferenças em relação à manufatura convencional. Além disso, muitas empresas de remanufatura operam sob baixa visibilidade do público, e o resultado é que poucos consumidores ou mesmo empresas de manufatura sabem exatamente do que se trata a remanufatura.

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) criou em 2005, para distinguir os diversos tipos de produtos recuperados, a norma número 15296 que define os termos utilizados para peças de aplicação veicular da seguinte maneira:

- a) peça de produção original: destina-se à linha de montagem do veículo;
- b) peça de reposição original: destina-se à substituição da peça de produção original na reposição, fabricada com o mesmo processo e características técnicas, podendo ou não as mesmas especificações da peça de produção original e da peça de reposição original, mas garante a intercambialidade;
- c) peça remanufaturada: é aquela submetida ao processo de remanufatura pelo próprio fabricante ou por estabelecimento autorizado por ele;
- d) peça recondicionada: é a peça submetida a processo técnico ou industrial para ter restabelecidas suas funções; e
- e) peça recuperada: é a peça submetida a um processo artesanal.

Nesta definição da ABNT, diferentemente do que indica a literatura internacional, nota-se que a remanufatura somente deve ser feita pelo próprio fabricante ou por estabelecimento autorizado por ele. Na verdade, como mostram alguns pesquisadores (GUIDE *et al.*, 2000; SOLER, 2005; SEITZ, 2007; CHIU, 2008; IJOMAH, 2008; LI *et al.*, 2009) a maioria das empresas de remanufatura são independentes da OEM. Na verdade, existem três diferentes tipos de remanufaturadores: os próprios OEM, remanufaturadores independentes e remanufaturadores subcontratados (pelos OEM).



### 2.3.2 Outros conceitos relacionados

Vários são os conceitos relacionados ao tema remanufatura. Dentre esses, os principais são desenvolvimento sustentável, cadeia de suprimentos de ciclo fechado, logística reversa e projeto para o ambiente. Dessa forma, para que o tema principal desta tese fique bem delineado, nesta seção são tratados esses e outros conceitos e a relação com a remanufatura, porém de forma sucinta para não fugir do escopo da pesquisa.

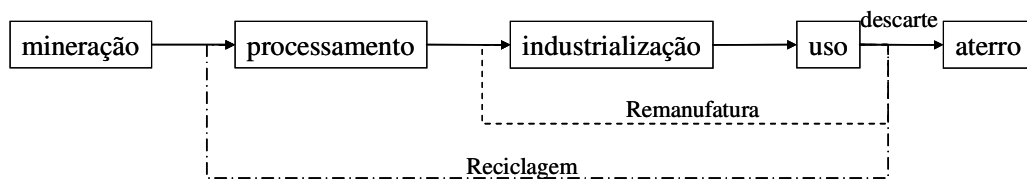
Desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento que atende às necessidades atuais sem comprometer a habilidade das gerações futuras em atender suas próprias necessidades (*World Commission of Environment and Development – WCED, 2009*). Dessa forma, a remanufatura auxilia efetivamente na sustentabilidade, uma vez que preserva energia e materiais. Uma avaliação de Giuntini e Gaudette (2003) mostra que se as empresas de bens de capital e as fábricas de automóveis produzissem 20% e 10%, respectivamente, de seus produtos remanufaturados, haveria de 5% a 10% de redução de consumo de energia em toda a cadeia produtiva nos EUA. Além disso, como destaca Ijomah (2008), a remanufatura pode reduzir a produção de gases como CO<sub>2</sub>, pois limita a produção de matérias-primas e subsequente processamento das peças e componentes. Contudo, para que a remanufatura seja uma atividade bem sucedida e promova esses benefícios é necessário, sobretudo, que os produtos sejam desenvolvidos para serem recuperáveis ou, em outras palavras, sejam projetados para o ambiente.

Um produto é projetado para o ambiente, ou *Design for Environment (DFE)*, se todas as atividades relacionadas ao processo de produção, uso e descarte são ambientalmente corretas. Em outras palavras, um produto não pode ser remanufaturado com sucesso a menos que seja fácil desmontá-lo, mantê-lo (manutenção) e repará-lo. Ferrer (2001) em sua pesquisa elabora as características de projeto importantes para esses casos:

- a) utilidade: módulos fáceis de serem desmontados podem facilmente serem reparados e substituídos;
- b) mudanças de projeto não-frequente: componentes e montagens de alto valor agregado tem projetos estáveis. Assim, quando o produto for coletado os módulos não serão obsoletos;
- c) modularidade: flexibilidade de projeto facilita a intercambialidade dos módulos.

A reciclagem faz parte dos conhecidos 3R's: reduzir o consumo de materiais e energia por meio do desenvolvimento de produtos e processos mais eficientes; reusar

produtos e componentes sempre que possível; e reciclar os materiais dos produtos usados que não podem ser reutilizados de outra maneira. Como sugere Ferrer (2001) a remanufatura representa a combinação dos 3Rs em uma única atividade, pois se trata do processo de fazer os produtos renovados com alguns componentes anteriormente usados. Na verdade, a remanufatura é diferente da reciclagem na medida em que a função do produto reusado é conservada. A figura 2.4 a seguir ilustra essa diferença.



**FIGURA 2.4 – Diferença entre a remanufatura e a reciclagem**

Fonte: adaptado de Dominguez (2005)

Neste ponto é necessário destacar as diferenças entre reciclar, reusar, reparar, recondicionar e reposicionar (CHIU, 2008):

- a) reciclar: retorna o produto as suas formas de matéria-prima, e sua identidade e funcionalidade não são preservados. A reciclagem é geralmente aplicada a produtos de consumo, como jornais, garrafas de vidro, peças de alumínio. Nesse sentido, a reciclagem destrói o valor agregado ao produto pelo processo de manufatura.
- b) reuso: é geralmente aplicado a produtos que foram usados previamente e que têm algum problema. É possível reutilizar produtos para as suas funções originais ou para outras funções.
- c) reparar: tem como objetivo restaurar um produto quebrado para novamente sua condição de funcionamento. Uma análise da causa da raiz do problema geralmente não é feita no processo de reparo, o que significa que o produto pode não exercer seu desempenho como um produto manufaturado. Tipicamente, um reparo é realizado somente em um ponto específico e não no produto inteiro. Dessa forma, a qualidade do produto reparado geralmente é menor do que de um produto manufaturado. O reparo no geral envolve a desmontagem parcial do produto.
- d) recondicionamento: restaura a funcionalidade do produto usado para uma condição de novo ou quase novo, ou então dentro de um nível de qualidade especificado, o qual geralmente é menor do que para o produto manufaturado. O processo de recondicionamento não envolve a desmontagem e limpeza de todos os componentes do produto. As submontagens são limpas, testadas e algumas peças são substituídas. Partes visíveis do produto são repintadas.

e) reposicionamento: na indústria automobilística, significa transformar um carro com direção no lado direito para um carro com direção no lado esquerdo.

Existe ainda o processo conhecido como *demanufacturing*, que corresponde a desmontar equipamentos para que seus componentes possam ser ou reciclados ou descartados apropriadamente.

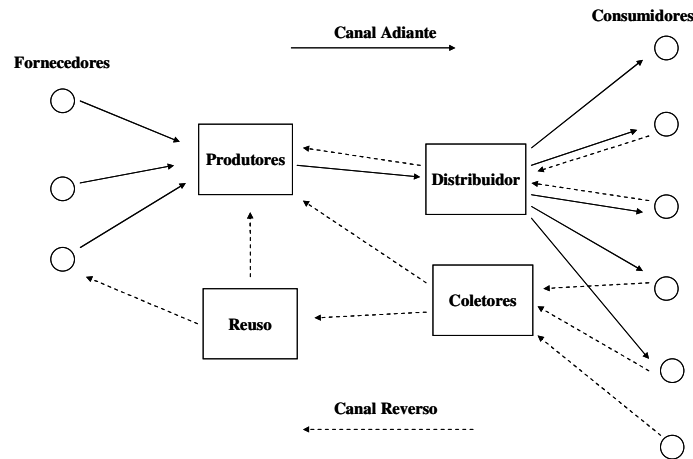
É importante destacar também que, em setores diferentes existem sinônimos para a remanufatura:

- a) reconstruir (*rebuilt*): motores e a subsistemas de automóveis;
- b) recarregar (*recharge*): cartuchos ou *tonners* de impressoras;
- c) recauchutar (*remoulding*): pneus;
- d) *rewinding*: equipamentos elétricos; e
- e) *overhaul*: aeroespacial.

Os produtos são chamados de *end-of-life* quando o reuso não é possível e o único jeito de recuperar seu valor é a reciclagem ou reusando seus componentes para aplicações com especificações menores como, por exemplo, *chips* de computadores serem usados em brinquedos eletrônicos. Por outro lado, *end-of-use* se referem às situações em que o usuário (consumidor) tem a oportunidade de retornar o produto em determinado estágio de vida útil do produto.

A remanufatura, sempre que possível, deve ser priorizada em relação à reciclagem. Além disso, ambos a reciclagem e a remanufatura dependem especialmente do fluxo reverso de produtos e materiais na cadeia de suprimentos. Esse fluxo reverso, como atividade, recebe o nome de logística reversa. A existência de fluxos adiante e reverso em uma cadeia de suprimentos caracterizam a chamada cadeia de suprimentos de ciclo fechado.

Segundo Dowlatsahi (2005), “logística reversa é o processo sistemático que gerencia o fluxo de produtos/peças do ponto de consumo de volta ao ponto de manufatura para possivelmente reciclar, remanufaturar ou descartar.” A figura 2.5 a seguir ilustra genericamente a estrutura um canal de distribuição reverso.



**FIGURA 2.5 – Estrutura genérica de um canal de distribuição reverso**

Fonte: Fleishmann *et al.* (1997)

A Cadeia de Suprimentos de Ciclo Fechado (CSCF) é projetada para considerar esse processo requerido pelo retorno de produtos, em adição aos processos tradicionais de fluxo adiante. Os processos adicionais são (GUIDE *et al.*, 2003):

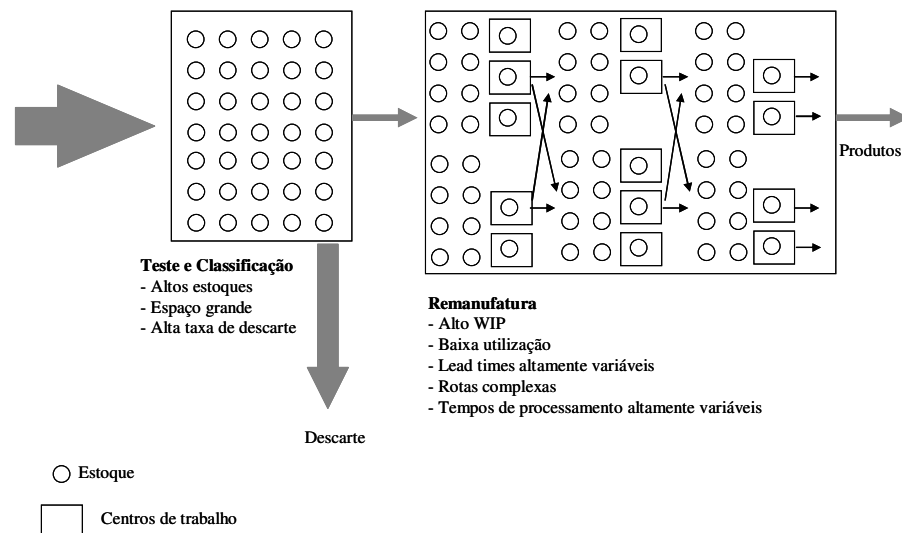
- a) aquisição de produtos: tarefa de reaver o produto usado;
- b) logística reversa: processo de planejamento, implantação e controle do fluxo de retorno e estocagem de produtos secundários e informações relacionadas em sentido contrário ao fluxo tradicional da cadeia de suprimentos com o propósito de recuperar o valor dos produtos ou descartar de maneira adequada;
- c) teste, classificação e descarte: testar e classificar os produtos retornados para dar destinos específicos como venda a sucatas, descarte em aterros etc.;
- d) reformar (*refurbish*): similar a recondicionamento, mas requer mais trabalho para reparar o produto;
- e) venda e redistribuição.

A gestão dessa cadeia recebe o nome de gestão da cadeia de suprimentos com ciclo fechado. Guide e Wassenhove (2009) definem a gestão da cadeia de suprimentos com ciclo fechado como sendo o projeto, controle e operacionalização de um sistema para maximizar a criação de valor ao longo de todo o ciclo de vida de um produto com recuperação dinâmica do valor de diferentes tipos e volumes de retornos ao longo do tempo. Nesse sentido otimizar o ciclo de vida do produto significa que o produto é usado mais eficientemente durante seu ciclo de vida, o que é facilitado pelo recondicionamento e pela remanufatura. Assim, a melhor maneira de otimizar o ciclo de vida dos produtos é projetá-los para serem remanufaturados.

Uma pergunta recorrente na literatura é por que não combinar a logística com a logística reversa? Ferrer e Whybark (2000) respondem que raramente o sistema de logística atende às necessidades da logística reversa. Geralmente, a distribuição para frente é projetada para lidar com grandes volumes do mesmo produto para entrega em poucos clientes. Na logística reversa o *mix* de produtos pode variar bastante, com o volume de alguns deles bastante reduzidos. Além disso, pode haver muito mais locais para retirar os produtos usados do que locais para entrega de manufaturados e o destino final dos produtos coletados nem sempre é o OEM. No entanto, como ressaltam Fleishmann *et al.* (1997), para fins de planejamento, os fluxos direto e reverso devem ser considerados simultaneamente.

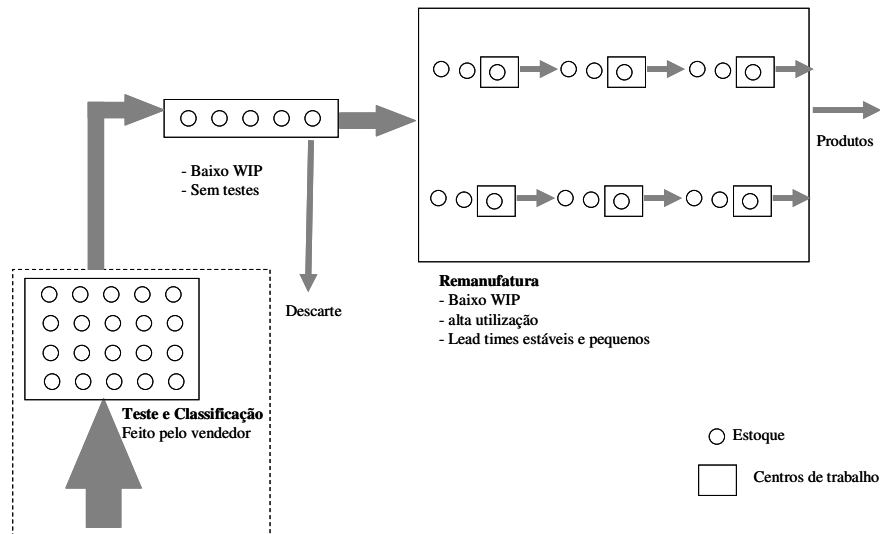
Com relação aos sistemas de obtenção de produtos usados, Guide e Wassenhove (2001) apontam que existem basicamente dois:

- a) sistema da corrente de descarte: a coleta é realizada em aterros pelos próprios fabricantes;
- b) sistema dirigido ao mercado: existem incentivos financeiros para motivar os consumidores a retornar os produtos usados (sistemas de depósito, crédito na compra de produtos manufaturados ou pagamento em dinheiro por produtos em bom estado). Esse tipo de sistema geralmente é utilizado para produtos de alto valor. As figuras 2.6 e 2.7 abaixo ilustram esses sistemas.



**FIGURA 2.6 – Sistema da corrente de descarte**

**Fonte: Guide e Wassenhove (2001)**



**FIGURA 2.7 – Sistema dirigido ao mercado**

Fonte: Guide e Wassenhove (2001)

Neste ambiente, *residence time* ou tempo de residência é o tempo que o produto permanece com o usuário (consumidor) antes de retornar. Quanto maior a taxa de residência (ou seja, menor o tempo de residência e maior o tamanho do ciclo de vida do produto), mais lucrativo é remanufaturar. Um exemplo de produto com alta taxa de residência é a câmera fotográfica descartável.

As características do sistema da corrente de descarte são: baixa qualidade, alta variabilidade das condições de qualidade, quantidade e tempo. É necessário reservar um espaço da planta para armazenar e classificar os produtos retornados. Geralmente há uma grande quantidade de produtos descartados (não remanufaturáveis). As consequências operacionais dessas características são: altas variabilidades de rotas e tempos de processamento, grandes filas nos centros de processamento, *lead times* imprevisíveis e baixa taxa de produção. Assim, os custos operacionais tendem a ser maiores.

As características do sistema dirigido ao mercado são: os produtos são armazenados e classificados antes de entrar na planta produtiva. Assim, o estado de qualidade mínima é assegurado antes de o produto alcançar a remanufatura. As consequências operacionais dessas características são: baixos estoques em processo, baixa taxa de descarte, redução da variabilidade dos tempos de processamento e rotas em função do alto nível de qualidade dos produtos. Assim, tem-se filas menores nos centros de trabalho, melhor utilização dos recursos e tempos de fluxo mais previsíveis. A taxa de produção tende a ser maior e os custos operacionais menores. Nesse ambiente, é possível a roteirização padronizada.

Empresas tipicamente capazes de remanufaturar são OEM, fornecedores, lojas de manutenção e parte das companhias de reciclagem. Essas empresas têm em comum o acesso aos produtos e componentes que potencialmente tem valor para justificar seu reuso. Para Chiotellis *et al.* (2008), quatro questões são fundamentais para se decidir se devem ou não remanufaturar:

- a) qual a extensão de atividades de remanufatura deve-se incorporar?
- b) quais processos específicos são capazes de serem realizados?
- c) quanto investimento é necessário para oferecer remanufaturados de qualidade?
- d) quais são os custos específicos e lucros esperados quando a remanufatura estiver em operação?

Além desses aspectos, Atasu *et al.* (2008) mostram que as decisões estratégicas na remanufatura são balizadas por fatores como:

- a) competição: a remanufatura é mais rentável sob competição, em relação ao monopólio. Por exemplo, a Bosh Tools somente remanufatura quando a fatia de mercado é pequena. Os produtos remanufaturados capturam a demanda dos segmentos “verdes” de mercado;
- b) ciclo de vida do produto (restrição de suprimento): no caso de vendas crescentes e baixa disponibilidade de produtos usados não se deve remanufaturar. Ou seja, deve-se escolher bem o momento para introdução do produto remanufaturado. O mercado consumidor deve ser suficientemente pequeno para haver compatibilidade entre demanda e suprimento e suficientemente grande para maximizar as vendas.

Hermansson e Sundin (2005) acrescentam ainda que a estrutura organizacional de uma remanufatura seja formada por dois aspectos.

- a) aspectos físicos;
  - fluxo de produtos usados: é determinante para que a remanufatura seja possível. É muito variável e depende do tipo de produto,
  - peças de alto valor: para o produto ser remanufaturado deve existir um interesse tanto da empresa como do consumidor, ou seja, deve ser economicamente benéfico para ambos. Isso deve ser bem divulgado no mercado,
  - fornecedores: deve-se ter uma visão de longo prazo para os retornos,
  - logística: pesquisas indicam que as empresas de remanufatura estão utilizando um ponto central de coleta. Isso deve exigir grande organização das empresas envolvidas,
  - terceirização: as empresas devem alinhar suas perspectivas com as empresas que prestem serviços a elas (*outsourcing*),

- consumidores: atualmente muitos consumidores fazem questão de comprar produtos com apelo ambiental, o que torna a remanufatura mais competitiva,
- b) aspectos não-físicos;
  - empregados: os processos da remanufatura geralmente são intensivos em mão-de-obra. Um bom planejamento deve ser feito para garantir a quantidade e formação necessária,
  - competência/habilidade: os engenheiros devem estar preparados para trabalhar com produtos remanufaturados. A empresa deve continuamente investir em educação e treinamento. Os tomadores de decisão devem ser flexíveis para lidar com as incertezas inerentes,
  - responsabilidade: deve ser transmitida com vigor para todos na empresa a respeito do papel da remanufatura no desenvolvimento sustentável,
  - liderança: é sempre necessária sob o aspecto de confiança e motivação. Entrevistas realizadas pelos autores mostram que não existem diferenças entre um líder na remanufatura e um líder no OEM.

Por fim, é preciso ainda definir os conceitos de *core*, taxa de recuperação de materiais, *yield* e *seed stock*.

*Core* é o nome dado ao produto recuperado após o uso pelo consumidor. Esse produto usado também é, muitas vezes, chamado de *carcass* ou carcaça. Thierry *et al.* (1995) exemplificam os tipos mais comuns de retorno de produtos: obrigação por lei ou contrato, produtos alugados, e produtos com falhas técnicas.

Três outros conceitos associados aos *cores* são a taxa de recuperação dos materiais, ou *Material Recovery Rate* (MRR), *yield* das operações e *seed stock*.

Taxa de recuperação dos materiais é a frequência com que os materiais recuperados de um *core* são remanufaturáveis. O MRR é usado para determinar lotes de compra e remanufatura e exerce um papel importante em sistemas MRP (*Material Requirements Planning*). Além disso, o MRR está intimamente ligado à característica específica da remanufatura de ) incerteza quanto à taxa de recuperação dos materiais que compõem os produtos retornados.

*Seed stock* são produtos que falharam nas especificações dos fabricantes na planta de manufatura e que foram comprados por remanufuradores como *cores*.

*Yield* é a porcentagem de produtos retornados que resultam em peças boas após as operações de desmontagem ou de remanufatura.



### 2.3.3 Importância da remanufatura

Giuntini e Gaudette (2003) afirmam que a remanufatura representa um dos maiores recursos não usados para melhorar a produtividade na indústria. Segundo esses autores, a produtividade é determinada pela relação entre o *output* produzido e o *input* utilizado (materiais e trabalho). Em função disso, o principal foco nos negócios para aumentar a produtividade tem sido reduzir o trabalho por meio da automação, tecnologia, ciência e técnicas de gestão. Esses esforços aumentaram em cerca de 300% a produtividade nos últimos 50 anos. No entanto, a produtividade relacionada aos materiais é um conceito relativamente novo.

A reciclagem tem sido muito praticada, mas limitada a produtos simples como papel e metais como, por exemplo, o alumínio. Isso porque reciclar produtos complexos como um automóvel resultaria na perda de mais de 95% do conteúdo de seu valor agregado. Ainda mais, segundo Govetto (2008) a remanufatura consome cerca de 40% menos energia que a reciclagem. Portanto, a remanufatura conserva não somente o material contido no produto, mas também o valor agregado durante o processo de fabricação (GIUNTINI e GAUDETTE, 2003).

Ferrer e Ayres (2000) afirmam ainda que uma vantagem da remanufatura é que muitos defeitos que eventualmente existiam no produto originalmente manufaturado são eliminados. Por outro lado, os componentes secundários irão acumular fadigas (desgastes microscópicos que gradualmente comprometem o desempenho do produto). Contudo, a redução da expectativa de vida útil de componentes não-críticos frequentemente não afeta a expectativa de vida útil do produto como um todo. É isso que torna a remanufatura tecnicamente viável.

Domínguez (2005) salienta que a remanufatura apresenta quatro beneficiários diretos:

- a) os negócios: redução dos custos de produção;
- b) os consumidores: preços menores;
- c) o ambiente: redução do consumo de materiais (15 % menor em relação à manufatura, segundo Kerr (2001)) e energia (50% a 80% menores em relação à manufatura, segundo Horzomi, 1997); e
- d) força de trabalho: a remanufatura é intensiva em mão-de-obra.

Ainda segundo este autor, a remanufatura é uma grande oportunidade para se quebrar o padrão de consumo linear, mostrado na figura 2.8 a seguir.



**FIGURA 2.8 – Padrão de consumo linear**

Fonte: adaptado de Dominguez (2005)

Giuntini e Gaudette (2003) acrescentam ainda outros benefícios da expansão da atividade de remanufatura:

a) para o ambiente de negócios;

- redução de custos ao se obter produtos mais baratos,
- os OEM podem aumentar seus lucros vendendo produtos remanufaturados,
- manufatura de equipamentos de teste e limpeza (típicos da remanufatura) podem aumentar suas vendas,
- as operações híbridas (remanufatura e manufatura) podem adquirir maior estabilidade e crescimento,
- empresas de tecnologia da informação (TI) podem desenvolver sistemas apropriados para a remanufatura,
- consultorias seriam desenvolvidas para atender as remanufaturas,
- fornecedores de softwares de projeto/engenharia podem desenvolver sistemas direcionados para a remanufatura,
- empresas de serviço financeiro podem aumentar seus empréstimos/créditos para novas empresas de remanufatura,
- empresas de logística podem se desenvolver para atuar na logística reversa necessária na remanufatura,

b) para a força de trabalho;

- maior satisfação dos trabalhadores pois o trabalho na remanufatura é dinâmico,
- aumento da demanda por trabalhadores afastados ou aposentados para prover experiência na desmontagem e remontagem de produtos que eles mesmos produziram há anos atrás,

c) para os consumidores;

- produtos com preços de 30% a 40% menores,
- maior possibilidade de escolha,

d) para a sociedade;

- redução do volume de energia em 15% e de recursos materiais necessários,
- custos de 40% a 65% menores,
- redução da emissão de CO<sub>2</sub> em 28 milhões de toneladas anuais (nos EUA).

Outro fator que torna a remanufatura importante é que, segundo Aronson (2003), muitas empresas têm eliminado ou reduzido serviços internos de manutenção, o que significa que a recuperação de máquinas e equipamentos tem de ser feitas por outras empresas.

Portanto, a remanufatura é um novo modelo de negócios que complementa o ciclo de vida dos produtos, gera empregos em diferentes níveis de qualificação e produz novos fluxos de investimentos. Isso tudo gera a importância dessa atividade industrial.

### **2.3.4 As diferenças entre manufatura e remanufatura**

As atividades do PCP na remanufatura podem se diferenciar bastante das mesmas atividades na manufatura. As principais características complicadoras das atividades do PCP na remanufatura são, de acordo com Guide *et al.* (1999), Guide (2000), Gungor e Gupta (1999), Ferrer e Whybark (2001), entre outros:

- a) incerteza quanto à quantidade e momento de retorno: a quantidade de produtos que retornam e o momento de retorno são fatores que não podem ser controlados pelas empresas remanufatureiras. Esta característica é principalmente devida a fatores como estágio do ciclo de vida dos produtos e a taxa de mudança tecnológica;
- b) necessidade de balancear o retorno dos produtos com a demanda: pode haver excesso de peças, quando a demanda por determinado produto for menor que a quantidade retornada do mesmo, e por outro, pode haver baixo nível de serviço ao consumidor, se a demanda for maior que a quantidade retornada. Em alguns casos, atividades extras como troca de peças sobressalentes entre remanufaturas são práticas comuns. Esses problemas são intensificados nas situações dos sistemas híbridos, em que as prioridades e objetivos de desempenho podem ser conflitantes entre a manufatura e a remanufatura;
- c) necessidade de desmontar os produtos retornados: antes de iniciar qualquer outra operação de beneficiamento, a remanufatura exige que sejam desmontados os produtos retornados. Esta

característica torna-se ainda mais importante quando se trata de produtos que não foram projetados para serem desmontados, o que ocorre na maioria dos casos. É importante salientar que a desmontagem não é simplesmente a operação inversa da montagem, o que muitas vezes dificulta estas operações;

d) incerteza quanto à taxa de recuperação dos materiais: dois produtos que retornam para serem desmontados, aparentemente idênticos (aparência externa) podem possuir um conjunto completamente diferente de peças em condições adequadas para serem reaproveitadas. Essa característica indica o grau de aproveitamento das peças que compõem os produtos retornados, o que pode ser totalmente diferente mesmo entre dois *cores* iguais. Como resultado tem-se peças que poderão ser remanufaturadas, ou então descartadas, ou então revendidas ou recicladas;

e) necessidade de uma rede de logística reversa: trata-se da determinação de como os produtos serão coletados e transportados até a operação, envolvendo um conjunto de decisões paralelas tais como número de centros de coleta e método/frequência de transportes;

f) necessidade de rastreamento ao longo do processo: alguns produtos como, por exemplo, dispositivos eletrônicos da indústria aeronáutica possuem números de série controlados, e dessa forma, ao retornarem para a remanufatura devem ser remontados com a mesma combinação anterior. Isso exige um controle do fluxo de peças extremamente rigoroso e preciso;

g) alta variabilidade dos tempos de processamento: essa característica é outra consequência das diferentes e incertas condições das peças retornadas, pois dois produtos idênticos podem precisar de um grau diferente de tratamento em cada operação de remanufatura; e

h) roteiros estocásticos: é também uma consequência das diferentes condições dos retornos, pois peças iguais que estejam em condições de qualidade diferentes podem requerer quantidades e tipos diferentes de processos para serem recuperadas.

A seguir são descritos os principais efeitos de cada uma das características específicas da remanufatura no PCP.

A incerteza com relação à quantidade e momento de retorno torna complexas as atividades do PCP porque quanto e quando os produtos usados retornarão são uma das principais informações necessárias para a tomada de decisão. Portanto, a previsão dos momentos de chegada e quantidades de *cores* (previsão), o estabelecimento de o quanto e quando produzir de cada família de produtos (plano agregado) e de quanto e quando produzir de cada produto final (programa mestre), a elaboração dos planos de armazenagem, transporte, distribuição, etc. (logística), a definição das necessidades de materiais e a emissão

das ordens de produção e compra (coordenação de ordens), o estabelecimento da capacidade de desmontagem (planejamento da capacidade), a determinação da sequência e o início e término das tarefas nas operações de desmontagem (*scheduling*), e a escolha dos tamanhos de lotes, níveis máximos e mínimos de estoque, periodicidade de controle, etc. (gestão e controle de estoques) dependem diretamente da quantidade e momento de retorno, que é uma variável aleatória.

A necessidade de balancear o retorno dos produtos com a demanda complica as atividades do PCP porque a incompatibilidade entre a quantidade retornada e a quantidade demandada é uma variável adicional nas decisões que influenciam a determinação dos níveis de estoque, proporção de peças manufaturadas nos produtos remanufaturados e níveis de serviço ao consumidor. Consequentemente, essa característica tem grande impacto na lucratividade da atividade de remanufatura. A previsão da demanda e da quantidade retornada (previsão), a geração de planos agregados (plano agregado) e planos desagregados (programa mestre) estão sujeitos a incertezas. A armazenagem, transporte, e distribuição (logística) devem ser rigorosos; a emissão e controle das ordens devem ser precisos (coordenação de ordens) e re-emissão de ordens são frequentes; altas taxas de retorno exigem alta capacidade nas operações de recebimento e desmontagem e altas taxas de demanda exigem alta capacidade nas operações de remontagem (planejamento da capacidade); a programação das tarefas (*scheduling*) depende simultaneamente da quantidade demandada e da quantidade retornada, e quando essas quantidades são diferentes há a necessidade de incluir a programação de operações de manufatura, se a operação for híbrida; e a determinação do tamanho dos lotes, dos níveis de estoque em processo, níveis de estoque de produtos finais, níveis de estoque de peças novas, etc. (gestão e controle de estoques) dependem fundamentalmente e simultaneamente das quantidades retornadas e demandadas.

A necessidade de desmontar os produtos retornados aumenta a complexidade das atividades do PCP porque a desmontagem é uma atividade adicional (em relação à manufatura) que precisa ser planejada, controlada e rigorosamente coordenada com as demais atividades do processo, pois é a principal fonte das informações para a tomada de decisão ao longo do processo. As previsões de médio prazo e curto prazo das quantidades a serem reaproveitadas nas operações de desmontagem (previsão), a elaboração de planos de desmontagem de famílias de produtos (plano agregado) e planos de desmontagem de produtos finais (programa mestre) para atender a demanda e/ou a carteira de pedidos, a armazenagem, transporte e distribuição das peças desmontadas (logística), a coordenação com as operações de remanufatura e remontagem (coordenação de ordens), a dificuldade de se prever quantos

produtos devem ser desmontados para se obter certa quantidade de peças em condições de serem reaproveitadas (planejamento da capacidade), a elaboração da programação das operações de desmontagem (*scheduling*), e a determinação do tamanho dos lotes, níveis de ressuprimento, periodicidade de reposição, etc. (gestão e controle de estoques) devem ser realizados em uma operação de remanufatura com processos de desmontagem.

A incerteza quanto à taxa de recuperação dos materiais que compõem os produtos retornados dificulta as atividades do PCP porque a quantidade disponível de cada uma das peças que fazem parte do produto final, assim como das quantidades a serem descartadas e vendidas como refugo, são umas das principais informações para a tomada de decisão. Assim, a previsão das quantidades de peças disponíveis (previsão), a definição das quantidades de produtos a serem desmontados e remanufurados e remontados (plano agregado e programa mestre), a determinação das quantidades armazenadas e transportadas entre os subsistemas (logística), a emissão das ordens de produção e compra de itens, além da emissão de ordens de descarte (coordenação de ordens), a definição da força de trabalho na desmontagem e remanufatura (planejamento da capacidade), as datas início e término da recuperação dos materiais (*scheduling*) e escolha do tamanho dos lotes e níveis de estoque (gestão e controle de estoques), todas dependem dessa variável estocástica.

A necessidade de uma rede de logística reversa aumenta a dificuldade em se realizar as atividades do PCP porque é uma atividade adicional (em relação à manufatura) que precisa ser planejada, controlada e coordenada com as demais atividades. A previsão da quantidade de *cores* disponíveis na rede de obtenção de produtos usados (previsão), a determinação do plano de aquisição de famílias de produtos usados (plano agregado), a definição da quantidade de produtos finais a ser adquirida na rede reversa (programa mestre), a integração entre as atividades de logística e logística reversa (logística), a emissão das ordens de compra na rede reversa (coordenação de ordens), a escolha dos níveis de capacidade da rede reversa (planejamento da capacidade), as programações de coleta e entrega de produtos na rede reversa (*scheduling*), e a determinação dos tamanhos de lotes de aquisição, transporte e quantidades estocadas na rede reversa (gestão e controle de estoques), são todas decisões que devem ser tomadas na remanufatura com uma rede de logística reversa.

A necessidade de rastreamento ao longo do processo de remanufatura torna complexas as atividades do PCP porque se trata também de uma atividade adicional (em relação à manufatura) e que deve ser gerenciada. A atividade de previsão de itens novos e usados para compor os produtos finais (previsão) deve obedecer à restrição de somente

utilizar para cada produto peças e componentes únicos; o plano de famílias de produtos (plano agregado) deve considerar a desmontagem, remanufatura e remontagem de produtos que não devem ter suas peças intercambiadas; a definição da quantidade e momentos de produção de cada produto final (programa mestre) é restringida pela necessidade de se obter as peças e componentes remanufaturados pertencentes a cada produto final; a armazenagem e transporte (logística) devem ser cuidadosamente realizados, utilizando-se formas de identificação e rastreamento rigorosos das peças para manter a combinação inicial dos produtos; as ordens de produção e compra (coordenação de ordens) devem estar intimamente ligadas e coordenadas com a necessidade de manter a combinação das peças; além disso, é preciso que as ordens coordenem os três subsistemas de maneira bastante precisa para evitar atrasos nas entregas; a utilização da mão de obra e sistemas de informação manuais como utilização de etiquetas exigem grandes alterações de capacidade ao longo do processo, que sofre “ondas” de aumento e posterior diminuição conforme as operações passam através da desmontagem, remanufatura e remontagem (planejamento da capacidade); a programação (*scheduling*) está restrita ao processamento de peças e componentes que devem seguir rigorosamente ao longo do processo de maneira coordenada para garantir menores *leadtimes* e atendimento das datas de entrega; e a determinação dos tamanhos dos lotes, níveis de estoque e ressuprimento (gestão e controle de estoques) estão subordinados a restrição das combinações das peças ao longo de todo o processo.

A alta variabilidade dos tempos de processamento complica as atividades do PCP porque a tomada de decisão depende profundamente dos tempos necessários de preparação (*setup*) e processamento, ambos variáveis aleatórias. A atividade de previsão do momento da disponibilidade de peças recuperadas para serem remontadas (previsão), a determinação de quando as famílias de produtos devem ser desmontadas, remanufaturadas ou remontadas (plano agregado), a determinação de o quanto e quando desmontar, remanufaturar e remontar de produtos finais (programa mestre), as questões concernentes à armazenagem, transporte e distribuição (logística), a emissão das ordens é dependente da formação de lotes e essa formação dos lotes pode variar muito (coordenação de ordens), a utilização de recursos, principalmente humanos (planejamento da capacidade), a elaboração e cumprimento dos programas (*scheduling*), e a determinação dos níveis de estoque e momentos de ressuprimento (gestão e controle de estoques), todas essas decisões devem ter como um dos parâmetros os tempos de início e término dos processamentos nos recursos produtivos.

Os roteiros estocásticos tornam complexas as atividades do PCP porque a variabilidade dos roteiros exige muito replanejamento e surgimento de gargalos diferentes em

momentos diferentes. Dessa forma, a previsão dos momentos de disponibilidade de recursos (previsão), a elaboração do planejamento agregado (planejamento agregado), a determinação das quantidades desmontadas (programa mestre), a armazenagem e datas de transporte das peças (logística), a emissão das ordens (coordenação de ordens), a determinação do nível de mão de obra em função do surgimento de gargalos diferentes em momentos diferentes (planejamento da capacidade), a programação sujeita às necessidades incertas de cada peça (*scheduling*), e a gestão das peças e lotes (gestão e controle de estoques), todos estão intimamente ligados às necessidades individuais de cada peça.

Neste ponto faz-se necessário definir o conceito de incerteza, que é abordada em várias passagens nesta seção. Incerteza é definida como sendo a “diferença entre a quantidade de informações necessárias para se realizar uma tarefa e a quantidade de informações já obtida” (GALBRAITH, 1973). As fontes de incerteza na manufatura são do ambiente (demanda e suprimento) e do próprio processo (*lead time*, qualidade, taxa de produção, quebras de máquinas etc.). Na literatura, é reconhecido que é impossível remover totalmente essas incertezas da cadeia de suprimentos. Assim, Mula *et al.* (2006) defendem que “modelos de planejamento da produção que não consideram as incertezas podem gerar decisões inferiores em comparação a modelos que levam em consideração explicitamente as incertezas.”

Devido às características complexas da remanufatura existe a necessidade clara de um bom desempenho das atividades de PCP nestes ambientes. Para muitos pesquisadores o problema básico neste contexto de remanufatura é coordenar efetivamente os três subsistemas (figura 2.2), sendo as principais variáveis de decisão o quanto e quando desmontar, remanufaturar, produzir e/ou comprar novas peças, produtos e materiais.

Por fim, é preciso deixar claro que para ter sucesso na remanufatura, além de lidar com todas as dificuldades, a empresa deve ter uma série de capacidades corporativas, habilidades organizacionais e áreas de mercado conscientes (FERRER e WHYBARK, 2000).

### **2.3.5 A Remanufatura de Autopeças**

Segundo Chiu (2008), a remanufatura de autopeças nos Estados Unidos começou na época de Henry Ford, nos anos 30, que remanufaturou muitos motores após a



“grande depressão”. Desde então, várias companhias reconheceram e capitalizaram esta oportunidade. Mais do que isso, atualmente fabricantes de veículos automotores estão tentando cada vez mais melhorar a reciclabilidade dos seus veículos.

De acordo com Ferrer e Whybark (2001) muitos componentes remanufaturados de carros vêm de pequenas empresas que têm passado na indústria de corridas de automóveis. Os carros de corrida possuem componentes muito caros e muitas vezes exclusivos que requerem muita especialização para desmontar e reparar. Para apoiar essa indústria uma parte dessas firmas fazia a reconstrução completa de motores. Assim, segundo estes mesmos autores, era uma progressão natural para algumas dessas firmas adicionar a atividade de remanufatura de automóveis de passageiros. A partir disso surgiram dois grupos de empresas: i) especializadas em componentes complexos como motores e sistemas de transmissão. Suas plantas se caracterizam como *job-shops* com baixa repetitividade de tarefas; ii) especializadas em itens menos complexos como alternadores e motores de partida. Estas plantas produzem em lotes com muitas tarefas repetitivas.

A indústria da remanufatura obteve um aumento muito significativo durante a segunda guerra mundial. Naquela época, muitas empresas de manufatura mudaram suas operações para produzir produtos militares, e seus produtos originais tiveram de ser remanufaturados para suprir a sociedade.

Segundo o Sindinesfa (Sindicato do Comércio Atacadista de Sucata Ferrosa e Não-Ferrosa), somente 1,5% da frota brasileira de automóveis que sai de circulação vai para a reciclagem. Já em outros países, em especial os europeus a reciclagem chega a patamares muito superiores. Giuntini e Gaudette (2003) revelam que na Europa, em 2002 não mais do que 15% de peças de veículos podiam ser descartados e em 2015 esse valor deve cair para 5%.

O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de veículos, ônibus urbanos e caminhões. O Setor de autopeças é igualmente expressivo. Existem cerca de 500 empresas associadas ao Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores com faturamento da ordem de 36 bilhões de dólares e empregando aproximadamente 217 mil trabalhadores (SINDIPEÇAS, 2008). A importância deste setor pode ser demonstrada ainda pela participação de montadoras e fabricantes de autopeças no Produto Interno Bruto (PIB) em cerca de 5,4%.

Com relação à remanufatura de autopeças no Brasil, este ainda é um setor de atuação industrial com pouca representatividade em comparação a outros países como os Estados Unidos e Alemanha, porém demonstra um crescimento significativo nos últimos

anos. Em parte, a legislações exigentes quanto às questões ambientais são as responsáveis por esses números significativos nesses países.

Recentemente, a Secretaria de Comércio Exterior (SECEX), vinculada ao Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC), tem realizado esforços para elaboração de um projeto regulamentar sobre a importação de produtos usados e remanufaturados. Um passo importante foi dado na direção da regulamentação deste mercado no país pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) pela criação da norma número 15296:2005 (seção 2.3).

Outra iniciativa bastante importante partiu do Sindicato de Remanufaturamento, Recondicionamento e/ou Retífica de Motores e seus Agregados e Periféricos (SINDIMOTOR) que apresentou ao governo do Estado de São Paulo o “Programa de Incentivo à Remanufatura de Peças Automotivas e Retífica de Motores”. Tal programa visa obter apoio estadual para o setor, no que diz respeito ao tratamento fiscal diferenciado e abertura de linhas especiais de crédito (APAREM, 2008).

O principal grupo de remanufatura de autopeças no Brasil é Associação Nacional dos Remanufuradores de Autopeças (ANRAP). Esta associação é formada por cinco grandes OEMs:

- a) Cummins: motores e componentes de motores;
- b) Sachs: embreagens;
- c) TRW: sistemas de direção;
- d) Luk: embreagens;
- e) Knorr-Bremse: sistemas de freios.

Essas empresas, juntas, criaram um selo, o selo ANRAP, para certificação dos seus produtos remanufaturados. Além disso, promovem a divulgação da linha de produtos remanufaturados ao mercado automotivo como um todo.

Todas essas constatações demonstram que a remanufatura de autopeças é um campo de atuação com expansão promissora nos próximos anos. Com isso, o presente trabalho pretende fornecer contribuições e resultados que serão muito demandados nos próximos anos, por praticantes e pesquisadores.

## 2.4 Programação dinâmica

A programação dinâmica é uma técnica particularmente utilizada para modelar uma sequência de decisões inter-relacionadas, fornecendo um procedimento para determinar a combinação de decisões ótimas. Segundo Hillier e Lieberman (2010), na programação dinâmica começa-se com uma pequena parte do problema original e encontra-se a solução ótima para esse problema menor. A seguir, vai-se aumentando gradualmente o problema, encontrando a solução ótima atual a partir da anterior, até que o problema original seja resolvido em sua totalidade.

As principais características dos problemas de programação dinâmica são (HILLIER e LIEBERMAN, 2010; TAHA, 2008; COLIN, 2007):

- a) o problema pode ser dividido em estágios, nos quais uma decisão é necessária;
- b) cada estágio possui estados associados ao seu início. Em geral, esses estados são as diversas condições possíveis nas quais o sistema poderia se encontrar;
- c) o efeito da decisão a ser adotada em cada estágio é o de transformar o estado atual em um estado associado ao início do estágio seguinte;
- d) a resolução é desenhada para encontrar uma política ótima para o problema como um todo estendendo a fórmula de decisão em cada estágio para cada um dos estados possíveis;
- e) dado o estado atual, uma política ótima para os estágios restantes é independente das decisões sobre as políticas adotadas nos estágios anteriores. Isto é conhecido como princípio da otimalidade.

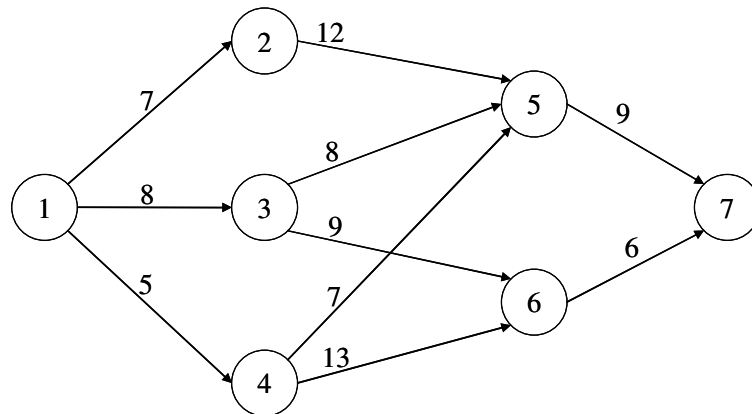
Como o estado é a informação que liga os estágios, os cálculos em programação dinâmica são feitos recursivamente, de modo que a solução ótima de um subproblema é usada como dado de entrada para o subproblema seguinte. Quando o último subproblema é resolvido, a solução ótima para o problema inteiro é obtida.

Colin (2007) afirma que não existe uma formulação padrão para problemas de programação dinâmica. Por isso, a literatura normalmente apresenta essa técnica por meio de exemplos ilustrativos. Dessa forma, a seguir são apresentados dois exemplos numéricos de problemas típicos de programação dinâmica. O primeiro é um problema de programação dinâmica determinística e o segundo é um problema de programação dinâmica probabilística.

### 2.4.1 Exemplo numérico de programação dinâmica determinística

O problema a seguir foi retirado de Taha (2008, p. 178), mas formas semelhantes podem ser encontradas em diversos livros sobre o assunto, pois consiste em um exemplo típico utilizado para apresentar a programação dinâmica.

Suponha que se deseja selecionar o caminho mais curto entre duas cidades. A figura 2.9 apresenta os possíveis caminhos entre a cidade de origem 1 e a cidade destino 7.

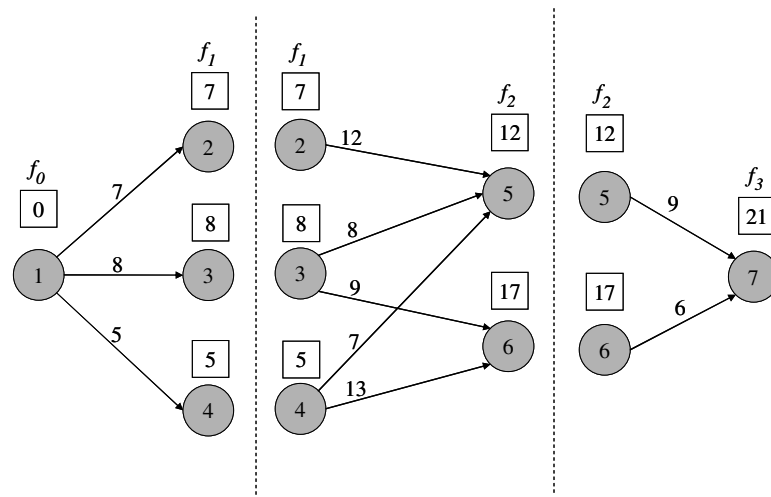


**FIGURA 2.9 – Rede de cidades**

Fonte: Taha (2008, p. 178)

Os círculos numerados de 1 a 7 representam as cidades, as setas representam os possíveis caminhos entre as cidades e os números próximos às setas as distâncias (km) dos respectivos caminhos.

Para resolver o problema utilizando programação dinâmica, primeiramente é preciso decompô-lo em estágios, conforme ilustrado pelas linhas verticais tracejadas na figura 2.10.



**FIGURA 2.10 – Decomposição do problema em estágios**

Fonte: Taha (2008, p. 178)

Assim, têm-se três estágios: o primeiro representa a saída da primeira cidade e chegada na segunda cidade; o segundo representa a saída da segunda cidade e chegada na terceira cidade; e o terceiro representa a saída da terceira cidade e chegada na quarta e última cidade. O procedimento para determinar o caminho mais curto consiste em calcular as distâncias mais curtas *cumulativas* até todos os nós terminais de um estágio e depois usar essas distâncias como dado de entrada para o estágio imediatamente subsequente.

Começando do nó (cidade) 1, o estágio 1 inclui três nós finais (cidades 2, 3 e 4) e os cálculos são os seguintes:

- distância mais curta do nó 1 ao nó 2 = 7 km
- distância mais curta do nó 1 ao nó 3 = 8 km
- distância mais curta do nó 1 ao nó 4 = 5 km

Note que o estado atual é a cidade em que se parte e o estado futuro é a cidade em que se deve chegar. Esse estado futuro depende do caminho que se escolhe (decisão) e tem como consequência uma distância a ser percorrida.

Em seguida, o estágio 2 possui dois nós terminais (5 e 6). Começando pelo nó 5, tem-se que se pode alcançá-lo a partir de 3 nós, por três caminhos diferentes (2-5, 3-5 e 4-5). Essa informação juntamente com as distâncias mais curtas até os nós 2, 3 e 4 determina a distância mais curta cumulativa até o nó 5 da seguinte maneira:

$$\left( \begin{array}{l} \text{Distância mais} \\ \text{curta até o nó 5} \end{array} \right) = \min_{i=2,3,4} \left\{ \left( \begin{array}{l} \text{Distância mais} \\ \text{curta até o nó } i \end{array} \right) + \left( \begin{array}{l} \text{Distância do} \\ \text{nó } i \text{ ao nó 5} \end{array} \right) \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} 7 + 12 = 19 \\ 8 + 8 = 16 \\ 5 + 7 = 12 \end{array} \right\} = 12$$

Já o nó 6 pode ser alcançado a partir dos nós 3 e 4. Assim:

$$\left( \begin{array}{l} \text{Distância mais} \\ \text{curta até o nó 6} \end{array} \right) = \underset{i=3,4}{\text{mín}} \left\{ \left( \begin{array}{l} \text{Distância mais} \\ \text{curta até o nó } i \end{array} \right) + \left( \begin{array}{l} \text{Distância do} \\ \text{nó } i \text{ ao nó 6} \end{array} \right) \right\} = \underset{\left\{ \begin{array}{l} 8+9=17 \\ 5+13=18 \end{array} \right\}}{\text{mín}} = 17$$

Portanto, o caminho mais curto do nó 1 ao nó 5 é 12 km (a partir do nó 4) e o caminho mais curto do nó 1 ao nó 6 é 17 km (a partir do nó 3).

Por fim, no estágio 3, o nó de destino 7 pode ser alcançado partindo-se dos nós 5 ou 6. Usando-se os resultados do estágio 2 e as distâncias dos nós 5 e 6 ao nó 7, tem-se:

$$\left( \begin{array}{l} \text{Distância mais} \\ \text{curta até o nó 7} \end{array} \right) = \underset{i=5,6}{\text{mín}} \left\{ \left( \begin{array}{l} \text{Distância mais} \\ \text{curta até o nó } i \end{array} \right) + \left( \begin{array}{l} \text{Distância do} \\ \text{nó } i \text{ ao nó 7} \end{array} \right) \right\} = \underset{\left\{ \begin{array}{l} 12+9=21 \\ 17+6=23 \end{array} \right\}}{\text{mín}} = 21$$

Concluí-se, assim, que a distância mais curta entre os nós 1 e 7 é 21 km, sendo o caminho mais curto 1-4-5-7.

Os cálculos recursivos do exemplo podem ser expressos matematicamente da seguinte maneira: seja  $f_i(x_i)$  a distância mais curta até o nó  $x_i$  no estágio  $i$ , e defina-se  $d(x_{i-1}, x_i)$  como a distância do nó  $x_{i-1}$  ao nó  $x_i$ ; então,  $f_i$  é calculada por  $f_{i-1}$  usando a seguinte equação recursiva:

$$f_i(x_i) = \underset{\substack{\text{todas as rotas} \\ (x_{i-1}, x_i) \text{ viáveis}}}{\text{mín}} \{d(x_{i-1}, x_i) + f_{i-1}(x_{i-1})\}, i = 1, 2, 3$$

Começando em  $i=1$ , a recursão faz  $f_0(x_0)=0$ . A equação mostra que as distâncias  $f_i(x_i)$  mais curtas no estágio  $i$  devem ser expressas em termos do próximo nó,  $x_i$ , que corresponde ao estado do sistema no estágio  $i$ .

No exemplo anterior foi utilizada a recursão progressiva, ou seja, os cálculos prosseguiram do estágio 1 ao estágio 3. No entanto, na prática da programação dinâmica o mais comum é a recursão regressiva (TAHA, 2008), ou seja, do estágio 3 ao estágio 1, em função da maior eficiência em termos de cálculos necessários que esse tipo de recursão apresenta. A seguir é mostrada a solução com recursão regressiva e também com um formato de cálculo tabular.

No estágio 3, como o nó 7 ( $x_4 = 7$ ) está conectado aos nós 5 e 6 ( $x_3 = 5$  e 6) com um único caminho cada, não há nenhuma alternativa a escolher. Os resultados são mostrados na tabela 2.1 a seguir.

$d(x_3, x_4)$		Solução ótima	
$x_3$	$x_4 = 7$	$f_3^*(x_3)$	$x_4^*$
5	9	9	7
6	6	6	7

**TABELA 2.1 – Decisão no estágio 3**

O resultado ótimo é representado pelo asterisco, ou seja, a mínima distância entre o estado  $x_3$  e o estado seguinte  $x_4$  é igual a 9, se  $x_3=5$ , e igual a 6, se  $x_3=6$ , que corresponde à escolha ótima de ir para  $x_4=7$ , em ambos.

No estágio 2, os cálculos são dados pela tabela 2.2 a seguir.

$x_2$	$d(x_2, x_3) + f_3(x_3)$		Solução ótima	
	$x_3 = 5$	$x_3 = 6$	$f_2^*(x_2)$	$x_3^*$
2	12+9=21	-	21	5
3	8+9=17	9+6=15	15	6
4	7+9=16	13+6=19	16	5

**TABELA 2.2 – Decisão no estágio 2**

A solução ótima do estágio 2 é a seguinte: se estiver nas cidades 2 ou 4, o caminho mais curto passa pela cidade 5 e se estiver na cidade 3, o caminho mais curto passa pela cidade 6.

No estágio 1, a partir do nó 1 têm-se três alternativas: 2, 3 ou 4. Usando  $f_2(x_2)$  do estágio 2, pode-se calcular a tabela 2.3 a seguir.

$x_1$	$d(x_1, x_2) + f_2(x_2)$			Solução ótima	
	$x_2 = 2$	$x_2 = 3$	$x_2 = 4$	$f_1^*(x_1)$	$x_2^*$
1	7+21=28	8+15=23	5+16=21	21	4

**TABELA 2.3 – Decisão no estágio 1**

Com isso, concluí-se que o caminho ótimo (menor caminho) entre as cidades 1 e 7 é dado por 1–4–5–7.

### 2.4.2 Exemplo numérico de programação dinâmica probabilística

A programação dinâmica probabilística (ou estocástica) difere da determinística pelo fato de o estado no estágio seguinte não ser completamente determinado pelo estado e pela decisão a ser adotada no estágio atual. Em vez disso, há uma distribuição probabilística para qual deva ser o estado seguinte (HASTINGS, 1973; ROSS, 1983). Ainda assim, essa distribuição é completamente determinada pelo estado e pela decisão a ser adotada no estágio atual. Nesses casos, há a necessidade de se basear o critério de otimização no valor esperado.

O exemplo numérico a seguir foi retirado de Smith (1991, p. 93) para servir como ilustração do uso da programação dinâmica para problemas probabilísticos.

Considere o seguinte jogo utilizando um dado de seis faces equiprováveis: pode-se lançar o dado até três vezes. Ao verificar o valor da face de cima do dado após o primeiro lançamento,  $X_1$ , a pessoa deve decidir se deseja lançar o dado novamente. Se a pessoa decidir parar, então lhe será pago o valor R\$  $X_1$ . Se a pessoa lançar o dado pela segunda vez, o resultado será  $X_2$ , e a pessoa deve decidir se continua ou não, com uma recompensa de R\$  $X_2$  caso decida parar. Se a pessoa lançar o dado pela terceira vez, o resultado será  $X_3$  e a pessoa receberá R\$  $X_3$ . De acordo com essa descrição, para se jogar da melhor maneira possível deve-se ter o objetivo de maximizar a recompensa esperada. Após cada lançamento a pessoa lida com a seguinte decisão: continuar ou parar? Assim, o problema possui três estágios, com seis estados (pois  $X_i$  pode assumir os valores 1, 2, 3, ..., 6, com  $i=1, 2, 3$ ).

Seja  $f_n^*(X_n)$  o valor esperado da recompensa seguindo uma política ótima, obtida no  $n$ -ésimo lançamento do dado, quando o resultado obtido é  $X_n$ .  $f_n^*$  é uma variável aleatória, pois depende de  $X_n$ , portanto possui uma distribuição de probabilidade e valor esperado  $E(f_n^*)$ .  $f_n^*(X_n)$  pode assumir dois valores:  $X_n$  se a pessoa parar e  $E(f_{n+1}^*)$  se a pessoa continuar. Assim:

$$f_n^*(X_n) = \max(X_n, E(f_{n+1}^*)), \quad \text{com } E(f_4^*) \text{ definido como sendo 0 (condição limitante).}$$



Começando pelo terceiro estágio, a melhor política será determinada pela solução da seguinte equação:

$$f_3^*(X_3) = \max(X_3, 0)$$

Que resulta em:

$$f_3^*(X_3) = X_3$$

Assim  $f_3^*$  possui seis resultados equiprováveis, e seu o valor esperado será:

$$E(f_3^*) = \frac{1+2+3+4+5+6}{6} = 3,5$$

Com essa informação pode-se passar para a segunda decisão (estágio 2), quando  $X_2$  é mostrado. A solução é dada por:

$$f_2^*(X_2) = \max(X_2, E(f_3^*)) = \max(X_2, 3,5)$$

Assim, a solução ótima, se o segundo lançamento for feito, é parar se o resultado do segundo lançamento for 4, 5 ou 6 e continuar se for 1, 2 ou 3. Com isso, o valor esperado será:

$$E(f_2^*) = \frac{3,5(3)}{6} + \frac{4}{6} + \frac{5}{6} + \frac{6}{6} = 4,25$$

Passando para o primeiro estágio (primeiro lançamento), quando  $X_1$  é obtido, a recompensa segundo uma política ótima é calculada por:

$$f_1^*(X_1) = \max(X_1, E(f_2^*)) = \max(X_1, 4,25)$$

A solução é semelhante à anterior: se o valor obtido no primeiro lançamento for 1, 2, 3 ou 4, se deve continuar o jogo, pois se espera ganhar R\$4,25 fazendo-se isso. Se a face obtida for 5 ou 6, então se deve parar. O valor esperado no primeiro estágio é dado por:

$$E(f_1^*) = \frac{4,25(4)}{6} + \frac{5}{6} + \frac{6}{6} = 4,667$$

### 2.4.3 Considerações sobre a programação dinâmica

A programação dinâmica resulta em grandes economias em termos de processamento quando comparada à enumeração exaustiva (HILLIER e LIEBERMAN, 2010), além de ser uma técnica bastante versátil, podendo ser utilizada para resolver

problemas com variáveis inteiras ou contínuas, problemas lineares ou não-lineares, horizonte de decisão finito ou infinito, problemas determinísticos ou estocásticos (COLIN, 2007). No entanto, se o número de variáveis de estado for grande, o número de cálculos necessários também o será em virtude do número de combinações possíveis dessas variáveis, o que pode comprometer a tratabilidade do problema. Esse fenômeno é conhecido na literatura como maldição da dimensionalidade (BERTSEKAS, 2000) e considerado como uma das principais restrições de sua aplicação (SILVA FILHO e CEZARINO, 2010).

A natureza dos cálculos em programação dinâmica impossibilita o desenvolvimento de um código geral de computador que possa lidar com todos os tipos de problemas. Isso explica a ausência de *softwares* comerciais para essa técnica (TAHA, 2007).

A programação dinâmica tratada nos exemplos é do tipo com um número finito de estágios. Um tipo genérico de modelo para programação dinâmica probabilística em que os estágios continuam a recorrer indefinidamente é conhecido como processos de decisão de Markov.

### 3 O PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO PARA A REMANUFATURA: REVISÃO E ANÁLISE DA LITERATURA

#### 3.1 Introdução

No futuro, poucos produtos serão descartados antes de seu potencial de reuso, remanufatura e reciclagem ser totalmente explorado (DOWLATSHAHI, 2005). Remanufatura é o processo de recuperação do valor de produtos usados pela reposição de componentes ou re-processamento das peças usadas para trazer o produto de volta a sua condição de novo (ATASU *et al.*, 2008). Nesse processo, o Planejamento e Controle da Produção (PCP) tem papel fundamental, pois é o conjunto das atividades de planejamento e controle de todos os aspectos da produção como gerenciamento de materiais, programação das máquinas e pessoas e da coordenação de fornecedores e clientes chave (VOLLMANN *et al.*, 2004)

Guide (2000), por meio de uma revisão bibliográfica, pesquisou o que a literatura (até o ano 2000) trazia a respeito de métodos e ferramentas para a realização de algumas das principais atividades do PCP (previsão, logística, *scheduling* e gestão e controle de estoques) na remanufatura, levando em conta essas características específicas da remanufatura. A partir dessa revisão, esse autor propôs o quadro 3.1, o qual mostra até que ponto as características específicas da remanufatura foram tratadas em pesquisas a respeito de algumas das principais atividades do PCP na remanufatura até o ano 2000. As células marcadas com “**v**” indicam que havia estudos relacionando a respectiva atividade do PCP (coluna) e a respectiva característica específica da remanufatura (linha).

Característica específica da remanufatura	Atividade do PCP			
	Previsão	Logística	<i>Scheduling</i> /Controle do chão de fábrica	Gestão e controle de estoques
A) Incerteza quanto à quantidade e momento de retorno	✓	✓	✓	✓
B) Necessidade de balancear o retorno dos produtos com a demanda				✓
C) Necessidade de desmontar os produtos retornados			✓	✓
D) Incerteza quanto à taxa de recuperação dos materiais			✓	✓
E) Necessidade de uma rede de logística reversa		✓		✓
F) Necessidade de rastreamento ao longo do processo			✓	
G) Alta variabilidade dos tempos de processamento			✓	
H) Roteiros estocásticos			✓	

**QUADRO 3.1 – Características específicas da remanufatura tratadas em pesquisas relativas a algumas das principais atividades do PCP**

**Fonte: Adaptado de Guide (2000)**

A partir desse resultado, o presente capítulo tem o objetivo de verificar até que ponto as áreas em branco mostradas no quadro 3.1 foram tratadas pelas pesquisas publicadas na literatura entre 2000 e 2009. Em outras palavras, esse capítulo visa verificar se as lacunas existentes até o ano 2000 com relação às principais características específicas da remanufatura quando da realização de pesquisas em PCP foram preenchidas nesses dez últimos anos.

Para esse fim, esse capítulo apresenta uma revisão de 76 artigos e propõe uma classificação da literatura sobre o PCP na remanufatura entre os anos de 2000 e 2009. Após isso, é realizada uma análise comparativa dessa literatura com a revisão anteriormente realizada por Guide (2000). Na presente pesquisa foram utilizadas as bases de dados Compendex, Emerald, Scholar Google, Scirus e Scopus, sendo que as palavras chave utilizadas foram *remanufacturing* e *production planning and control*.

Dessa forma, o presente capítulo está estruturado da seguinte maneira: a seção 3.2 traz o sistema de classificação proposto no presente trabalho. Esse sistema de classificação foi elaborado em função da revisão realizada. Na seção 3.3 é apresentada a revisão bibliográfica propriamente dita (a qual contempla 76 artigos científicos que tratam especificamente do PCP na remanufatura) devidamente estruturada de acordo com o sistema de classificação proposto. Na seção 3.4 são realizadas as análises referentes aos artigos revisados. Na seção 3.5 é feita uma comparação entre a análise da literatura fornecida por

Guide (2000) e as análises realizadas neste trabalho. E, por fim, na seção 3.6 são tecidas as considerações finais.

### 3.2 O sistema de classificação proposto

Nesse trabalho é proposto um sistema de classificação da literatura revisada segundo quatro critérios:

- a) atividade do PCP focada no trabalho: nesse ponto é identificada no artigo revisado qual atividade do PCP é tratada. A fim de possibilitar uma visão um pouco mais abrangente das atividades do PCP e para seguir a notação encontrada em livros específicos da área como Vollmann *et al.* (2004) e Sipper e Bulfin (1997), as atividades do PCP foram divididas em previsão, planejamento agregado, programação mestre, logística, coordenação de ordens, planejamento da capacidade, *scheduling* e gestão e controle de estoques;
- b) características específicas da remanufatura contempladas no estudo: nesse caso, é avaliado se o trabalho revisado considera ou não cada uma das características específicas, conforme Guide (2000);
- c) subsistema da remanufatura estudado ou focado: aqui o objetivo é identificar qual subsistema ou quais subsistemas são abordados em cada um dos artigos. Como mostrado no capítulo 2, os subsistemas da remanufatura são logística reversa, desmontagem, remanufatura e remontagem;
- d) tipo de pesquisa: nesse ponto, o objetivo é identificar o tipo principal de pesquisa usado no artigo. As diferentes categorias identificadas foram baseadas na classificação de Mula *et al.* (2006): estudo de caso, modelos baseados em inteligência artificial (lógica *fuzzy*, algoritmos genéticos), modelos analíticos (programação linear, programação inteira-mista, programação não-linear, programação dinâmica, modelagem de Markov, modelo do vendedor de jornais, modelagem determinística, transformação de Laplace), e modelos de simulação (simulação discreta, métodos heurísticos, teoria de filas, dinâmica de sistemas, modelagem de redes, distribuições de probabilidade).

De acordo com esses critérios, os artigos revisados foram classificados segundo o quadro 3.2 a seguir. A primeira coluna indica o artigo. A segunda coluna especifica a(s) atividade(s) do PCP tratada(s) em cada um dos artigos. Na terceira coluna estão listadas

as características específicas da remanufatura presentes nos artigos, codificadas de acordo com o estabelecido na seção 3.1. A quarta coluna mostra quais são os subsistemas da remanufatura abordados em cada uma das pesquisas. A quinta coluna mostra o tipo de pesquisa utilizado.

Artigo	Atividade do PCP	Características específicas da remanufatura	Subsistemas	Tipo de pesquisa
Bhattacharya <i>et al.</i> (2006)	Previsão Gestão e controle de estoques	B, E	logística reversa e remanufatura	Programação dinâmica
Liang <i>et al.</i> (2009)	Previsão	B, E	logística reversa e remanufatura	Programação não-linear
Maples <i>et al.</i> (2005)	Previsão	A, B, D	remanufatura	Estudo de caso
Geyer <i>et al.</i> (2007)	Planejamento agregado	A, B, D, E	logística reversa e remanufatura	Método heurístico
Depuy <i>et al.</i> (2007)	Programa mestre de produção	B, C, D, G	desmontagem, remanufatura e remontagem	Estudo de caso
Ferguson <i>et al.</i> (2007)	Programa mestre de produção	C, D	remanufatura	Programação linear
Gharbi <i>et al.</i> (2008)	Programa mestre de produção Gestão e controle de estoques	B, C, D, G	remanufatura	Modelagem de redes
Golany <i>et al.</i> (2001)	Planejamento agregado	B	remanufatura	Programação linear
Grubbstrom e Tang (2006)	Programa mestre de produção	B, C	desmontagem, remanufatura e remontagem	Programação não-linear
Li <i>et al.</i> (2006)	Programa mestre de produção Gestão e controle de estoques	A, B	remanufatura	Programação dinâmica
Li <i>et al.</i> (2007)	Programa mestre de produção Gestão e controle de estoques	B	remanufatura	Algoritmo genético
Lim e Sim (2005)	Programa mestre de produção	B, C	desmontagem e remontagem	Algoritmo genético
Nakashima e Gupta (2003)	Programa mestre de produção Gestão e controle de estoques	B, E	remanufatura	Modelagem de Markov
Robotis <i>et al.</i> (2005)	Programa mestre de produção Gestão e controle de estoques	B, D, E	logística reversa e remanufatura	Modelo do vendedor de jornais
Rubio e Corominas (2008)	Programa mestre de produção Planejamento da capacidade	B	remanufatura	Programação linear
Souza <i>et al.</i> (2002)	Programa mestre de produção <i>Scheduling</i>	B, C, D, G	desmontagem e remanufatura	Teoria de filas
Souza e Ketzenberg (2002)	Programa mestre de produção	A, B, C, D, G	desmontagem, remanufatura e remontagem	Teoria de filas
Zikopoulos e Tagaras (2008)	Programa mestre de produção Gestão e controle de estoques	A, B, C, D, E	logística reversa, desmontagem e remanufatura	Programação linear
Lee <i>et al.</i> (2009)	Logística	B, C, D, E, H	logística reversa, desmontagem e remanufatura	Algoritmo genético
Ferrer e Whybark (2001)	Coordenação das ordens	A, B, C, D, E, G, H	Todos	Programação linear
Nakashima <i>et al.</i> (2004)	Coordenação das ordens	B	Remanufatura	Modelagem de Markov

Li <i>et al.</i> (2009)	Coordenação das ordens <i>Scheduling</i>	A, B	Remanufatura	Algoritmo genético
Franke <i>et al.</i> (2006)	Planejamento da capacidade	A, B, C, D, E, G, H	Todos	Simulação
Georgiadis <i>et al.</i> (2006)	Planejamento da capacidade	A, B, E	logística reversa e remanufatura	Dinâmica de sistemas
Vlachos <i>et al.</i> (2007)	Planejamento da capacidade	A, B, D, E	logística reversa e remanufatura	Dinâmica de sistemas
Chiotellis <i>et al.</i> (2008)	<i>Scheduling</i>	B, C, H	Todos	Programação inteira-mista
Guide <i>et al.</i> (2005)	<i>Scheduling</i>	B, C, E, F, G	Todos	Teoria de filas
Hou e Zhang (2005)	<i>Scheduling</i>	B, C, G	desmontagem, remanufatura e remontagem	Modelagem de Markov
Hunter e Black (2007)	<i>Scheduling</i> Gestão e controle de estoques	C, D, F, G	desmontagem, remanufatura e remontagem	Estudo de caso
Stanfield <i>et al.</i> (2006)	<i>Scheduling</i>	G	Remanufatura	Método heurístico
Teunter <i>et al.</i> (2008)	<i>Scheduling</i>	B	Remanufatura	Programação inteira-mista
Teunter <i>et al.</i> (2009)	<i>Scheduling</i>	B	Remanufatura	Programação inteira-mista
Aksoy e Gupta (2001)	Planejamento da capacidade Gestão e controle de estoques	A, B, C, D, G	desmontagem, remanufatura e remontagem	Teoria de filas
Aksoy e Gupta (2004)	Gestão e controle de estoques	A, D, E, G	desmontagem, remanufatura e remontagem	Teoria de filas
Aksoy e Gupta (2005)	Gestão e controle de estoques	A, B, D, G	desmontagem, remanufatura e remontagem	Teoria de filas
Aras <i>et al.</i> (2004)	Gestão e controle de estoques	A, B, C, D, G	desmontagem e remanufatura	Modelagem de Markov
Aras <i>et al.</i> (2006)	Gestão e controle de estoques	A, B, D	Remanufatura	Simulação discreta
Bayindir <i>et al.</i> (2003)	Gestão e controle de estoques	0	desmontagem e remanufatura	Teoria de filas
Behret e Korugan (2009)	Gestão e controle de estoques	A, B, C, D, E, G	Todos	Simulação discreta
Berthaut <i>et al.</i> (2009)	Gestão e controle de estoques	A, B	remanufatura	Programação linear Modelagem de redes
Çorbacioglu e van der Laan (2007)	Gestão e controle de estoques	D	Remanufatura	Programação linear
Decroix (2006)	Gestão e controle de estoques	A, B, E	logística reversa e remanufatura	Programação dinâmica
Ferrer e Ketzenberg (2004)	Gestão e controle de estoques	B, C, D	desmontagem e remanufatura	Modelagem de Markov
Galbreth e Blackburn (2006)	Gestão e controle de estoques	B, D, E	logística reversa	Programação linear Modelo do vendedor de jornais
Inderfurth (2004)	Gestão e controle de estoques	A, B, D, G	Remanufatura	Modelo do vendedor de jornais
Inderfurth (2005)	Gestão e controle de estoques	A, B, D, E	logística reversa e remanufatura	Programação dinâmica
Inderfurth e van der Laan (2001)	Gestão e controle de estoques	A, B	Remanufatura	Programação dinâmica

Kiesmüller (2003)	Gestão e controle de estoques	A, B	Remanufatura	Programação linear
Kiesmüller e van der Laan (2001)	Gestão e controle de estoques	A, B, D	Remanufatura	Modelagem de Markov
Kleber <i>et al.</i> (2002)	Gestão e controle de estoques	B, D	Remanufatura	Programação dinâmica
Konstantaras e Papachristos (2007)	Gestão e controle de estoques	B	Remanufatura	Programação inteira
Konstantaras e Papachristos (2008)	Gestão e controle de estoques	B	Remanufatura	Programação linear
Mahadevan <i>et al.</i> (2003)	Gestão e controle de estoques	A, B	Remanufatura	Método heurístico
Minner e Kleber (2001)	Gestão e controle de estoques	B	Remanufatura	Programação dinâmica
Ouyang e Zhu (2008)	Gestão e controle de estoques	A, B, G	Remanufatura	Método heurístico
Pan <i>et al.</i> (2009)	Gestão e controle de estoques	B	Remanufatura	Programação dinâmica
Richter e Sombrutzki (2000)	Gestão e controle de estoques	B	Remanufatura	Programação dinâmica
Richter e Weber (2001)	Gestão e controle de estoques	B	Remanufatura	Programação dinâmica
Roy <i>et al.</i> (2009)	Gestão e controle de estoques	B	Remanufatura	Algoritmo genético Lógica fuzzy
Saadany e Jaber (2009)	Gestão e controle de estoques	A, B, D	Remanufatura	Modelagem determinística
Sun <i>et al.</i> (2006)	Gestão e controle de estoques	A, B, E	logística reversa e remanufatura	Modelagem de Markov
Takahashi <i>et al.</i> (2007)	Gestão e controle de estoques	A, B, C, D, E, G	Todos	Modelagem de Markov
Tang <i>et al.</i> (2004)	Gestão e controle de estoques	B, C	desmontagem, remanufatura e remontagem	Transformação de Laplace
Tang <i>et al.</i> (2007)	Gestão e controle de estoques	B, C, D, G	desmontagem e remontagem	Modelo do vendedor de jornais
Tang e Grubbström (2005)	Gestão e controle de estoques	B, G	Remanufatura	Distribuição de probabilidade
Tang e Naim (2004)	Gestão e controle de estoques	B, D, G	Remanufatura	Dinâmica de sistemas
Teunter <i>et al.</i> (2004)	Gestão e controle de estoques	A, B	Remanufatura	Programação dinâmica
Teunter <i>et al.</i> (2006)	Gestão e controle de estoques	B	Remanufatura	Método heurístico Programação inteira-mista
Teunter e van der Laan (2002)	Gestão e controle de estoques	B	Remanufatura	Transformação de Laplace Modelagem de Markov
Teunter e Vlachos (2002)	Gestão e controle de estoques	A, B	Remanufatura	Distribuição de probabilidade
Toktay <i>et al.</i> (2000)	Gestão e controle de estoques	A, B, E, G	logística reversa e remanufatura	Teoria de filas
van der Laan (2003)	Gestão e controle de estoques	A, B	Remanufatura	Transformação de Laplace Modelagem de Markov
van der Laan e Teunter (2006)	Gestão e controle de estoques	B	Remanufatura	Método heurístico
Yang <i>et al.</i> (2005)	Gestão e controle de estoques	B	Remanufatura	Método heurístico



Zanoni <i>et al.</i> (2006)	Gestão e controle de estoques	A, B, G	Remanufatura	Dinâmica de sistemas
Zhou <i>et al.</i> (2006)	Gestão e controle de estoques	B	Remanufatura	Dinâmica de sistemas

**QUADRO 3.2 – Classificação dos artigos revisados**

Na próxima seção é apresentada a revisão propriamente dita.

### **3.3 A literatura sobre o Planejamento e Controle da Produção para a remanufatura**

Essa seção traz os principais resultados de cada um dos artigos revisados, e foi dividida de acordo com o primeiro critério de classificação proposto, ou seja, a atividade de PCP focada no trabalho. A seção 3.3.1 traz os artigos que tratam de apenas uma atividade do PCP e está subdividida de acordo com a atividade. A seção 3.3.2 traz os artigos que tratam de mais de uma atividade do PCP simultaneamente.

#### **3.3.1 Artigos que tratam de apenas uma atividade do PCP**

##### **3.3.1.1 Previsão**

Maples *et al.* (2005) propõem uma nova técnica para previsão de demanda de peças em operações de remanufatura que ao invés de utilizar as informações típicas de listas de materiais usa valores que identificam a similaridade entre as peças. De acordo com esses autores, na remanufatura não há um conjunto específico de listas de materiais para as tarefas a serem executadas, uma vez que as peças a serem recuperadas são as matérias-primas, o que implica em incertezas. Uma outra pesquisa que também lida com a atividade de previsão de demanda, mas aborda um aspecto complementar a este último é de Liang *et al.* (2009). Segundo esses autores, os consumidores precisam de um incentivo para retornar os produtos usados para a remanufatura. Diante disso, propõem um modelo para determinação do preço de aquisição de *cores* (produtos usados) na atividade de remanufatura. Essa proposta liga o preço

de compra dos *cores* com o preço de venda dos produtos remanufaturados e leva em consideração custos logísticos e da remanufatura.

### 3.3.1.2 Planejamento agregado

Geyer *et al.* (2007) e Golany *et al.* (2001) propõem algoritmos para se realizar o planejamento agregado na remanufatura. Ambos investigam a lucratividade da remanufatura sob algumas restrições como, por exemplo, acessibilidade a produtos usados (taxa de coleta), durabilidade dos produtos e demanda de mercado.

### 3.3.1.3 Programa mestre de produção

Depuy *et al.* (2007) e Ferguson *et al.* (2007) propõem métodos para realizar programação mestre da produção na remanufatura com a consideração da incerteza quanto à taxa de recuperação dos materiais. O primeiro método é baseado no MRP, e o segundo apresenta um método de classificação dos *cores*. Já Grubbstrom e Tang (2006) modelam um sistema produtivo com remanufatura em que em cada período deve-se decidir o programa mestre de produção pensando-se na influencia dos custos do trabalho, de materiais e de orçamento nas decisões de produção.

Lim e Sim (2005) e Souza e Ketzenberg (2002) propõem métodos para realizar o programa mestre de produção em sistemas híbridos (manufatura e remanufatura no mesmo sistema produtivo). Os primeiros autores sugerem o uso de um algoritmo genético para gerar planos de desmontagem e remontagem, já os últimos modelam um sistema híbrido em que o objetivo é determinar o *mix* ótimo de manufaturados e remanufaturados para maximizar o lucro sob a restrição do nível de serviço (*lead time* médio).

#### **3.3.1.4 Logística**

Lee *et al.* (2009) formulam um modelo matemático para uma remanufatura com três estágios de rede logística. Os autores propõem um algoritmo genético para resolver o problema de minimização do custo total de um sistema híbrido com demanda determinística e capacidade finita. O objetivo do algoritmo é minimizar os custos de transporte entre os subsistemas da remanufatura.

#### **3.3.1.5 Coordenação de ordens**

Ferrer e Whybark (2001) propõem um sistema de planejamento de materiais baseado na lógica do MRP. Nesse sistema são consideradas as incertezas no recebimento dos *cores* em termos de quantidade, *lead time*, tipo e qualidade. O sistema proposto é dividido em três partes: gestão de *cores* ou suprimento, gestão de peças e gestão de componentes ou demanda. A primeira preocupação gerencial é assegurar o suprimento necessário para a montagem, ou seja, estoque de segurança e peças compradas. Outra decisão importante no sistema é a programação da desmontagem, com o objetivo de minimizar a quantidade de estoque residual. Já Nakashima *et al.* (2004) estudam a coordenação de ordens levando em consideração dois tipos de estoques: na fábrica e “virtual” (em utilização pelo consumidor). O objetivo é coordenar as ordens de produção de forma a minimizar o custo médio por período. Uma limitação deste estudo é a não consideração do tempo de vida útil dos produtos.

#### **3.3.1.6 Planejamento da capacidade**

Franke *et al.* (2006), baseados em um processo genérico de remanufatura de telefones móveis, desenvolvem um modelo matemático para determinar as capacidades necessárias para identificação, teste, desmontagem, atualização do software e polimento para uma determinada demanda e oferecimento de celulares.

Georgiadis *et al.* (2006) e Vlachos *et al.* (2007) utilizam a metodologia *System Dynamics* para estudar o planejamento da capacidade na remanufatura. No primeiro artigo o objetivo chave é avaliar como o ciclo de vida e padrões de retorno dos produtos afetam as políticas ótimas de expansão e contração das capacidades de remanufatura e coleta. No segundo artigo o objetivo é fornecer uma ferramenta para análise de sensibilidade para determinação de capacidade de longo prazo.

### 3.3.1.7 *Scheduling*

Chiotellis *et al.* (2008) e Guide *et al.* (2005) tratam de problemas mais amplos de *scheduling*: projeto de sistemas de remanufatura e posterior sequenciamento das ordens e modelo analítico para examinar regras, respectivamente. Guide *et al.* (2005) destacam que retardar a liberação de um componente após a desmontagem nunca melhora o desempenho do sistema e que utilizar a regra de *scheduling* FCFS (*First Come First Served*) oferece um bom desempenho para as condições do modelo estudado.

Hou e Zhang (2005) e Teunter *et al.* (2008) focam análises de otimização de problemas de *scheduling*. No primeiro caso, os autores encontram uma política ótima de *scheduling* para situação em que há dois produtos com três componentes e duas áreas de remanufatura em que uma delas compartilha o processamento de dois componentes. No segundo caso os autores propõem um algoritmo para determinar o tempo de ciclo ótimo usando dados de um estudo de caso em uma remanufatura de autopeças. Os resultados apontam que a separação em linhas dedicadas (uma linha de produção para a manufatura e outra para a remanufatura) reduz o custo total.

Teunter *et al.* (2009) e Stanfield *et al.* (2006) propõem heurísticas para problemas de *scheduling*. A proposta dos primeiros autores é feita em planilha eletrônica para sistemas híbridos com múltiplos produtos. Já o diferencial da proposta de Stanfield *et al.* (2006) é a consideração de um sistema produtivo complexo, com várias operações, tarefas e tempos estocásticos.

### 3.3.1.8 Gestão e controle de estoques

Um dos problemas tratados nessa atividade é a aquisição e/ou classificação dos *cores*. Nesse tópico, há propostas para avaliar o impacto da categorização da qualidade dos retornos, da variabilidade na qualidade, quantidade e momento dos retornos nos custos, além de políticas de aquisição e classificação de produtos sujeitas à variabilidade da qualidade. Os artigos dessa linha são Aras *et al.* (2004), Behret e Korugan (2009), Sun *et al.* (2006), Ferrer e Ketzenberg (2004), Inderfurth (2005), Saadany e Jaber (2009) e Galbreth e Blackburn (2006).

Outro tópico recorrente na atividade de gestão e controle de estoques é o custo dos estoques. Aras *et al.* (2006), Çorbacioglu e van der Laan (2007), Teunter e van der Laan (2002) e van der Laan (2003) tratam do custeio dos estoques nos sistemas de remanufatura. Aras *et al.* (2006) demonstram que a análise de custo não é suficiente para determinar se o sistema produtivo deve remanufaturar ou manufaturar. Çorbacioglu e van der Laan (2007) e Teunter e van der Laan (2002) demonstram que o custeio tradicional (exemplo, ABC) não é apropriado para casos de remanufatura. Por fim, van der Laan (2003) avalia o uso de duas abordagens (NPV - *Net Present Value* e AC - *Average Cost*) em sistemas híbridos para a determinação dos custos com estoques. Este estudo conclui que a abordagem AC oferece bom desempenho desde que os parâmetros de custos sejam corretamente determinados. O estudo tem como principal limitação a não consideração dos *lead times* de produção.

Muitos artigos lidam com políticas de controle de estoques. Sistemas puxados, revisão periódica e contínua são avaliados de diversas maneiras. Efeitos da variação do lead time e diferentes tipos de custos também são avaliados, tanto em sistemas de remanufatura pura como em sistemas híbridos. Os artigos desse grupo são Bayindir *et al.* (2003), Inderfurth e van der Laan (2001), Kiesmüller (2003), Teunter *et al.* (2004), Zanoni *et al.* (2006), Tang e Grubbström (2005), Decroix (2006), Ouyang e Zhu (2008), Takahashi *et al.* (2007), Tang *et al.* (2007), Tang e Naim (2004), e Zhou *et al.* (2006).

O dimensionamento de tamanhos de lote é discutido por diversos autores. Métodos como programação dinâmica, algoritmo de Wagner/Whitin, lote econômico de compra e produção são estudados nos trabalhos de Pan *et al.* (2009), Richter e Sombrutzki (2000), Richter e Weber (2001), Konstantaras e Papachristos (2008) e Teunter *et al.* (2006).

Heurísticas para o controle de estoques são propostas pelos autores Mahadevan *et al.* (2003), Toktay *et al.* (2000), van der Laan e Teunter (2006) e Yang *et al.* (2005).

Aksoy e Gupta (2004) propõem um procedimento para determinar as quantidades ótimas de *input* em cada estágio produtivo da remanufatura. Posteriormente, Aksoy e Gupta (2005) propõem um algoritmo para alocação de pulmões para otimizar o desempenho de um sistema de remanufatura. É feita uma modelagem de um sistema com 3 módulos – desmontagem e inspeção, descarte e remanufatura (4 estações de trabalho). Kleber *et al.* (2002) trabalham com um modelo determinístico com demandas e retornos dinâmicos em um sistema híbrido. Há dois casos básicos: períodos em que a quantidade retornada é maior que a demanda e vice-versa. A questão a ser respondida é se o excesso de retorno deve ser estocado para períodos futuros ou descartado. Existem também demandas por diferentes níveis de qualidade dos produtos remanufaturados e assim, outra questão a ser respondida é para qual classe de demanda os retornos devem ser usados. Os autores apresentam um algoritmo para solucionar o problema sob as condições investigadas. Os resultados apontam que manter estoques de retornos para usá-los posteriormente em uma situação mais lucrativa traz maiores benefícios. Inderfurth (2004) mostra ainda como lidar com a situação em que a empresa pretende atender seu mercado com produtos remanufaturados de alta qualidade quando houver falta de estoque de produtos manufaturados e vice-versa. Os resultados de Teunter e Vlachos (2002) e Kiesmüller e van der Laan (2001) complementam esses estudos, investigando o efeito da opção de descarte de produtos retornados e o efeito da dependência entre demanda e retorno na remanufatura, respectivamente. Os resultados obtidos por Teunter e Vlachos (2002) mostram que somente há redução significativa de custos ao se descartar retornos se o *lead time* produtivo for muito alto, a taxa de recuperação for muito alta e os custos da remanufatura forem semelhantes aos custos da manufatura. Kiesmüller e van der Laan (2001) demonstram que negligenciar a dependência entre a demanda e o retorno pode levar a desempenhos inferiores em termos de custos.

Alguns artigos seguem outras linhas de pesquisa. Berthaut *et al.* (2009) estudam o controle de estoques em remanufaturas de bens de capital. A diferença básica dessa pesquisa é a consideração de dois tipos de retorno e dois tipos de demanda: planejados e não planejados e de um sistema com operações apenas de reparo, além da remanufatura. Roy *et al.* (2009) tratam de sistemas híbridos com um único produto. No modelo apresentado pelos pesquisadores, diferentemente dos modelos já apresentados na literatura, além dos produtos retornados, a remanufatura também processa produtos defeituosos produzidos pelo próprio processo de manufatura interna. Para modelar a produção de produtos defeituosos na manufatura os autores usam a técnica *fuzzy*. Um algoritmo genético é proposto para a solução do problema de maximização do lucro nesse ambiente. Tang *et al.* (2004) fazem uma

avaliação do processo de desmontagem com foco na análise das consequências econômicas da desmontagem em termos de custos com manutenção de estoques. O objetivo da pesquisa é desenvolver um método de decisão para determinar a estratégia de desmontagem (em que grau e quais componentes devem ser desmontados).

### 3.3.2 Artigos que tratam de mais de uma atividade do PCP

Seis artigos tratam simultaneamente da programação mestre da produção e da gestão e controle de estoques. Gharbi *et al.* (2008) propõem um algoritmo chamado de MHPP (*Multiple Hedging Point Policy*) para encontrar uma solução para o problema de controle da remanufatura para um produto sujeito a demanda variável. Li *et al.* (2006) e Nakashima e Gupta (2003) lidam com sistemas híbridos, com a proposição de algoritmos para minimização dos custos. Já Li *et al.* (2007) propõem um algoritmo genético para resolver o problema de programação mestre e controle de estoques, também visando à minimização de custos. O diferencial do trabalho de Robotis *et al.* (2005) é a consideração do caso de um revendedor de produtos usados que pode optar por remanufaturar ou não esses produtos e vendê-los em mercados secundários por preços maiores que os preços pagos pelos produtos usados sem remanufaturar. Zikopoulos e Tagaras (2008) investigam a atratividade de se pré-selecionar ou classificar os *cores* antes da desmontagem. O objetivo desse artigo é estudar o impacto de técnicas rápidas, porém inexatas, de classificação dos produtos retornados na lucratividade das operações de remanufatura.

Dois artigos lidam com *scheduling*, coordenação de ordens e controle de estoques conjuntamente. Li *et al.* (2009) propõem um algoritmo genético para otimização de um sistema de remanufatura e utilizam um modelo de simulação para avaliar os resultados. O objetivo do modelo é analisar o impacto na lucratividade do sistema em função de mudanças operacionais. As variáveis operacionais são número de trabalhadores em cada etapa produtiva, política de controle de estoques em cada etapa e programação da produção dos diferentes tipos de produtos. Já Hunter e Black (2007) apresentam uma metodologia utilizada para implantar a filosofia da remanufatura enxuta em uma célula de remanufatura. É apresentado um estudo de caso em uma empresa que produz e remanufatura componentes de helicópteros.

Rubio e Corominas (2008) e Souza *et al.* (2002) tratam da programação mestre da produção em conjunto com outras atividades do PCP. Os primeiros autores tratam também do planejamento da capacidade e os últimos do *scheduling*. Rubio e Corominas (2008) estudam a remanufatura em um ambiente de produção enxuta. O objetivo é analisar em que condições (capacidade, quantidade e momento de retorno e taxa de remanufatura) um sistema de logística reversa poderia ser introduzido em uma manufatura que usa um gerenciamento JIT (*Just In Time*). Já Souza *et al.* (2002) tratam do PCP de uma remanufatura que pode optar por vender itens retornados ou remanufaturá-los, como base em um sistema de remanufatura de telefones móveis. Os autores realizam simulações para avaliar as regras de *scheduling* e liberação de ordens e também para avaliar o impacto dos erros na classificação de qualidade dos retornos no nível de serviço.

Aksoy e Gupta (2001) e Bhattacharya *et al.* (2006) tratam da gestão e controle de estoques. Além dessa atividade, Aksoy e Gupta (2001) tratam também do planejamento da capacidade, fazendo uma proposta, para lidar com as incertezas inerentes a remanufatura, cujo objetivo é aumentar o número de pulmões nas estações de trabalho. Bhattacharya *et al.* (2006) discutem a determinação da quantidade ótima a ser pedida pelo varejista de produtos manufaturados e remanufaturados em sistemas estruturados de quatro formas diferentes de coordenação entre varejo, manufatura e remanufatura. Um dos focos desse trabalho é considerar produtos não vendidos também como uma fração para serem remanufaturados.

### **3.4 Análise da literatura revisada (anos 2000-2009)**

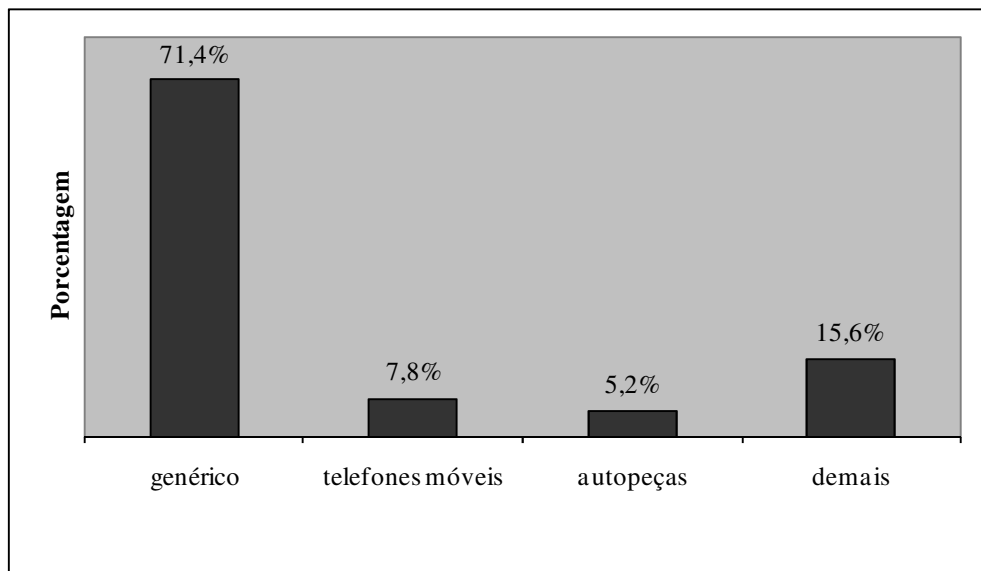
Nessa seção é apresentada uma análise da revisão realizada, a qual compreende a literatura sobre PCP na remanufatura entre os anos de 2000 e 2009. Primeiramente, a análise é feita isoladamente para os critérios de classificação propostos, a saber: atividades do PCP, características específicas da remanufatura, subsistema da remanufatura focado e tipo de pesquisa. Após isso, é feita uma análise mais aprofundada das características das pesquisas nas diversas atividades do PCP.

A primeira análise a ser feita na revisão bibliográfica é com respeito ao tipo de pesquisa. Nota-se que a literatura é dominada pela abordagem teórica, em especial por modelagem matemática e simulação. Os artigos que apresentam estudos práticos são Maples



*et al.* (2005), que propõem uma nova técnica para previsão da demanda em uma fábrica de equipamentos da indústria petroquímica, Hunter e Black (2007), que propõem um método de implantação da manufatura enxuta em uma célula de remanufatura e Depuy *et al.* (2007), que desenvolvem um sistema MRP aplicado em um processo de produção de antenas para navios.

Alguns sistemas de remanufatura são recorrentes nas pesquisas teóricas como, por exemplo, a remanufatura de telefones móveis, que é tratada em 7,8% dos artigos e a remanufatura de autopeças (5,2% dos artigos). A figura 3.1 a seguir ilustra esse resultado. Guide (2000) também já havia constatado que os estudos existentes eram, em sua maioria, estudos teóricos.



**FIGURA 3.1 – Pesquisas de acordo com o tipo de remanufatura estudada**

Dentre os modelos quantitativos desenvolvidos na literatura (74 artigos dentre 76 revisados), algumas outras considerações merecem ser feitas. Dentre os modelos teóricos (quantitativos) desenvolvidos nesses estudos, a grande maioria (71,4%) é genérico, ou seja, não está associado a nenhuma remanufatura específica. A maioria desses modelos (56,6%) considera sistemas híbridos (manufatura e remanufatura no mesmo sistema produtivo). Grande parte (28,4%) considera o produto manufaturado idêntico ao remanufaturado sob o ponto de vista do consumidor.

A segunda análise a ser considerada diz respeito aos subsistemas da remanufatura considerados nas pesquisas. Evidentemente a remanufatura é o subsistema mais tratado nas pesquisas, com 96,05% de ocorrência. Em segundo lugar aparece a desmontagem, com 30,3%, seguida da logística reversa e da remontagem, com 25% e 22,4%,

respectivamente. Poucas são as pesquisas que analisam os quatro subsistemas como um todo: apenas 6 artigos dentre os 76 revisados (7,9%). De acordo com Guide *et al.* (1999), a coordenação entre os três subsistemas da remanufatura (desmontagem, remanufatura e remontagem) é um fator chave para o PCP bem sucedido, dessa forma, as pesquisas na remanufatura ainda necessitam de estudos que tratam os subsistemas de maneira integrada. O diagrama de Venn da figura 3.2 a seguir ilustra esses resultados.

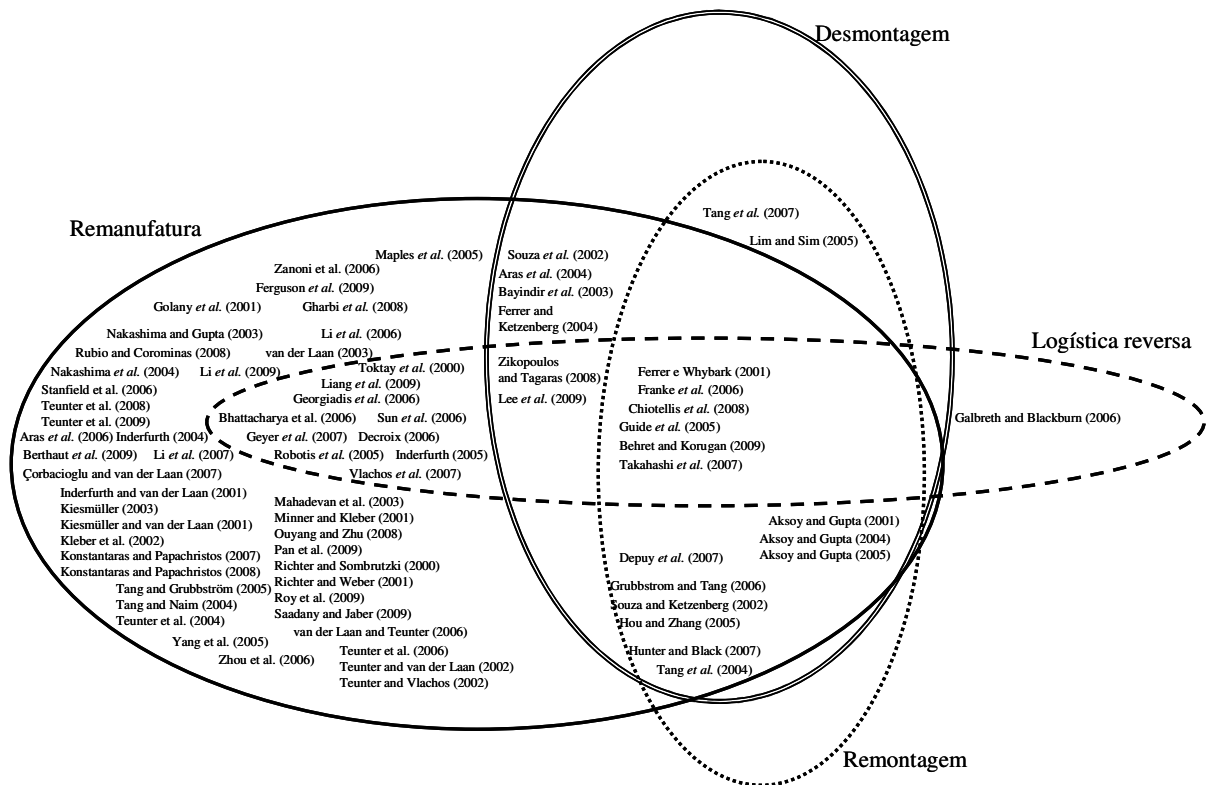
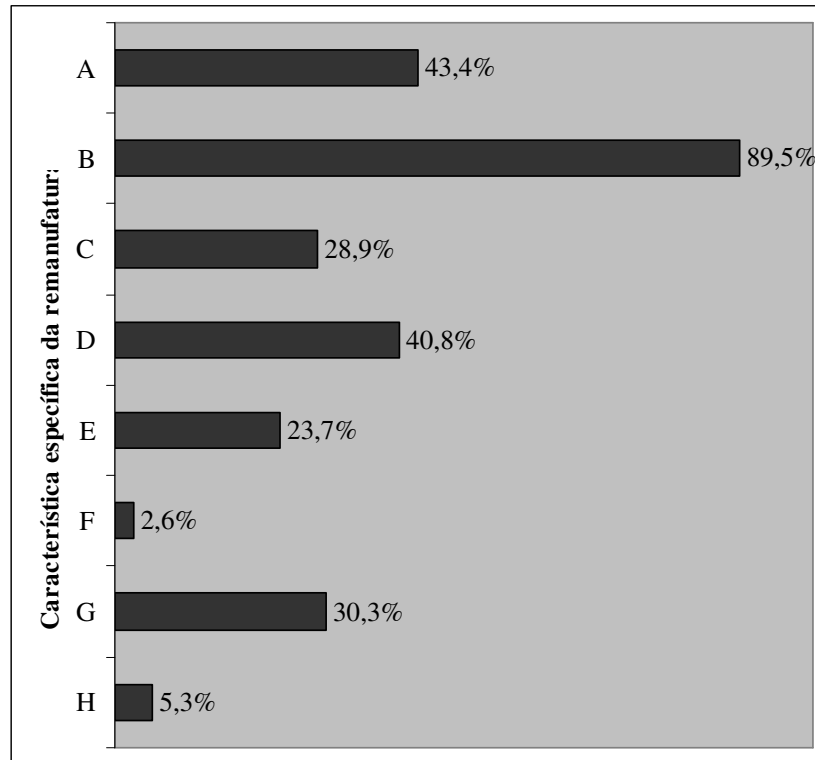


FIGURA 3.2 – Digrama de Venn dos subsistemas estudados

A terceira análise dessa seção é sobre as características específicas da remanufatura. A necessidade de balancear o retorno dos produtos com a demanda é a característica mais tratada, com um total de 89,5% das pesquisas. A segunda mais estudada é a incerteza quanto à quantidade e momento de retorno dos produtos (43,4%), seguida pela incerteza quanto à taxa de recuperação dos materiais que compõem os produtos retornados (40,8%). As características mais carentes de tratamento na literatura, com base na revisão realizada, são a necessidade de rastreamento ao longo do processo de remanufatura, com apenas 2,6%, e roteiros estocásticos, com 5,3%. Nenhuma pesquisa trata de todas as características específicas da remanufatura simultaneamente. Isso, portanto, permanece uma

área de pesquisa desprovida de estudos, assim como foi constatado na revisão de Guide (2000). A figura 3.3 resume estas informações.



#### Legenda

- A - Incerteza quanto à quantidade e momento de retorno
- B - Necessidade de balancear o retorno dos produtos com a demanda
- C - Necessidade de desmontar os produtos retornados
- D - Incerteza quanto à taxa de recuperação dos materiais
- E - Necessidade de uma rede de logística reversa
- F - Necessidade de rastreamento ao longo do processo
- G - Alta variabilidade dos tempos de processamento
- H - Roteiros estocásticos

**FIGURA 3.3 – Características específicas da remanufatura tratadas nas pesquisas**

A última análise a ser realizada nessa seção é a respeito das atividades do PCP na remanufatura, tema central dessa tese. Algumas atividades são tratadas com maior frequência. É o caso do controle de estoques, que claramente é a atividade do PCP na remanufatura mais tratada na literatura, com 68,4% das pesquisas revisadas. Em segundo lugar aparece a programação mestre da produção, com 17,1%, seguido do *scheduling*, com 11,8%, do planejamento da capacidade, com 6,6%, da previsão e coordenação das ordens, com 3,9%, do planejamento agregado, com 2,6% e da logística com 1,3%. As figuras 3.4 e 3.5 a seguir mostram esses resultados.

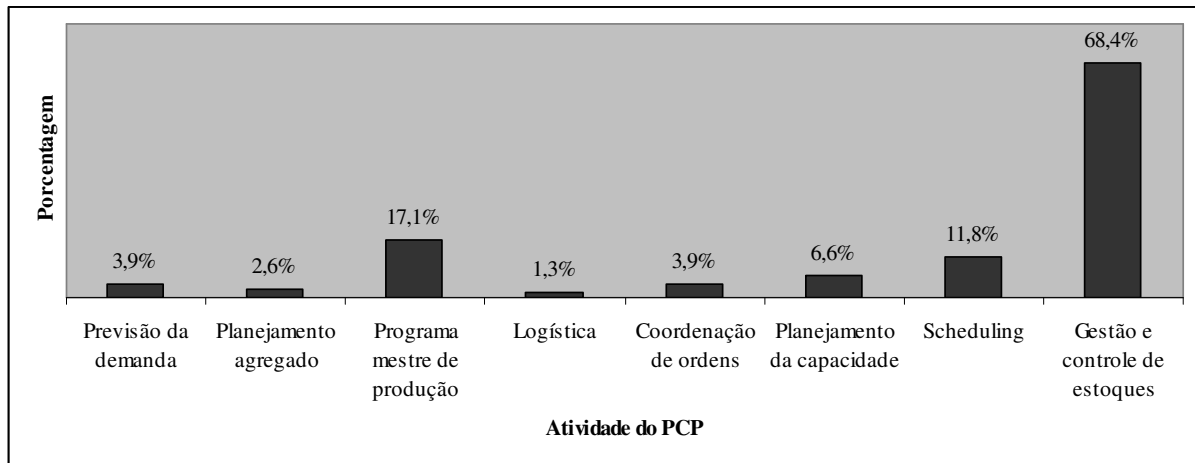


FIGURA 3.4 – Atividades do PCP tratadas nas pesquisas

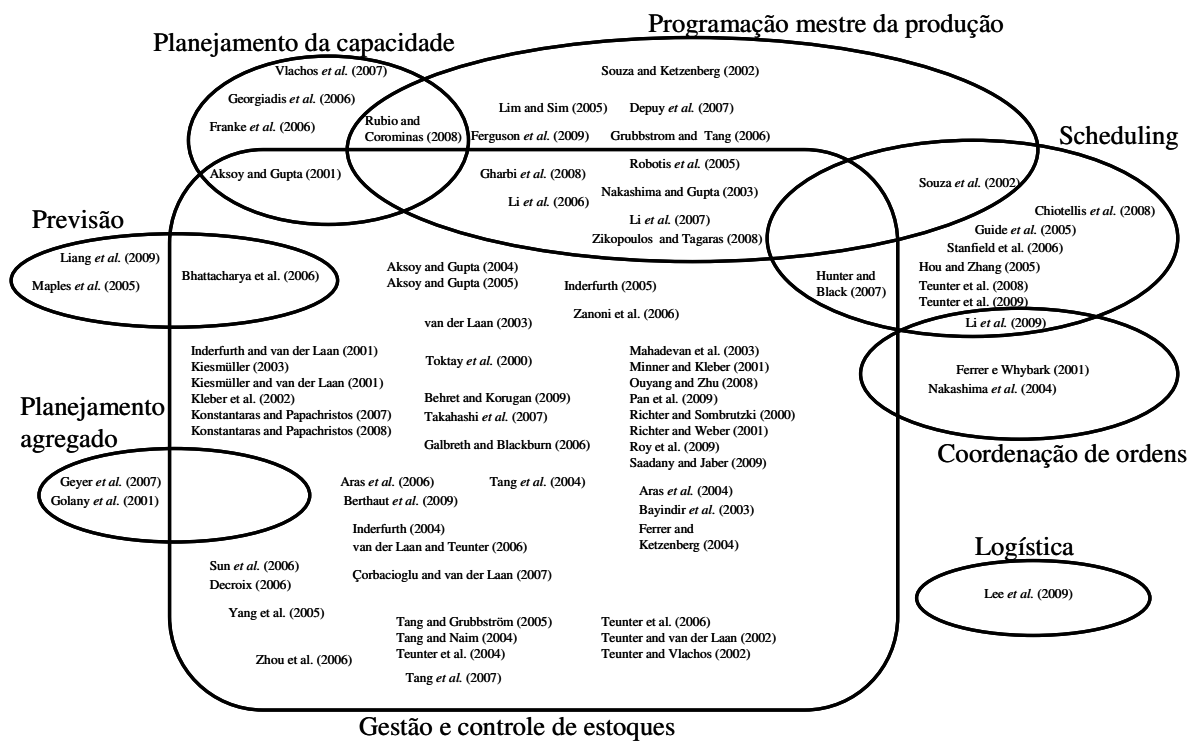


FIGURA 3.5 – Diagrama de Venn das atividades do PCP tratadas nos artigos

### 3.5 Comparação entre a análise da literatura fornecida por Guide (2000) e as análises realizadas neste trabalho

Reunindo-se a revisão, classificação e análise da literatura pesquisada entre os anos de 2000 e 2009 com os resultados da pesquisa de Guide (2000), mostrado no quadro 3.1, tem-se como resultado o quadro 3.3, mostrado a seguir.

Característica específica da remanufatura	Atividade do PCP			
	Previsão	Logística	<i>Scheduling</i> /Controle do chão de fábrica	Gestão e controle de estoques
A) Incerteza quanto à quantidade e momento de retorno	✓	✓	✓	✓
B) Necessidade de balancear o retorno dos produtos com a demanda	✓	✓	✓	✓
C) Necessidade de desmontar os produtos retornados		✓	✓	✓
D) Incerteza quanto à taxa de recuperação dos materiais	✓	✓	✓	✓
E) Necessidade de uma rede de logística reversa	✓	✓	✓	✓
F) Necessidade de rastreamento ao longo do processo			✓	✓
G) Alta variabilidade dos tempos de processamento		✓	✓	✓
H) Roteiros estocásticos		✓	✓	

**QUADRO 3.3 – Características específicas da remanufatura identificadas na literatura em relação às atividades do PCP**

Observando-se comparativamente os quadros 3.1 e 3.3, pode-se notar que as pesquisas que trabalham com algumas das principais atividades do PCP para a remanufatura evoluíram no sentido de incorporar mais atividades específicas da remanufatura a cada atividade do PCP; em outras palavras, algumas áreas não exploradas pela literatura até o ano 2000 foram tratadas recentemente. Também, observando-se o quadro 3.3 vê-se que algumas áreas parecem carecer de pesquisas com relação ao PCP da remanufatura, representadas pelos espaços em branco no quadro 3.3.

No entanto, acredita-se que se fazendo isso (adotar as áreas em branco do quadro 3.3 com áreas de pesquisas futuras) se poderia estar perdendo oportunidades de pesquisas e talvez direcionando esforços para áreas não tão atraentes sob o ponto de vista científico. Isso ocorre devido ao fato de que as atividades do PCP apresentadas no quadro 3.3

estão muito condensadas (somente 4): uma subdivisão de tais atividades pode trazer certas perspectivas de pesquisas que não aparecem quando as atividades estão tão condensadas.

Para tentar sanar essa dificuldade foi elaborado o quadro 3.4, o qual reformula o quadro 3.3 levando-se em consideração uma divisão mais detalhada das atividades do PCP, conforme proposto na seção 3.2 a qual segue autores como Vollmann *et al.* (2004) e Sipper e Bulfin (1997). Essa divisão mais detalhada subdivide o PCP nas seguintes atividades: previsão, planejamento agregado, programação mestre, logística, coordenação de ordens, planejamento da capacidade, *scheduling* e gestão e controle de estoques. As células marcadas com “✓” indicam que havia estudos relacionando a respectiva atividade do PCP (coluna) e a respectiva característica específica da remanufatura (linha).

Característica específica da remanufatura	Atividade do PCP							
	Previsão	Planejamento agregado	Programa mestre de produção	Logística	Coordenação de ordens	Planejamento da capacidade	<i>Scheduling</i>	Gestão e controle de estoques
A	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
B	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
C			✓	✓	✓	✓	✓	✓
D	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
E	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
F				✓			✓	✓
G			✓	✓	✓	✓	✓	✓
H				✓	✓	✓	✓	

#### Legenda

- A - Incerteza quanto à quantidade e momento de retorno
- B - Necessidade de balancear o retorno dos produtos com a demanda
- C - Necessidade de desmontar os produtos retornados
- D - Incerteza quanto à taxa de recuperação dos materiais
- E - Necessidade de uma rede de logística reversa
- F - Necessidade de rastreamento ao longo do processo
- G - Alta variabilidade dos tempos de processamento
- H - Roteiros estocásticos

#### QUADRO 3.4 – Relacionamentos entre as características específicas da remanufatura e as atividades do PCP não tratados na literatura revisada

Verificando-se o quadro 3.4 nota-se que 13 áreas surgem como prováveis candidatas a serem grandes lacunas a serem tratadas com relação ao PCP para a remanufatura (áreas não marcadas com “✓” no quadro 3.4). A característica alta variabilidade dos tempos de processamento não é exclusividade da remanufatura. Dessa forma, essa interseção no quadro 3.4 já se apresenta tratada na literatura referente à manufatura. Para uma visão abrangente sobre essas incertezas no planejamento da produção na manufatura consultar Mula *et al.* (2006). Dessa forma, das 13 candidatas iniciais, as duas representadas pela característica G

podem ser excluídas. O restante das áreas em branco no quadro 3.4 apresenta-se como lacunas a serem preenchidas na pesquisa sobre PCP na remanufatura:

- a) estudos que tratem de previsão e que levem em consideração as características necessidade de desmontar os produtos retornados, necessidade de rastreamento ao longo do processo, e roteiros estocásticos (características C, F e H);
- b) pesquisas que tratem da atividade de planejamento agregado e que levem em conta as características necessidade de desmontar os produtos retornados, necessidade de rastreamento ao longo do processo e roteiros estocásticos (características C, F e H);
- c) trabalhos que tratem da atividade de programação mestre da produção e que levem em consideração as características necessidade de rastreamento ao longo do processo e roteiros estocásticos (características F e H);
- d) estudos que tratem de sistemas de coordenação de ordens e que levem em conta a necessidade de rastreamento ao longo do processo (característica F);
- e) estudos que foquem o planejamento da capacidade para sistemas de remanufatura levando-se em conta a necessidade de rastreamento ao longo do processo (característica F); e
- f) estudos que foquem a gestão e controle de estoques para sistemas de remanufatura com roteiros estocásticos (característica H).

Com respeito a essas áreas de pesquisa, seguem algumas considerações sobre suas importâncias:

- a) a desmontagem é a principal fonte de informações na remanufatura, assim, melhorias em outros aspectos não podem alcançar todo o seu potencial se modelos e métodos de PCP que lidem com essa característica não forem utilizados. Além disso, com o desenvolvimento desses modelos e métodos, muitas empresas que subcontratam o processo de desmontagem para evitar essa característica poderão usufruir de uma vantagem que somente a desmontagem e posterior revenda dos produtos pode oferecer: a oportunidade de melhorar a qualidade dos produtos e o desenvolvimento de novos produtos com base nas informações sobre as condições dos produtos após o uso (POKHAREL e MUTHA, 2009);
- b) com relação à necessidade de rastreamento ao longo do processo, pode-se considerar que muitas companhias poderiam aumentar suas fatias de mercado oferecendo um melhor serviço de pós-venda oferecendo, por exemplo, garantia de vida estendida para seus produtos. Uma grande oportunidade para oferecer isso é a remanufatura como parte do serviço de pós-venda, em que cada cliente pode ter o seu produto remanufaturado para aumentar a vida útil, o que é vantajoso especialmente se for um produto de alto valor agregado. Obviamente que nesses casos o cliente exigiria que o produto fosse montado com a mesma combinação de peças (já

que o cliente mantém a propriedade sobre o produto a ser remanufaturado). Assim, pesquisas sobre o PCP na remanufatura com necessidade de rastreamento ao longo do processo irão promover a competitividade de empresas que já atuam e empresas que queiram entrar no setor de remanufatura;

c) já com relação aos roteiros estocásticos, pode-se dizer que muitas empresas, por falta de modelos e métodos de PCP para lidar com essa dificuldade, mantém roteiros idênticos para todas as peças a serem remanufaturadas. Por um lado, isso evita a característica específica da remanufatura, mas por outro lado aumenta os custos e exige a manutenção de capacidade em excesso.

Por fim, o fato de já haver estudos que relacionam certas características específicas da remanufatura com determinadas atividades do PCP não necessariamente significa que se trata de uma área de pesquisa esgotada. Na verdade, à medida que os estudos são em sua grande maioria teóricos, existe claramente a necessidade de mais pesquisas práticas para cada um dos relacionamentos entre as características específicas da remanufatura e as atividades do PCP na remanufatura.

Além dessas constatações, na própria literatura revisada existem outras dificuldades relatadas pelos pesquisadores com relação ao PCP na remanufatura. Em uma pesquisa recente, Guide e Wassenhove (2009) afirmam que muitos problemas de pesquisa operacional desafiadores foram definidos na remanufatura, mas permanecem sem solução, como está confirmado e detalhado nas considerações da presente pesquisa. “Em particular, nós temos visto uma abundância de artigos focados em poucos detalhes técnicos ou que tratam de problemas artificiais” (GUIDE e WASSENHOVE, 2009). Em outras palavras, muitos assuntos relevantes para a indústria previamente reportados na literatura permanecem sem tratamento pela pesquisa acadêmica. O presente trabalho detalha quais são esses assuntos nesta mesma seção. Além disso, como afirmam Mahadevan *et al.* (2003) muito tempo de processamento computacional é necessário para solucionar os modelos quantitativos abordados na literatura sobre a remanufatura. Tang e Naim (2004) reforçam a constatação de que a literatura sobre remanufatura é dominada por abordagens quantitativas. Para Mitra (2007), deve haver mais do que um nível de qualidade dos produtos remanufaturados, o que acarreta preços diferentes. Segundo o autor, essas duas características não têm sido aplicadas na literatura. Isto também é confirmado na revisão bibliográfica da presente tese. Seitz (2007) faz um estudo que demonstra que em algumas remanufaturas apenas uma parte das peças são remanufaturadas internamente, e o restante das peças são novas e compradas de fornecedores ou remanufaturadas por outras empresas. Isso deve ser mais abordado pela literatura.



### 3.6 Considerações finais

Esse capítulo tem o objetivo de realizar uma revisão bibliográfica sobre o PCP na remanufatura, tendo como linha base para as análises as características que tornam a remanufatura mais complexa em relação à manufatura.

Dentre as conclusões principais, pode-se destacar que são identificadas onze áreas para pesquisas futuras:

- a) estudos que tratem de previsão e que levem em consideração as características necessidade de desmontar os produtos retornados, necessidade de rastreamento ao longo do processo, e roteiros estocásticos;
- b) pesquisas que tratem da atividade de planejamento agregado e que levem em conta as características necessidade de desmontar os produtos retornados, necessidade de rastreamento ao longo do processo e roteiros estocásticos;
- c) trabalhos que tratem da atividade de programação mestre da produção e que levem em consideração as características necessidade de rastreamento ao longo do processo e roteiros estocásticos;
- d) estudos que tratem de sistemas de coordenação de ordens e que levem em conta a necessidade de rastreamento ao longo do processo;
- e) estudos que foquem o planejamento da capacidade para sistemas de remanufatura levando-se em conta a necessidade de rastreamento ao longo do processo; e
- f) estudos que foquem a gestão e controle de estoques para sistemas de remanufatura com roteiros estocásticos.

Além disso, pode-se constatar também que para todas as características específicas da remanufatura e atividades do PCP são necessárias pesquisas práticas como, por exemplo, estudos de caso. Além disso, nenhuma pesquisa trata de todas as características específicas da remanufatura simultaneamente.

## 4 ESTUDO DE MÚLTIPLOS CASOS SOBRE O PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO NA REMANUFATURA

### 4.1 Introdução

Neste capítulo são descritos os estudos de caso realizados em quatro das cinco empresas pertencentes à Associação Nacional dos Remanufaturadores de Autopeças (ANRAP). A quinta empresa não se disponibilizou a receber o autor para a realização da pesquisa.

As principais finalidades desses estudos de caso são: realizar um estudo exploratório da atividade prática de remanufatura em algumas empresas instaladas no Brasil, identificar as características específicas da remanufatura presentes nas operações estudadas, descrever como algumas empresas lidam com as características específicas da remanufatura e identificar quais são as necessidades de soluções e estudos para os problemas enfrentados por essas empresas ao realizar o planejamento e controle da produção.

A composição dos estudos de caso foi baseada nas proposições de Yin (1990), Meredith (1998) e Miguel (2007). A estrutura dos estudos de caso está ilustrada na figura 4.1 a seguir.

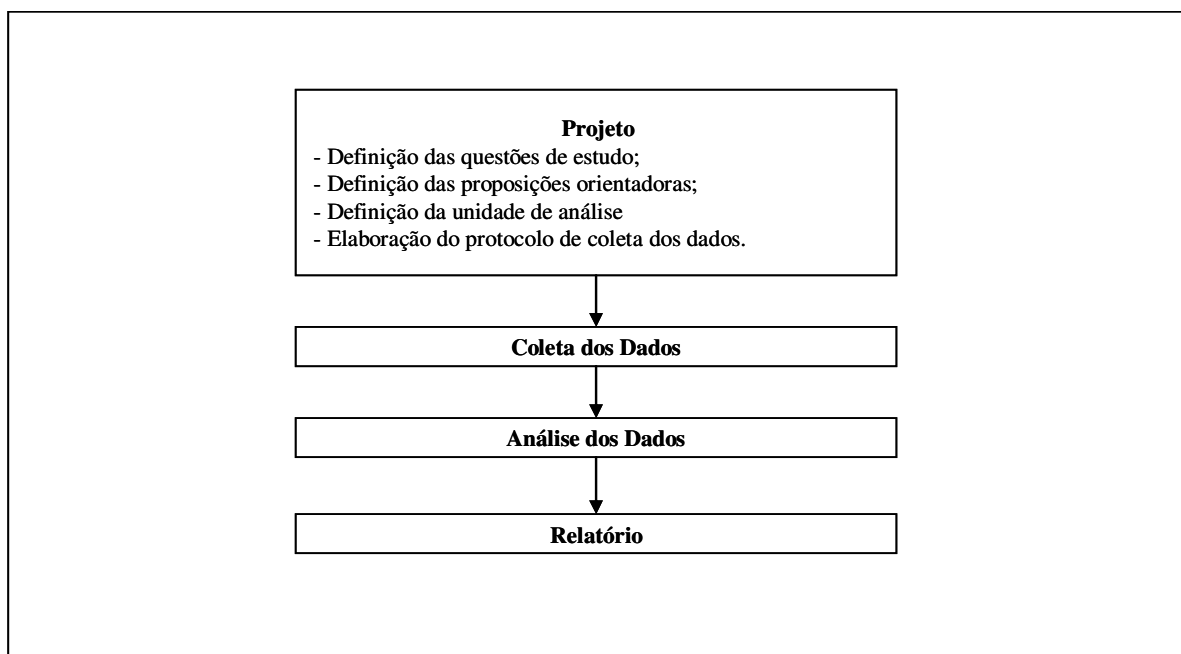


FIGURA 4.1 – Estrutura dos estudos de caso nesta pesquisa.

Além das etapas mostradas na figura 4.1, há uma fase imprescindível que foi realizada nos primeiros capítulos deste trabalho: a criação da estrutura teórica necessária para a condução da pesquisa de campo. As demais fases são discutidas a seguir. O relatório elaborado nada mais é do que o presente capítulo que trata da pesquisa de campo utilizando o método estudo de caso, e a análise dos dados é feita ao longo do próprio relatório.

a) projeto. A primeira fase do projeto dos estudos de caso consistiu em definir as questões de pesquisa. Essas questões foram previamente determinadas na pesquisa teórico-conceitual realizada nos capítulos 2 e 3. São as seguintes: quais são as características específicas presentes em algumas remanufaturas de autopeças instaladas no Brasil?; como as empresas lidam com essas dificuldades?; e quais são as necessidades de estudos a respeito do PCP na remanufatura para essas empresas? Com relação às proposições orientadoras, tendo-se em mente que estas devem ajudar a centralizar a atenção sobre os dados essenciais (YIN, 1990), determinou-se que seria examinado no escopo do estudo basicamente o como a empresa planeja e controla a produção. Com a proposição anterior, a definição da unidade de análise (terceira fase) fica claramente determinada: o setor ou área produtiva em que a operação de remanufatura é realizada. A quarta e última fase do projeto dos estudos de caso tratou da elaboração do protocolo de coleta de dados. Para Miguel (2007), a definição de procedimentos e regras gerais para a realização do estudo de caso utilizando um protocolo aumenta a confiabilidade da pesquisa, ou seja, permite que o estudo seja repetido obtendo-se resultados semelhantes. Isso garante, em parte, a validade do estudo de caso, estabelecendo as limitações do desenvolvimento da pesquisa. O protocolo desenvolvido para esta pesquisa é apresentado no apêndice A e possui três partes: a primeira parte traz um conjunto de questões a serem respondidas para descrever a remanufatura; a segunda parte traz um conjunto de questões a serem respondidas para identificar as características específicas da remanufatura presentes na empresa; por fim, a terceira parte traz um conjunto de questões relativas a outras informações relevantes ao entendimento da atividade de remanufatura nessas empresas;

b) coleta e análise dos dados. Os dados coletados e as análises são apresentados nas subseções a seguir. Cada subseção secundária corresponde a um caso, ou seja, a uma das empresas estudadas. Foram associados números às empresas unicamente com o intuito de preservar a identidade de cada uma.

A estrutura do capítulo é a que segue: na seção 4.2 é apresentado o estudo de caso 1, na seção 4.3 o estudo de caso 2, na seção 4.4 o estudo de caso 3 e na seção 4.5 o estudo de caso 4. Na seção 4.6 são feitas análises comparativas dos quatro estudos de caso. Já na seção 4.7 os resultados desses estudos práticos são comparados com os resultados do

estudo teórico realizado no capítulo 3. Por fim, na seção 4.8 são proferidas as considerações finais.

## **4.2 Estudo de caso 1**

### **4.2.1 Descrição da empresa 1**

O estudo de caso 1 foi realizado em uma empresa multinacional produtora de sistemas de freio, sistemas de direção, cintos de segurança, volantes, *airbags*, válvulas de motores, componentes eletrônicos, sistemas de fixação, módulos de suspensão e fluido de freio. A empresa como um todo tem uma receita anual em torno de R\$ 1.200.000.000.

Atualmente a empresa somente remanufatura sistemas de direção (mecânica e hidráulica). A operação de remanufatura é totalmente subcontratada. Dessa forma, o estudo de caso foi efetuado na empresa subcontratada. A atuação no setor de remanufatura tem como principais motivos a lucratividade e a preocupação com a sustentabilidade. O respondente é o atual gerente geral da remanufatura. São produzidos anualmente cerca de 9500 produtos remanufaturados, o que corresponde a cerca de 10% dos produtos manufaturados pela mesma empresa.

A operação de remanufatura possui 50 funcionários. Toda a produção é sob encomenda e a empresa utiliza como sistema de PCP o *software* de gestão RSYS.

Para o respondente, o maior obstáculo para a remanufatura no Brasil é a quebra do paradigma de que o produto remanufaturado tem qualidade inferior.

### **4.2.2 Características específicas da remanufatura na empresa 1**

A característica A (incerteza quanto à quantidade e momento de retorno) está presente na empresa 1, que obtém os produtos para serem remanufaturados de duas maneiras: 25% por meio de retorno dos consumidores e 75% por meio de agências terceirizadas que fazem coletas dos produtos usados em praticamente todo território nacional. Para lidar com a

incerteza quanto à quantidade e momento de retorno, a empresa controla os momentos e quantidades de retorno para os recebimentos das agências terceirizadas. Dessa forma, os efeitos dessa característica nas atividades do PCP ficam amenizados pelo controle do recebimento sobre as agências terceirizadas. Ou seja, em função da medida tomada, reduz-se a incerteza com relação à previsão dos momentos de chegada e quantidades de *cores* e conseqüentemente da realização das demais atividades (plano agregado, programa mestre, logística, emissão de ordens, planejamento da capacidade, programação e controle de estoques). Por outro lado, a empresa fica dependente dessas agências, além do que essa solução só é possível para aproximadamente 75% dos produtos.

A empresa 1 possui a característica B (necessidade de balancear o retorno dos produtos com a demanda). Para lidar com isso, trabalha unicamente com carteira de pedidos. Com isso, a influência dessa característica nas atividades do PCP é amenizada. Ou seja, em função da produção somente sob pedido, reduz-se a incerteza com relação à demanda por produtos remanufaturados e conseqüentemente da realização das demais atividades (plano agregado, programa mestre, logística, emissão de ordens, planejamento da capacidade, programação e controle de estoques). Entretanto, a empresa 1 perde a oportunidade de atender outros tipos de clientes.

Na empresa 1 há a característica C (necessidade de desmontar os produtos retornados), causando todas as dificuldades usuais ao PCP da empresa que precisa considerar essa atividade antes de qualquer decisão a respeito do plano agregado e mestre de desmontagem, da armazenagem e controle dos estoques de itens, da coordenação de ordens entre os subsistemas dentro da operação, do planejamento da capacidade na desmontagem que varia de período a período, da programação das operações no subsistema de remanufatura que fica dependente da desmontagem.

A característica D (incerteza quanto à taxa de recuperação dos materiais) existe na empresa 1. Frente a essa característica, faz-se a desmontagem da quantidade necessária de produtos para atender aos pedidos realizados, somado a uma quantidade de segurança, necessária uma vez que a taxa de recuperação dos materiais é diferente para cada produto desmontado (característica D). Isso faz surgir estoques desnecessários (peças desmontadas que não serão utilizadas imediatamente). Além disso, a empresa utiliza como método de controle da qualidade dos produtos retornados a análise de produtos em garantia e também controle dos dados históricos dos fornecedores. Além disso, é feito o controle da taxa de recuperação de maneira manual, com preenchimento de formulários. Essa taxa de recuperação é considerada totalmente imprevisível / totalmente instável pela empresa. Essa

imprevisibilidade acarreta como problema principal para o PCP a dificuldade de se balancear o retorno com a demanda por produtos remanufaturados e compras de peças e componentes novos. É prática da empresa descartar 100% das peças plásticas e de borracha presentes nos produtos. Diante disso, ocorrem todas as dificuldades usuais ao PCP da empresa, que fica dependente de uma variável aleatória para definição dos planos agregado e mestre, determinação da capacidade do subsistema de remanufatura, programação, controle dos estoques e emissão de ordens.

A característica E (necessidade de uma rede de logística reversa) está presente na empresa 1. Atualmente a empresa 1 apenas obtém os produtos retornados por meio de terceiros e clientes. Assim, os efeitos complicadores dessa característica para o PCP da empresa são atenuados. Com isso, a empresa perde a oportunidade de ter sua operação integrada com as atividades de coleta de produtos usados.

Não há a característica F (necessidade de rastreamento ao longo do processo) na empresa 1, pois seus produtos ao retornarem para serem remanufaturados não necessitam ser remontados com a mesma combinação anterior. Com isso, a empresa não precisa lidar com essa dificuldade. Portanto, não há efeitos da característica F no PCP da empresa.

A empresa 1 possui a característica G (alta variabilidade dos tempos de processamento) apenas nas operações de remanufatura. Nas operações de desmontagem, os tempos de processamento são considerados totalmente previsíveis / totalmente estáveis e nas operações de remontagem, os tempos de processamento são totalmente previsíveis / totalmente estáveis. A empresa não desenvolveu meios próprios para lidar com essa dificuldade. Segundo o respondente, os principais problemas resultantes para o PCP são atrasos nas entregas e necessidade de reprogramação das operações na remanufatura.

A característica H (roteiros estocásticos) está presente na empresa 1. No entanto, as decisões tomadas como, por exemplo, o número de produtos a ser desmontado, não leva em consideração essa característica. Portanto, nessa empresa os efeitos complicadores da característica H são evitados. Com isso, a empresa perde a oportunidade de utilizar melhor seus recursos produtivos, ou seja, reduzir custos a partir de decisões tomadas com base nas necessidades de operações.

Além dessas características específicas da remanufatura, a empresa 1 possui como dificuldade adicional a alta variação na taxa de produção. Isso se dá, segundo o respondente, em função da baixa automatização dos processos, o que gera maiores variabilidades dos tempos de processamento nas operações.

## 4.3 Estudo de caso 2

### 4.3.1 Descrição da empresa 2

O estudo de caso 2 foi realizado em uma empresa multinacional presente em 16 países. Trata-se de uma fabricante de sistemas de embreagem, suspensão, direção e controle de vibrações, atendendo aproximadamente 70% do mercado nacional.

A receita anual da empresa está em torno de R\$ 160.000.000, produzindo cerca de 300.000 peças por ano. O respondente é o atual coordenador de engenharia de qualidade e atuou por mais de 15 anos como coordenador de produção da remanufatura.

A empresa remanufatura apenas um tipo de produto: *kits* de embreagem, compostos por platô, disco e mancal, em uma quantidade que corresponde a 40% do total produzido de peças manufaturadas. A atuação no setor de remanufatura tem como principais motivos a lucratividade e a preocupação com a sustentabilidade. Atualmente o número de funcionários na remanufatura é de 192. Toda a produção é feita sob encomenda, e os sistemas de PCP utilizados são o MRP e o sistema *kanban*. O PCP para a remanufatura é separado do PCP para a manufatura.

Para o respondente, o maior obstáculo para a atividade de remanufatura no Brasil é a legislação que não exige que se retire a marca da empresa do produto que é remanufaturado por outra empresa não autorizada, pois os problemas de qualidade de remanufaturadores não qualificados prejudicam a imagem da empresa.

### 4.3.2 Características específicas da remanufatura na empresa 2

A característica A (incerteza quanto à quantidade e momento de retorno) está presente na empresa 2. A empresa obtém os produtos para serem remanufaturados de uma única fonte: distribuidores de *aftermarket*, não havendo controle dos momentos e quantidades de retorno. O único método utilizado para reduzir incertezas quanto ao momento e quantidade dos produtos retornados é o controle do histórico de retornos. Diante disso, as informações a

respeito de quanto e quando os produtos usados retornarão são incertas. Com isso, a previsão dos momentos de chegada e quantidades de *cores* é mais complexa e, conseqüentemente o estabelecimento de o quanto e quando produzir e comprar, o estabelecimento da capacidade de desmontagem, a programação das operações na desmontagem e coordenação com as operações de remanufatura e remontagem no que se refere também a tamanhos de lotes são realizados sob grande incerteza. Portanto, essa característica afeta o PCP em todos os níveis de decisão, mesmo simplificando a maneira de obtenção dos *cores*.

A empresa 2 possui a característica B (necessidade de balancear o retorno dos produtos com a demanda). A empresa lida com isso por meio da carteira de pedidos, que na verdade, está diretamente ligada à quantidade retornada. Ou seja, o tamanho do lote de produtos retornados de um determinado distribuidor é exatamente a quantidade que a empresa deverá remanufaturar para entregar para esse distribuidor. Inclusive, a empresa 2 não paga aos distribuidores pelos produtos retornados, apenas faz uma avaliação das peças para deduzir esse valor do preço de venda dos produtos remanufaturados. Assim, embora a empresa possua a característica B, seus efeitos para as atividades do PCP são amenizados pelo atendimento de apenas um tipo de consumidor e produzindo sob encomenda. Com isso, nessa empresa perde-se a oportunidade de atender consumidores diferentes.

Na empresa 2 há a característica C (necessidade de desmontar os produtos retornados). Como consequência, a posterior elaboração dos planos de desmontagem e das necessidades de capacidade para programar as operações de desmontagem é realizada pela empresa com pouca eficiência, segundo o respondente, pois não utiliza métodos específicos para isso. Outra dificuldade atual em relação ao PCP é com a coordenação entre a manufatura e remanufatura, o que tem gerado estoques intermediários de peças remanufuradas à espera de peças manufaturadas para serem remontadas.

A característica D (incerteza quanto à taxa de recuperação dos materiais) existe na empresa 2. A empresa utiliza como método de controle da qualidade dos produtos retornados apenas a exigência de que os produtos tenham sido feitos pela própria empresa e que não estejam faltando componentes internos. Para controlar a taxa de recuperação dos materiais, após desmontar os produtos retornados, a empresa utiliza como modelo para auxiliar no planejamento das peças e componentes a serem recuperados na desmontagem índices de aproveitamento, construídos com base no histórico dos distribuidores. Segundo o respondente, essa taxa de recuperação é considerada previsível / estável, com cerca de 30% de descarte. Além disso, é prática da operação descartar 100% dos itens de baixo custo. Com base no índice de aproveitamento, a empresa faz a previsão e planejamento de recuperação de



materiais. Assim, o PCP da empresa 2 sofre pouco os efeitos da característica D, por outro lado, a empresa perde a oportunidade de remanufaturar produtos de outros fabricantes.

A característica E (necessidade de uma rede de logística reversa) está presente na empresa 2, que para obter os *cores*, recebe unicamente de distribuidores. Assim, os efeitos complicadores dessa característica são atenuados. Por outro lado, perde-se nessa operação a possibilidade de se obter os *cores* diretamente dos consumidores e a empresa fica dependente dos distribuidores para realizar a coleta e transporte dos produtos usados.

Não há a característica F (necessidade de rastreamento ao longo do processo) na empresa 2, pois os produtos da empresa ao retornarem para serem remanufaturados não precisam ser remontados com a mesma combinação anterior. Com isso, a empresa não precisa lidar com essa dificuldade. Portanto, não existem efeitos da característica F no PCP da empresa 2.

Atualmente a empresa 2 não possui a característica G (alta variabilidade dos tempos de processamento). Dessa forma, não é preciso lidar com essa dificuldade nessa empresa. Portanto, para o PCP da empresa 2, atualmente não há efeitos complicadores causados pela característica G.

A característica H (roteiros estocásticos) está presente na empresa 2. Por exemplo, algumas peças necessitam de operações mais específicas como usinagem, enquanto outras apenas limpeza. Entretanto, a empresa 2 não baseia suas decisões nessa característica. Portanto, em função dessa simplificação, o PCP da empresa 2 sofre pouco com as dificuldades dessa característica. Entretanto, perde-se, com a simplificação, a oportunidade de se utilizar melhor os recursos produtivos.

Como complicador adicional, quando há altas de demanda de peças manufaturadas por parte das montadoras de automóveis, deixa-se de abastecer peças manufaturadas necessárias para a remanufatura. Isso tem gerado estoques intermediários de peças já remanufaturadas à espera de peças manufaturadas para serem remontadas e atrasos nas entregas.

## 4.4 Estudo de caso 3

### 4.4.1 Descrição da empresa 3

A empresa 3 atua na fabricação de produtos para veículos ferroviários e rodoviários. Para o setor ferroviário, produz componentes para sistemas de freio a ar comprimido e circuitos pneumáticos para sistemas de carros de passageiros e sistemas de carga. Para o setor rodoviário, produz sistemas de freios para veículos comerciais. Para caminhões acima de 6 toneladas, ônibus, reboques e veículos fabrica produtos para suprimento e tratamento de ar, controle de freio e chassi e freio de roda.

A receita anual está em torno de R\$ 260.000.000, com uma quantidade produzida de aproximadamente 3.000 produtos remanufaturados por ano no Brasil, correspondendo a cerca de 1,5% do total produzido de produtos manufaturados também no Brasil. São remanufaturados 4 produtos diferentes: compressores, válvulas, freio a disco e sistemas de tratamento de ar.

O estudo de caso contou com a participação de dois respondentes, o gerente industrial e o sênior de produção responsável pela coordenação das operações de remanufatura.

A remanufatura conta com apenas 4 funcionários atualmente, mas já operou com um total de 12. A diminuição é decorrente do recente aquecimento de vendas de peças manufaturadas, o que provocou o deslocamento de operadores da remanufatura para a manufatura.

A produção dos remanufaturados é feita totalmente com base na carteira de pedidos, sendo o PCP realizado principalmente por meio de planilhas eletrônicas. O PCP para a remanufatura é separado do PCP para a manufatura.

A empresa começou a atuar na atividade de remanufatura em função do surgimento da demanda por esses tipos de produtos por parte dos principais clientes, mantendo-se nesse setor motivada pelo lucro e preocupação com sustentabilidade.

#### 4.4.2 Características específicas da remanufatura na empresa 3

A característica A (incerteza quanto à quantidade e momento de retorno) está presente na empresa 3, que obtém os produtos para serem remanufaturados de duas fontes diferentes: das montadoras, correspondendo a cerca de 40% do volume, e dos centros técnicos de revenda de peças para reposição, correspondendo aos 60% restantes. Não há controle dos momentos e quantidades de retorno dos produtos para serem remanufaturados. A empresa não desenvolveu nenhum método para lidar com essa incerteza, apenas simplificou o número de fontes de recebimento. Portanto, o PCP da empresa sofre com a incerteza com relação à previsão dos momentos de chegada e quantidades de *cores* e conseqüentemente da realização das demais atividades (plano agregado, programa mestre, logística, emissão de ordens, planejamento da capacidade, programação e controle de estoques). Além disso, a empresa perde a oportunidade de obter produtos usados de fontes alternativas, ficando sujeita às montadoras e revendas.

A empresa 3 possui a característica B (necessidade de balancear o retorno dos produtos com a demanda). Para lidar com isso, é feito o seguinte: cada produto retornado corresponde a um produto a ser remanufaturado para o mesmo cliente que entregou o produto usado. Ou seja, para cada produto usado que é recebido pela empresa 3, automaticamente gera-se uma ordem de produção de um produto remanufaturado para o mesmo cliente que fez a entrega do produto usado. Dessa forma, a empresa 3 ameniza os efeitos da característica B no PCP, porém perde a oportunidade de vender para consumidores diferentes.

Na empresa 3 há a característica C (necessidade de desmontar os produtos retornados). Como método para coordenação entre as operações de desmontagem e remontagem, cada operador realiza todas as operações do início ao final do processo, ou seja, sem divisão do trabalho. Dessa forma, os efeitos complicadores dessa característica são atenuados, mas essa medida somente é possível atualmente porque a produção é em baixíssimo volume e variedade.

A característica D (incerteza quanto à taxa de recuperação dos materiais) existe na empresa 3. O método de controle da qualidade dos produtos retornados é feito da seguinte maneira: primeiramente os produtos são inspecionados visualmente. Em seguida são realizados testes manuais simples como, por exemplo, pressionamento de partes móveis. Com isso, os produtos retornados são classificados em três categorias: categoria A (praticamente 100% de reaproveitamento), B (de 60% a 70% de reaproveitamento) e C (cerca de 20% de

reaproveitamento). Com base nessa classificação são estipulados os preços que serão pagos pelos *cores*. Portanto, atualmente a empresa 3 possui poucos efeitos da característica D no PCP, segundo os respondentes.

A característica E (necessidade de uma rede de logística reversa) está presente na empresa 3, que atualmente recebe os *cores* de clientes e vende para cada um a mesma quantidade comprada. Dessa forma, a empresa evita as complicações da característica E, porém perde a oportunidade de obter e controlar o recebimento dos produtos usados, além de ficar dependente da coleta e transporte desses produtos.

Não há a característica F (necessidade de rastreamento ao longo do processo) na empresa 3, porque os produtos da empresa ao retornarem para serem remanufaturados não precisam ser remontados com a mesma combinação anterior. Assim, a empresa não necessita lidar com essa dificuldade. Portanto, para o PCP da empresa 3 não há efeitos da característica F.

Atualmente, a empresa 3 evita a característica G (alta variabilidade dos tempos de processamento). Nas operações de desmontagem, remanufatura (sendo apenas operações de limpeza - banho em solvente, jateamento e algumas vezes lixamento) e remontagem, os tempos de processamento são previsíveis / estáveis. As peças que necessitariam de usinagem são substituídas por peças novas. Dessa forma, não há problemas causados por variabilidade nos tempos de processamento para o PCP, mas o custo do produto remanufaturado tende a ser maior.

A característica H (roteiros estocásticos) está presente na empresa 3. Para evitar as complicações da característica H, a empresa 3 não a considera nas tomadas de decisão. Portanto, embora a empresa evite os efeitos complicadores da característica H no PCP, têm-se com isso uso ineficiente dos recursos produtivos.

Atualmente o atendimento preferencial das peças manufaturadas em função da alta demanda têm prejudicado um pouco as operações de remanufatura, sendo que até mesmo a mão de obra tem sido deslocada da remanufatura para a manufatura.

## 4.5 Estudo de caso 4

### 4.5.1 Descrição da empresa 4

A empresa 4 é fabricante mundial independente de motores diesel, que equipam caminhões, ônibus, barcos, tratores, colheitadeiras, trens e motores estacionários. No Brasil produz motores para diversos segmentos do mercado, entre eles caminhões de todos os portes, *pickups*, ônibus, aplicações estacionárias, máquinas de construção, equipamentos agrícolas, máquinas para mineração e aplicações marítimas.

A receita anual gira em torno de \$ 7.000.000, sendo a quantidade produzida de remanufaturados por ano entre 1600 a 1800, o que corresponde a aproximadamente 2% do total produzido de produtos manufaturados. A empresa remanufatura motores de aplicação automotiva pesada e industrial em três versões: parcial (bloco, virabrequim, comando, pistões e anéis), básica (versão parcial mais trem de engrenagem, cabeçote e cárter) e motor completo. O ingresso na atividade de remanufatura se deu em função da preocupação da empresa em garantir sobrevida aos produtos (“imagem do produto”, nas palavras do respondente) e oportunidades para melhorias no desenvolvimento de novos produtos e melhorias nos existentes pelo conhecimento adquirido nas operações de desmontagem e remanufatura.

O estudo de caso contou com a participação de um respondente, atual supervisor da área de remanufatura. O número de funcionários na remanufatura é de 18, sendo a produção totalmente sob encomenda. Os sistemas de PCP utilizados são o MRP, o sistema *kanban*, um *software* de gestão corporativa e um quadro de gestão visual/programação da produção. O PCP para a remanufatura é separado do PCP para a manufatura.

Atualmente a empresa 4 somente realiza internamente o recebimento de *cores*, avaliação, operações de limpeza e remontagem. A desmontagem e operações de usinagem são feitas por uma empresa subcontratada.

É avaliado pela empresa que os maiores obstáculos ao crescimento da atividade de remanufatura sejam o desconhecimento do mercado, que ainda não diferencia reconicionado de remanufaturado; tentativa de envio de produtos com baixíssima qualidade somente para obter maior retorno por parte de alguns clientes; cultura do consumidor de não acreditar que internamente o produto foi realmente colocado em condições de novo; e a

legislação de trânsito, especialmente a resolução 282 do CONTRAN (Conselho Nacional de Trânsito) que estabelece critérios para a regularização da numeração de motores dos veículos registrados ou a serem registrados no País, que dificulta o uso e aproveitamento de peças cujos antigos proprietários não regularizaram o motor antes de enviar à remanufatura.

#### **4.5.2 Características específicas da remanufatura na empresa 4**

A característica A (incerteza quanto à quantidade e momento de retorno) está presente na empresa 4, que obtém 100% dos produtos retornados de distribuidores. Para controlar as quantidades retornadas, a cada produto vendido a empresa exige um *core* em troca no prazo de até 60 dias após a entrega do produto remanufaturado. Dessa forma, a empresa controla a quantidade, mas não o momento exato da chegada dos retornos (que pode ocorrer em um dia ou até em sessenta dias). Portanto, os efeitos complicadores no PCP permanecem.

A empresa 4 possui a característica B (necessidade de balancear o retorno dos produtos com a demanda). O balanceamento do retorno dos produtos usados com a demanda é feito totalmente com base na carteira de pedidos. Assim, os efeitos dessa característica no PCP são amenizados, porém a empresa perde a oportunidade de atender diferentes tipos de clientes.

Na empresa 4 há a característica C (necessidade de desmontar os produtos retornados). Para evitar as complicações geradas por essa característica, atualmente a desmontagem é realizada por outra empresa subcontratada somente para isso. Portanto, embora os efeitos da característica C no PCP sejam evitados pela empresa 4, esta não usufrui da possibilidade de melhorar a qualidade de seus produtos, pois as condições dos produtos retornados (reveladas na operação de desmontagem) permitem que a empresa obtenha conhecimento a respeito de melhorias e desenvolvimento de novos produtos com base na avaliação do uso dos mesmos.

A característica D (incerteza quanto à taxa de recuperação dos materiais) existe na empresa 4. A empresa utiliza como método de controle da qualidade dos produtos retornados a avaliação visual (aceita ou não) dos motores recebidos fechados. Já os motores abertos são avaliados por completo e a empresa cobra pagamento pelas peças sem aproveitamento. O controle da taxa de recuperação dos materiais que compõem os produtos

retornados é feito da seguinte maneira: mensalmente são coletados os dados relativos a aproveitamento dos materiais após a desmontagem. Nesse ponto o departamento financeiro controla o uso de produtos novos para montar os produtos remanufaturados para evitar altos custos, com o objetivo de manter baixa a proporção de peças manufaturadas no produto remanufaturado. Essa taxa de recuperação é considerada previsível / estável. Portanto, na empresa 4 estão presentes os efeitos complicadores da característica D no PCP, mas, segundo o respondente, a empresa trabalha satisfatoriamente com isso.

A característica E (necessidade de uma rede de logística reversa) está presente na empresa 4. No entanto, os clientes é que entregam os *cores* com base nas compras de remanufaturados. Dessa forma, a empresa transfere a responsabilidade de obtenção e transporte dos produtos usados para seus clientes. Com isso, a empresa evita os efeitos complicadores da característica E no PCP, porém fica totalmente dependente dos seus clientes para a realização da logística reversa de seus produtos.

Não há a característica F (necessidade de rastreamento ao longo do processo) na empresa 4, porque os produtos da empresa ao retornarem para serem remanufaturados não necessitam ser remontados com a mesma combinação anterior. Com isso, não há efeitos complicadores da característica F no PCP da empresa 4.

A empresa 4 evita a característica G (alta variabilidade dos tempos de processamento) em sua operação. Isso é conseguido pela subcontratação de parte das operações da remanufatura, sendo realizadas apenas a limpeza das peças na própria empresa, considerada com tempos previsíveis / estáveis. Dessa forma, não há muitos problemas de variabilidade de tempos de processamento para o PCP, no entanto, o custo do produto remanufaturado tende a ser maior.

A característica H (roteiros estocásticos) está presente na empresa 4. Após a desmontagem, os roteiros de processamento são considerados previsíveis. Praticamente todas as peças passam pelas mesmas operações. Entretanto, as peças com necessidade de usinagem são tratadas pela empresa subcontratada. Dessa forma, embora exista a característica H na empresa 4, esta transfere parte das operações para a empresa subcontratada e realiza somente as operações de limpeza, que sempre seguem os mesmos roteiros. Além disso, as decisões tomadas, por exemplo, em termos de tamanho de lote, não consideram tal característica. Portanto, os efeitos complicadores da característica H no PCP são evitados, por um lado, por outro lado, a empresa 4 nessa situação fica dependente da empresa subcontratada para realizar parte das operações de remanufatura.

Uma complicação adicional relatada pelo respondente é a dificuldade de prever as vendas. A empresa enfrenta uma alta variação na demanda por produtos remanufaturados.

#### **4.6 Análise conjunta dos casos**

Levando-se em consideração os quatro estudos de caso, é possível estabelecer algumas relações.

Primeiramente, os estudos de caso foram realizados em grandes empresas multinacionais que atuam no setor de autopeças há muitos anos. Apenas o estudo de caso 1 é de uma empresa de pequeno porte, subcontratada pela multinacional que produz os produtos manufaturados originais. Nessa empresa subcontratada, o sistema é apenas de remanufatura. Dessa forma, três dos quatro casos foram realizados em sistemas híbridos (manufatura e remanufatura dentro da mesma empresa). Nota-se que todas as operações de remanufatura das empresas estudadas são relativamente pequenas, não ultrapassando 10% da produção total de produtos manufaturados em três dos quatro casos e chegando a 40% em apenas um dos casos. Um reflexo direto desse baixo volume de produção é a quantidade pequena de funcionários. Por exemplo, a empresa 3 possui atualmente apenas 4 pessoas como mão de obra direta.

Em segundo lugar, nota-se que a variedade de produtos remanufaturados em todas as empresas é baixa, com apenas um tipo de produto com poucas variações de modelo.

Outra uniformidade dos casos é que nenhuma das empresas necessita remontar os produtos com a mesma combinação inicial, ou seja, a característica F, necessidade de rastreamento ao longo do processo de remanufatura, não está presente.

Sobre o aspecto das complicações na operação de remanufatura, todas as empresas destacaram uma dificuldade adicional. A empresa 1 tem enfrentado variação na taxa de produção em função da baixa intensidade de capital da empresa, que na verdade é uma característica dos processos de remanufatura principalmente nas operações de desmontagem. As empresas 2 e 3 relataram que em função da alta demanda por peças manufaturadas, a remanufatura tem ficado em segundo plano, muitas vezes até ficando sem abastecimento de peças para a remontagem. Já a empresa 4 relatou dificuldades em realizar a previsão da demanda.



Segundo Sipper e Bulfin (1997), um problema existe quando o que está acontecendo (situação corrente) difere do que deveria estar acontecendo (situação objetivo). Tal problema pode ser uma necessidade, uma oportunidade ou ambos. Diante do problema, pode-se adotar uma dentre quatro abordagens, segundo Ackoff (1978):

- 1) tolerância – ignorar o problema com a esperança de que deixe de existir. Raramente é uma boa alternativa;
- 2) resolução – encontrar uma saída aceitável usando o senso comum. Produz resultados melhores que a anterior, mas a resposta não necessariamente é boa;
- 3) solução – usar métodos quantitativos e experimentais para obter a melhor solução diante da situação corrente;
- 4) dissolução – redesenhar o sistema para eliminar a causa. Somente deve ser utilizada se os custos e efeitos negativos não forem significantes.

No que diz respeito à maneira como cada uma das empresas lida com as características específicas da remanufatura, os quadros de 4.1 a 4.8 a seguir mostram quais abordagens descritas por Arckoff (1978) são adotadas em relação a cada característica e algumas consequências dessas ações tomadas em cada uma das empresas, de acordo com as descrições dos estudos de caso. Abaixo de cada quadro são feitas algumas análises.

<b>Empresa</b>	<b>Classificação da Abordagem</b>	<b>Detalhamento da abordagem seguida pela empresa</b>	<b>Efeitos complicadores no PCP da empresa</b>	<b>Consequências negativas da abordagem seguida</b>
1	Dissolução	A empresa obtém os produtos para serem remanufaturados de agências terceirizadas	São atenuados	Dependência das agências; Perda da oportunidade de obter produtos usados de fontes alternativas
2	Dissolução	A empresa obtém os produtos para serem remanufaturados de distribuidores	Permanecem	Dependência dos distribuidores; Perda da oportunidade de obter produtos usados de fontes alternativas
3	Dissolução	A empresa obtém os produtos para serem remanufaturados de montadoras e de centros técnicos de revenda	Permanecem	Dependência das montadoras e revendas; Perda da oportunidade de obter produtos usados de fontes alternativas
4	Resolução	A cada produto vendido a empresa exige um <i>core</i> em troca	Permanecem	Nenhuma

**QUADRO 4.1 – Ações das empresas e consequências em relação à característica A (incerteza quanto à quantidade e momento de retorno de produtos usados)**

Diante da característica A, nota-se que todas as empresas tentam evitá-la. As empresas 1, 2 e 3 obtêm os *cores* de outras empresas e a empresa 4 exige que a cada produto remanufaturado vendido seja fornecido um *core* em troca. Com essas medidas, as empresas 1 e 4 atenuam os efeitos complicadores da característica A, enquanto as empresas 2 e 3 ainda precisam lidar com os mesmos. Com exceção da empresa 4, as demais sofrem, como principais efeitos negativos, com a dependência das empresas prestadoras do serviço de coleta e entrega dos *cores* e com a perda da oportunidade de obter produtos usados de fontes alternativas como, por exemplo, diretamente dos clientes.

<b>Empresa</b>	<b>Classificação da Abordagem</b>	<b>Detalhamento da abordagem seguida pela empresa</b>	<b>Efeitos complicadores no PCP da empresa</b>	<b>Consequências negativas da abordagem seguida</b>
1	Resolução	A empresa atende somente à carteira de pedidos e a um único cliente	São atenuados	Perda da oportunidade de atender outros clientes
2	Resolução	A empresa atende somente à carteira de pedidos e a um único cliente	São atenuados	Perda da oportunidade de atender outros clientes
3	Resolução	A empresa atende a carteira de pedidos gerada pela entrega de <i>cores</i>	São atenuados	Perda da oportunidade de atender outros clientes
4	Resolução	A empresa atende somente à carteira de pedidos	São atenuados	Perda da oportunidade de atender outros clientes

**QUADRO 4.2 – Ações das empresas e consequências em relação à característica B (necessidade de balancear o retorno dos produtos com a demanda)**

Frente à característica B, todas as empresas utilizam como forma de atendimento da demanda a produção sob encomenda. Além disso, as empresas 1 e 2 possuem apenas um cliente. Isso faz com que estas percam a oportunidade de atender outros clientes, ou seja, aumentem o faturamento. Com essas medidas, todas conseguem atenuar os complicadores da característica B.

<b>Empresa</b>	<b>Classificação da Abordagem</b>	<b>Detalhamento da abordagem seguida pela empresa</b>	<b>Efeitos complicadores no PCP da empresa</b>	<b>Consequências negativas da abordagem seguida</b>
1	Resolução	A empresa desmonta somente a quantidade necessária para atender aos pedidos	Permanecem	Geração de estoques desnecessários
2	Resolução	A empresa não utiliza métodos específicos	Permanecem	Geração de altos estoques intermediários
3	Resolução	O mesmo operador que desmonta o produto remonta-o no final do processo	São atenuados	Dificuldade de manter esse método se o volume e variedade de produtos aumentarem
4	Dissolução	A empresa subcontrata a desmontagem	São atenuados	Perda de conhecimento a respeito de melhorias e desenvolvimento de novos produtos; Dependência da empresa subcontratada

**QUADRO 4.3 – Ações das empresas e consequências em relação à característica C (necessidade de desmontar os produtos retornados)**

Nota-se que os métodos para lidar com a característica C são bastante diferentes para cada empresa. A dissolução realizada pela empresa 4 é a que gera maiores consequências negativas, porém as resoluções apresentadas pelas empresas 1, 3 e 2 respectivamente também geram dificuldades como estoques desnecessários e impossibilidade de manter o mesmo método no caso de haver um aumento no volume de vendas da empresa. Com essas medidas, as empresas 3 e 4 conseguem atenuar os efeitos complicadores para o PCP, já as empresas 1 e 2 precisam lidar com as dificuldades inerentes da característica C.

<b>Empresa</b>	<b>Classificação da Abordagem</b>	<b>Detalhamento da abordagem seguida pela empresa</b>	<b>Efeitos complicadores no PCP da empresa</b>	<b>Consequências negativas da abordagem seguida</b>
1	Resolução	A empresa faz análise de produtos em garantia retornados e controle dos dados históricos dos fornecedores	Permanecem	Dificuldade de balancear retorno com a demanda
2	Resolução	A empresa exige que os produtos retornados sejam de sua marca	São atenuados	Perda da oportunidade de remanufaturar produtos de outros fabricantes
3	Resolução	A empresa classifica os produtos retornados em termos de qualidade	São atenuados	Nenhuma
4	Resolução	A empresa avalia dados históricos dos produtos	Permanecem	Nenhuma

**QUADRO 4.4 – Ações das empresas e consequências em relação à característica D (incerteza quanto à taxa de recuperação dos materiais que compõem os produtos retornados)**

Para a característica D, as empresas 3 e 4 possuem resoluções que atualmente atendem as suas necessidades. Já a empresa 1, apesar de também possuir um resolução, em função da alta imprevisibilidade da taxa de recuperação dos materiais, ainda tem dificuldades para a realização do PCP. Por fim, a empresa 2, por exigir que o produto tenha sido fabricado pela própria, perde a oportunidade de remanufaturar outros produtos disponíveis no mercado. Portanto, com essas medidas, as empresas 2, 3 e 4 atenuam as dificuldades inerentes da característica D, já a empresa 1 continua precisando lidar com os complicadores.

Empresa	Classificação da Abordagem	Detalhamento da abordagem seguida pela empresa	Efeitos complicadores no PCP da empresa	Consequências negativas da abordagem seguida
1	Dissolução	A empresa obtém os produtos retornados por meio de terceiros e clientes	São atenuados	Perda da oportunidade de ter sua operação integrada com as atividades de coleta de produtos usados
2	Dissolução	A empresa recebe produtos retornados unicamente de distribuidores	São atenuados	Dependência dos distribuidores
3	Resolução	A empresa recebe e vende exatamente a mesma quantidade de <i>cores</i>	São atenuados	Dependência da coleta e transporte desses produtos
4	Resolução	A empresa exige a entrega de <i>cores</i> com base nas compras	São atenuados	Dependência dos seus clientes para a realização da logística reversa

**QUADRO 4.5 – Ações das empresas e consequências em relação à característica E (necessidade de uma rede de logística reversa)**

A necessidade de uma rede de logística reversa, característica E, é dissolvida pelas empresas 1 e 2, que obtém os *cores* de outras empresas. Já as empresas 3 e 4 obtém os *cores* com base na venda, com a diferença que a empresa 3 recebe os *cores* antes de vender o produto remanufaturado e a empresa 4 recebe os *cores* após a venda. Em todos os casos, a principal consequência negativa é a dependência das empresas que realizam a atividade. Com essas medidas, embora haja consequências negativas, todas as empresas atenuam os efeitos complicadores da característica E.

Empresa	Classificação da Abordagem	Detalhamento da abordagem seguida pela empresa	Efeitos complicadores no PCP da empresa	Consequências negativas da abordagem seguida
1	-	não precisa lidar com essa dificuldade	-	-
2	-	não precisa lidar com essa dificuldade	-	-
3	-	não precisa lidar com essa dificuldade	-	-
4	-	não precisa lidar com essa dificuldade	-	-

**QUADRO 4.6 – Ações das empresas e consequências em relação à característica F (necessidade de rastreamento ao longo do processo)**

A indústria de autopeças atualmente apresenta a particularidade de não trabalhar com *cores* que devem ser remontados com a mesma combinação. Assim, nenhuma das empresas dos estudos de caso lida com a característica F.

Empresa	Classificação da Abordagem	Detalhamento da abordagem seguida pela empresa	Efeitos complicadores no PCP da empresa	Consequências negativas da abordagem seguida
1	Tolerância	A empresa não toma nenhuma ação para resolver o problema	Permanecem	Atrasos nas entregas
2	-	Atualmente não precisa lidar com essa dificuldade	-	-
3	Dissolução	Não realiza operações de usinagem	São evitados	Aumento do custo do produto remanufaturado
4	Dissolução	Não realiza operações de usinagem (subcontratada)	São evitados	Aumento do custo do produto remanufaturado

**QUADRO 4.7 – Ações das empresas e consequências em relação à característica G (alta variabilidade dos tempos de processamento)**

Dentre as empresas dos estudos de caso, somente a empresa 2 não apresenta a característica G. Nas empresas 3 e 4 há somente operações de limpeza, pois as peças que necessitariam de usinagem são substituídas por peças novas na empresa 3, e a usinagem é subcontratada pela empresa 4. A empresa 1 não toma nenhuma ação e a consequência principal é a ocorrência de atrasos nas entregas, gerando um baixo nível de serviço ao consumidor. Nas empresas 3 e 4 há um aumento do custo do produto remanufaturado.

<b>Empresa</b>	<b>Classificação da Abordagem</b>	<b>Detalhamento da abordagem seguida pela empresa</b>	<b>Efeitos complicadores no PCP da empresa</b>	<b>Consequências negativas da abordagem seguida</b>
1	Tolerância	A empresa não considera a característica ao tomar decisões	São evitados	Utilização não racional dos recursos produtivos
2	Tolerância	A empresa não considera a característica ao tomar decisões	São evitados	Utilização não racional dos recursos produtivos
3	Tolerância	A empresa não considera a característica ao tomar decisões	São evitados	Utilização não racional dos recursos produtivos
4	Dissolução	A empresa não considera a característica ao tomar decisões e subcontrata algumas operações de remanufatura	São evitados	Utilização não racional dos recursos produtivos; Dependência da empresa subcontratada

**QUADRO 4.8 – Ações das empresas e consequências em relação à característica H (roteiros estocásticos)**

Por fim, com relação à característica H, as quatro empresas não a consideram ao tomar decisões no âmbito do PCP, o que gera uma utilização não racional dos recursos produtivos e a perda de oportunidade de reduzir custos, por exemplo, tomando decisões que favoreçam a utilização de roteiros de menor custo. No caso da empresa 4, há também uma subcontratação das operações de usinagem da remanufatura, ficando somente com as operações de limpeza, o que simplifica os roteiros. Como consequência principal, no caso da empresa 4, tem-se a dependência da empresa subcontratada. Com essas medidas, embora existam consequências negativas, as quatro empresas conseguem evitar os efeitos complicadores da característica H na tomada de decisão.

A seguir os resultados dos quadros 4.1 a 4.8 são resumidos no quadro 4.9, no qual são identificadas as reais necessidades de soluções (modelos e/ou métodos) para o PCP na remanufatura das empresas estudadas. Se a empresa possui a característica específica da remanufatura, utiliza como abordagem tolerância, resolução ou dissolução, os efeitos complicadores permanecem ou surge(m) consequência(s) negativa(s), então há necessidade de desenvolvimento de soluções para o PCP da empresa que tratem da característica específica da remanufatura em questão.

Empresa	Característica específica da remanufatura	Abordagem	Os efeitos complicadores permanecem?	Surge(m) consequência(s) negativa(s)?	Necessita de solução para o PCP?
1	A	Dissolução	Não	Sim	Sim
	B	Resolução	Não	Sim	Sim
	C	Resolução	Sim	Sim	Sim
	D	Resolução	Sim	Sim	Sim
	E	Dissolução	Não	Sim	Sim
	G	Tolerância	Sim	Sim	Sim
	H	Tolerância	Não	Sim	Sim
	2	A	Dissolução	Sim	Sim
B		Resolução	Não	Sim	Sim
C		Resolução	Sim	Sim	Sim
D		Resolução	Não	Sim	Sim
E		Dissolução	Não	Sim	Sim
H		Tolerância	Não	Sim	Sim
3	A	Dissolução	Sim	Sim	Sim
	B	Resolução	Não	Sim	Sim
	C	Resolução	Não	Sim	Sim
	D	Resolução	Não	Não	Não
	E	Resolução	Não	Sim	Sim
	G	Dissolução	Não	Sim	Sim
	H	Tolerância	Não	Sim	Sim
	4	A	Resolução	Sim	Não
B		Resolução	Não	Sim	Sim
C		Dissolução	Não	Sim	Sim
D		Resolução	Sim	Não	Sim
E		Resolução	Não	Sim	Sim
G		Dissolução	Não	Sim	Sim
H		Dissolução	Não	Sim	Sim

#### Legenda

- A - Incerteza quanto à quantidade e momento de retorno
- B - Necessidade de balancear o retorno dos produtos com a demanda
- C - Necessidade de desmontar os produtos retornados
- D - Incerteza quanto à taxa de recuperação dos materiais
- E - Necessidade de uma rede de logística reversa
- F - Necessidade de rastreamento ao longo do processo
- G - Alta variabilidade dos tempos de processamento
- H - Roteiros estocásticos

#### QUADRO 4.9 – Identificação das necessidades de soluções para o PCP das empresas estudadas

Diante do quadro 4.9, nota-se que, embora as empresas tentem de alguma maneira lidar com as características específicas da remanufatura, em todos os casos há tentativas de simplificação das ações (tolerância, resolução ou dissolução). Além disso, essas simplificações nem sempre oferecem a vantagem de atenuar os efeitos complicadores no PCP. Ainda mais, essas medidas tomadas pelas empresas, embora atualmente atenuem ou evitem os efeitos complicadores para o PCP e/ou não tenham consequências negativas, não são sustentáveis no longo prazo, em função da perspectiva de desenvolvimento da atividade no país, do surgimento de leis ambientais mais rigorosas, da crescente carência de recursos materiais e energéticos, da quebra de paradigma a respeito da qualidade dos produtos

remanufaturados e, finalmente, da ampliação de negócios dentro do setor em função da lucratividade comprovada. Dessa forma, as maneiras também simplificadas de realização das atividades do PCP deixarão de existir ou deixarão de ser desejáveis do ponto de vista competitivo nessas operações. Portanto, mesmo com algumas iniciativas para resolver os problemas causados pelas características específicas da remanufatura, fazem-se necessárias pesquisas sobre métodos e modelos para o PCP dessas empresas tratarem melhor tais características.

#### 4.7 Comparação entre a revisão da literatura e os estudos de caso

Conforme visto no capítulo 3 da presente tese, na literatura sobre PCP na remanufatura já existem algumas soluções propostas. Por exemplo, Maples *et al.* (2005) propõem um método para previsão da demanda, Geyer *et al.* (2007) e Golany *et al.* (2001) propõem algoritmos para se realizar o planejamento agregado, Depuy *et al.* (2007) e Ferguson *et al.* (2007) propõem métodos para realizar programação mestre, Ferrer e Whybark (2001) e Nakashima *et al.* (2004) desenvolvem modelos de coordenação de ordens, Franke *et al.* (2006) apresentam um modelo para determinação da capacidade produtiva, Hou e Zhang (2005) e Teunter *et al.* (2008) focam análises de otimização de problemas de *scheduling*, e muitos outros autores como Pan *et al.* (2009), Richter e Sombrutzki (2000), Richter e Weber (2001), Konstantaras e Papachristos (2008) e Teunter *et al.* (2006) propõem soluções para o controle de estoques.

Assim, outra análise imprescindível dos resultados dos estudos de caso é a comparação destes com os resultados da revisão da literatura. Na revisão de literatura do presente trabalho foram feitos apontamentos a respeito das necessidades de pesquisa para o PCP na remanufatura com relação às características específicas da remanufatura. Ou seja, de acordo com o que foi publicado na literatura sobre gestão da produção na remanufatura foi possível enumerar algumas lacunas ainda existentes sobre soluções para o PCP para lidar com a complexidade inerente às incertezas existentes nessa atividade. O quadro 4.10 a seguir mostra o resultado obtido. Os espaços em branco representam as lacunas.



Característica específica da remanufatura	Atividade do PCP							
	Previsão	Planejamento agregado	Programa mestre de produção	Logística	Coordenação de ordens	Planejamento da capacidade	<i>Scheduling</i>	Gestão e controle de estoques
A	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
B	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
C			✓	✓	✓	✓	✓	✓
D	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
E	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
F				✓			✓	✓
G	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
H				✓	✓	✓	✓	

### Legenda

- A - Incerteza quanto à quantidade e momento de retorno
- B - Necessidade de balancear o retorno dos produtos com a demanda
- C - Necessidade de desmontar os produtos retornados
- D - Incerteza quanto à taxa de recuperação dos materiais
- E - Necessidade de uma rede de logística reversa
- F - Necessidade de rastreamento ao longo do processo
- G - Alta variabilidade dos tempos de processamento
- H - Roteiros estocásticos

### QUADRO 4.10 – Lacunas na literatura sobre atividades do PCP na remanufatura em relação às características específicas da remanufatura

Dessa forma, pelo resultado da revisão da literatura, são necessárias soluções de previsão para lidar com as características C, F e H; soluções de planejamento agregado para lidar com as características C, F e H; soluções de programação mestre da produção para lidar com as características F e H; soluções de sistemas de coordenação de ordens para lidar com a característica F; soluções de planejamento da capacidade para lidar com a característica F; e soluções de gestão e controle de estoques para lidar com a característica H.

Os resultados dos estudos de caso apontam que sejam necessárias soluções para todas as características, com exceção da F, que são as características presentes em todas as empresas e ainda sem solução para qualquer uma das atividades do PCP, conforme quadro 4.11 a seguir. Os espaços em branco representam as lacunas.

Característica específica da remanufatura	Atividade do PCP							
	Previsão	Planejamento agregado	Programa mestre de produção	Logística	Coordenação de ordens	Planejamento da capacidade	<i>Scheduling</i>	Gestão e controle de estoques
A								
B								
C								
D								
E								
F	√	√	√	√	√	√	√	√
G								
H								

### Legenda

- A - Incerteza quanto à quantidade e momento de retorno
- B - Necessidade de balancear o retorno dos produtos com a demanda
- C - Necessidade de desmontar os produtos retornados
- D - Incerteza quanto à taxa de recuperação dos materiais
- E - Necessidade de uma rede de logística reversa
- F - Necessidade de rastreamento ao longo do processo
- G - Alta variabilidade dos tempos de processamento
- H - Roteiros estocásticos

### QUADRO 4.11 – Lacunas na prática sobre atividades do PCP na remanufatura em relação às características específicas da remanufatura identificadas nos estudos de caso

Portanto, há interseções entre as lacunas existentes na pesquisa (literatura) e lacunas existentes na prática no setor de remanufatura de autopeças (estudos de caso). Essas lacunas são representadas pela existência das características específicas da remanufatura nessas empresas e/ou práticas insatisfatórias com relação aos problemas causados pelas características específicas da remanufatura e ausência de pesquisas publicadas na literatura sobre soluções para atividades do PCP para essas características. O quadro 4.12 a seguir mostra as interseções entre os quadros 4.10 e 4.11, que são justamente as lacunas comuns à literatura e à prática.

Característica específica da remanufatura	Atividade do PCP							
	Previsão	Planejamento agregado	Programa mestre de produção	Logística	Coordenação de ordens	Planejamento da capacidade	<i>Scheduling</i>	Gestão e controle de estoques
A								
B								
C	Lacuna	Lacuna						
D								
E								
F								
G								
H	Lacuna	Lacuna	Lacuna					Lacuna

### Legenda

- A - Incerteza quanto à quantidade e momento de retorno
- B - Necessidade de balancear o retorno dos produtos com a demanda
- C - Necessidade de desmontar os produtos retornados
- D - Incerteza quanto à taxa de recuperação dos materiais
- E - Necessidade de uma rede de logística reversa
- F - Necessidade de rastreamento ao longo do processo
- G - Alta variabilidade dos tempos de processamento
- H - Roteiros estocásticos

### QUADRO 4.12 – Lacunas na prática sobre atividades do PCP na remanufatura em relação às características específicas da remanufatura identificadas nos estudos de caso

Essas interseções são:

- a) previsão e C e H, ou seja, necessidade de desmontar os produtos retornados e roteiros estocásticos;
- b) planejamento agregado e C e H, ou seja, necessidade de desmontar os produtos retornados e roteiros estocásticos;
- c) programação mestre da produção e H (roteiros estocásticos); e
- d) gestão e controle de estoques e H (roteiros estocásticos).

## 4.8 Considerações finais

Os objetivos do presente capítulo são fazer um estudo exploratório da atividade de remanufatura no setor de autopeças, identificar as características específicas da remanufatura presentes nas operações de remanufatura das empresas desse setor, descrever como essas empresas lidam com as características específicas da remanufatura e identificar quais são as necessidades de soluções e estudos para os problemas enfrentados por essas empresas ao realizar o planejamento e controle da produção.

As principais conclusões resultantes dos objetivos enumerados acima são:

- a) as empresas de remanufatura de autopeças estudadas trabalham de maneira simplificada, pois atendem somente a um tipo de cliente, o PCP da manufatura é separado do PCP da remanufatura, há baixa variedade de produtos, há baixo volume de produção, a produção é somente sob encomenda, há poucas operações na remanufatura ou então apenas operações de limpeza, os sistemas são híbridos com abastecimento de peças manufaturadas diretamente da operação de manufatura. Isso faz com que essas operações atenuem alguns dos efeitos complicadores das características específicas da remanufatura no planejamento e controle da produção, porém, faz também com que cada uma das empresas perca alguma(s) oportunidade(s) de melhoria de sua competitividade;
- b) as características específicas da remanufatura presentes nessas empresas são incerteza quanto à quantidade e momento de retorno, necessidade de balancear o retorno dos produtos com a demanda, necessidade de desmontar os produtos retornados, incerteza quanto à taxa de recuperação dos materiais, necessidade de uma rede de logística reversa, alta variabilidade dos tempos de processamento (com exceção da empresa 2) e roteiros estocásticos;
- c) os principais meios para lidar com essas características específicas da remanufatura são atender a demanda por meio da carteira de pedidos, formar a carteira de pedidos de acordo com os produtos retornados (ou seja, vender para cada cliente exatamente a quantidade de *cores* entregues), atender somente um tipo de cliente (distribuidores ou revendedores de peças de reposição), fazer exigências com relação à qualidade do *core* (por exemplo, que não estejam faltando peças, que o produto seja da mesma marca manufaturada), desmontar todos os *cores* (pois todo *core* entregue deve ser transformado em um produto remanufaturado), utilizar índices de aproveitamento de peças ou histórico de aproveitamento de peças. Nenhuma das empresas utiliza métodos/modelos especificamente desenvolvidos para o PCP na remanufatura;
- d) há interseções entre as lacunas existentes na pesquisa e lacunas existentes na prática no setor de remanufatura de autopeças. Essas lacunas são representadas pela existência das características específicas da remanufatura nessas empresas e ausência de pesquisas publicadas na literatura sobre soluções para atividades do PCP para essas características. Essas interseções são previsão e C e H; planejamento agregado e C e H; programação mestre da produção e H; e gestão e controle de estoques e H.

As análises apresentadas no presente capítulo revelam que, a princípio, as empresas de remanufatura de autopeças estudadas, representado por quatro das cinco empresas participantes da Associação Nacional dos Remanufuradores de Autopeças, tentam evitar problemas com relação ao PCP em função das características específicas da

remanufatura, simplificando e até subcontratando ou terceirizando algumas atividades. Todavia, essas simplificações ou subcontratações/terceirizações somente são possíveis em função da situação atual dessas empresas em relação aos seus mercados consumidores. Porque no presente momento, com um mercado ainda restrito, é possível manter as operações nas condições simplificadas descritas. Entretanto, essa condição do mercado tende a mudar em função do desenvolvimento da atividade no país, do surgimento de leis ambientais mais rigorosas, da crescente carência de recursos materiais e energéticos, da quebra de paradigma a respeito da qualidade dos produtos remanufaturados e, finalmente, da ampliação de negócios dentro do setor em função da lucratividade comprovada. Com tudo isso, as simplificações descritas anteriormente não são sustentáveis no médio e longo prazo e, como consequência, complicadores atualmente amenizados farão parte da realidade enfrentada por essas empresas. Dessa forma, as maneiras também simplificadas de realização das atividades do PCP deixarão de existir ou deixarão de ser desejáveis do ponto de vista competitivo nessas operações.

Por fim, destaca-se aqui que, apesar de as características específicas da remanufatura estarem tratadas de maneira separada nas análises do presente capítulo, métodos, modelos e estudos que lidam com mais de uma ou todas as características de maneira integrada representam ainda lacunas tanto na prática quanto na literatura sobre o PCP na remanufatura, como demonstrado no capítulo 3.

## **5 MODELAGEM MATEMÁTICA PARA OTIMIZAR O PROGRAMA MESTRE DE DESMONTAGEM CONSIDERANDO ROTEIROS ESTOCÁSTICOS**

### **5.1 Introdução**

Em função dos resultados dos capítulos 3 e 4, foram identificadas seis interseções entre as lacunas existentes na literatura e as lacunas existentes na prática em algumas remanufaturas do setor de autopeças em relação às atividades do PCP:

- a) modelos/métodos para previsão considerando a característica necessidade de desmontar os produtos retornados;
- b) modelos/métodos para previsão considerando a característica roteiros estocásticos;
- c) modelos/métodos para planejamento agregado considerando a característica necessidade de desmontar os produtos retornados;
- d) modelos/métodos para planejamento agregado considerando a característica roteiros estocásticos;
- e) modelos/métodos para programação mestre da produção considerando a característica roteiros estocásticos; e
- f) modelos/métodos para gestão e controle de estoques considerando a característica roteiros estocásticos.

Diante desse resultado, o presente capítulo visa, por meio de uma proposta, preencher uma dessas lacunas. A lacuna selecionada é a necessidade de modelos/métodos para a realização da atividade programação mestre da produção considerando a característica roteiros estocásticos. Tal lacuna foi selecionada tendo em vista oferecer uma maior contribuição com a prática atual da remanufatura de autopeças. Isso porque as empresas dos estudos de caso, atualmente, têm pouca necessidade de modelos de previsão e de planejamento agregado em função da forma como atendem a demanda (carteira de pedidos) e da pequena variedade de produtos remanufaturados. E, por outro lado, a literatura sobre gestão e controle de estoques é bastante vasta, conforme visto no capítulo 3. Assim, optou-se, dentre as atividades do PCP identificadas como lacunas, pela atividade que é realizada por todas as empresas dos estudos de caso, porém sem seguir nenhum modelo/método específico, e que possui, relativamente às outras atividades identificadas como lacunas, menor quantidade de pesquisas publicadas na literatura.

O presente capítulo está estruturado como se segue. A seção 5.2 traz uma pesquisa bibliográfica que avalia o ineditismo da proposta a ser realizada. A seção 5.3 mostra os quatro passos do estudo realizado, a saber, definição do problema, construção, solução e validação do modelo matemático. Esses passos estão de acordo com as fases usuais da implementação da pesquisa operacional segundo as visões de Taha (2008), Hillier e Lieberman (2010), Andrade (2002) e Miguel *et al.* (2010). Na seção 5.4 o modelo é utilizado para mostrar uma aplicação prática por meio do uso de dados obtidos em uma remanufatura de embreagens automotivas. Finalmente, na seção 5.5 são apresentadas as conclusões do capítulo.

## 5.2 Pesquisa bibliográfica sobre o problema estudado

Para verificar o ineditismo da proposta da presente tese, foi realizada uma ampla pesquisa bibliográfica sobre o assunto em bases de dados acadêmicos. As bases escolhidas foram Google Acadêmico ([www.scholar.google.com.br](http://www.scholar.google.com.br)), por se tratar de uma fonte de dados mais ampla, inclusive com buscas que abrangem também sites de universidades e organizações de pesquisa, e que contempla diversas áreas do conhecimento e Compendex ([www.engineeringvillage2.org](http://www.engineeringvillage2.org)), por se tratar de uma fonte de dados mais específica das áreas da engenharia. A pesquisa foi realizada em etapas, partindo-se de uma busca mais geral para sucessivas buscas mais específicas, por meio da adição de palavras-chaves mais diretamente relacionadas ao assunto, da seguinte maneira:

- etapa 1: palavras-chaves “*stochastic*” e “*routings*”. Nessa etapa o objetivo foi identificar as pesquisas que abordam roteiros estocásticos e como tratam o problema;
- etapa 2: palavras-chaves “*planning*”, “*uncertainty*”, “*stochastic*” e “*probabilistic*”. Nessa etapa, o objetivo foi identificar trabalhos que lidam com planejamento em situações de incerteza;
- etapa 3: palavras-chaves “*remanufacturing*”, “*planning*”, “*uncertainty*”, “*stochastic*” e “*probabilistic*”. Nessa etapa, o objetivo foi refinar os resultados da etapa anterior, acrescentando a palavra-chave *remanufacturing* para verificar, particularmente na remanufatura, pesquisas que tratam de planejamento sob condições de incerteza;
- etapa 4: palavras-chaves “*planning*”, “*production*”, “*control*”, “*master*”, “*scheduling*”, “*disassembly*”, “*uncertainty*”, “*routings*”, “*stochastic*”, “*probabilistic*”. Finalmente, nessa

etapa o objetivo foi identificar trabalhos que tratassem especificamente do tema da presente tese, incluindo todas as palavras-chave do problema.

Em todas as etapas, as palavras-chaves foram buscadas em qualquer lugar do artigo, no Google Acadêmico, e no assunto, título e resumo, no Compendex. Nas etapas 1 e 2, não foram limitadas datas de publicação, e nas etapas 3 e 4, limitou-se a busca para publicações entre 2009 (ano final da revisão da literatura realizada no capítulo 3 desta tese) e 2011. Nas etapas 1 e 2, em função da grande quantidade de registros, o autor limitou-se a ler apenas os resumos dos artigos considerados mais relacionados com o tema (esta relação foi reconhecida a partir do título), e apenas nos casos em que o resumo indicava ser proveitoso, a ler o artigo por completo. Nas etapas 3 e 4 os artigos foram lidos na íntegra. As buscas foram realizadas ao longo do mês de setembro de 2011. A seguir são descritos brevemente os resultados dessa pesquisa.

As pesquisas sobre roteiros estocásticos estão presentes principalmente em trabalhos da área de transportes e telecomunicação como, por exemplo, nos trabalhos de Lin (2009), Jula *et al.* (2006), Li *et al.* (2008), Li *et al.* (2010) e Lin (2009). Nesses trabalhos, no entanto, a abordagem do problema é diferente em relação à remanufatura, pois em problemas de transporte e redes de informação, as rotas não são probabilísticas. As variáveis aleatórias são demanda, intensidade de tráfego, tempo de viagem, preço de combustíveis, falha (de uma determinada rota em uma rede de comunicação), condições climáticas (tráfego aéreo), etc. Nesses casos, as variáveis de decisão são a quantidade a ser estocada em determinados pontos da rede de logística, o quanto transportar de um ponto a outro, que rota seguir, número de centros de distribuição a serem fixados em uma rede de abastecimento, etc. E os objetivos normalmente são minimizar custos (distância percorrida, tempo necessário para fazer entregas, etc.), maximizar lucros e maximizar a confiabilidade da rede (de comunicação). Revisões bibliográficas sobre problemas dinâmicos e estocásticos em transportes podem ser vistas em Ghiani *et al.* (2003) e Sahinidis (2004). Esses autores, entre outras conclusões, enumeram os principais métodos utilizados para tratar dos problemas típicos, quais sejam, simulação, programação robusta, técnica *fuzzy*, algoritmos genéticos e programação dinâmica estocástica.

Com relação à pesquisa relacionada com planejamento sob incertezas, os trabalhos recentes de Lee *et al.* (2009), Ierapetritou e Li (2009), Wazed *et al.* (2009) e Verderame *et al.* (2010) fazem revisões amplas na literatura. As pesquisas relacionadas a esse assunto utilizam-se principalmente de programação matemática, simulação e teoria de filas. As principais variáveis aleatórias são demanda, preço de matérias-primas, quebra de



equipamentos, *lead times*, tempos de *setup*, etc. As variáveis de decisão variam bastante, sendo as mais comuns, determinação de tamanho de lotes, quando produzir, reprogramação de tarefas, níveis de estoque, número de armazéns, etc. Os principais desafios para o planejamento e programação sob incertezas, segundo esses autores, é desenvolver modelos matemáticos que descrevam as reais particularidades importantes das situações ao mesmo tempo em que possam ser resolvidos em tempo hábil. Além disso, comparações entre as diversas técnicas utilizadas para tratar esses problemas ainda são necessárias.

Mais especificamente na remanufatura, recentemente, ou seja, entre 2009 e 2011, vários trabalhos tratam do PCP, porém as incertezas inerentes aos processos de remanufatura ainda estão pouco explorados na literatura (WANG *et al.*, 2010).

A determinação de tamanhos de lotes de remanufatura, manufatura e descarte continua sendo um dos temas mais tratados na literatura sobre PCP na remanufatura. Vários autores abordam esse tipo de problema, cada qual se diferenciando dos demais principalmente: (i) pelo tipo de abordagem de pesquisa utilizada como, por exemplo, programação linear robusta (WEI *et al.*, 2010), algoritmos genéticos (ZHANG *et al.*, 2010), programação dinâmica (PAN *et al.*, 2009), busca tabu (PIÑEYRO e VIERA, 2010), modelo do sistema MRP (BARBA-GUTIÉRREZ *et al.*, 2008), modelo do lote econômico (KONSTANTARAS e SKOURI, 2010; ZHOU *et al.*, 2010; ALINOVIA *et al.*, 2011), etc.; (ii) com relação às características dos sistemas como, por exemplo, apenas remanufatura (LI *et al.*, 2009) ou sistema híbrido (AHISKA e KING, 2010; WANG *et al.*, 2010); (iii) pelas características específicas da remanufatura consideradas como, por exemplo, incerteza na quantidade e momento de retorno (GAN e SU, 2009), incerteza no retorno e demanda (SHI *et al.*, 2010; SHI *et al.*, 2011), incerteza na qualidade (LIU e YANG, 2009; DENIZEL *et al.*, 2010; KARAMOUZIAN *et al.*, 2010), etc. Um ponto em comum desses trabalhos é a determinação do objetivo dos modelos, que ou é diretamente para minimizar o custo total como, por exemplo, em Feng e Viswanathan (2010) e Bagherpour *et al.* (2009), ou indiretamente, pela consideração da maximização do lucro como, por exemplo em Doh e Lee (2009).

A determinação de níveis de estoque e estoques de segurança também foi tratada por algumas pesquisas como em Aksoy e Gupta (2010), Konstantaras *et al.* (2010), Nenes *et al.* (2010), Pellerin *et al.* (2009) e Pellerin e Gharbi (2009). Outro ponto ainda relacionado à gestão e controle de estoques abordado por alguns pesquisadores é a determinação do número e tamanhos de ciclos produtivos como, por exemplo, em Roy *et al.* (2009), Teunter *et al.* (2009) e Xiaoyan e Fenglian (2009).

O planejamento de redes de logística reversa também recebeu atenção de diversos autores. Subramoniam *et al.* (2009) e Subramoniam *et al.* (2010) consideram que decisões estratégicas em remanufatura e logística reversa são pouco exploradas na literatura e fazem uma revisão das pesquisas publicadas e um *survey* na área voltada para a pós venda da indústria automobilística. Di e Wang (2009) e Wu (2009) trabalham com o planejamento da rede ótima de logística reversa (número de manufaturas, remanufaturas, centros de distribuição e de coleta). Georgiadis e Athanasiou (2010) tratam do planejamento da capacidade sujeito a diferenças entre os ciclos de vida, tempo de uso e padrão de retorno de dois tipos de produtos. Hua (2009) avalia, por meio de simulação, o efeito chicote em um sistema híbrido causado pelo lead time da remanufatura e pela quantidade e momento de retorno. Pokharel e Mutha (2009) realizam uma revisão bibliográfica sobre pesquisas nos diversos aspectos da logística reversa, sendo um desses aspectos justamente a remanufatura. Dentre outras, uma conclusão de interesse para essa tese, e que corrobora a necessidade do desenvolvimento do modelo a ser proposta nesta pesquisa, é que a pesquisa em logística reversa precisa explorar mais os aspectos estocásticos inerentes a esses sistemas.

Com relação à desmontagem, algumas pesquisas abordaram essa atividade, porém cada qual com uma especificidade. Huajun *et al.* (2008) tratam da determinação da quantidade a ser desmontada e comprada em uma remanufatura que produz sob encomenda por meio de um modelo do tipo do vendedor de jornais. O objetivo é balancear, a partir das ordens firmes, a capacidade interna de desmontagem, a remanufatura e a compra de peças novas para maximizar o lucro. Lee *et al.* (2010), Smith e Chen (2010) e Tripathi *et al.* (2009) trabalham com o problema de até que ponto desmontar (nível de desmonte) os produtos retornados. Já o trabalho de Saadany e Jaber (2010) tem como diferencial a consideração da desmontagem dos *cores* em submontagens cujos estoques são controlados independentemente ao longo do processo.

De todos esses trabalhos mostrados, apenas quatro têm pontos em comum com a proposta que se pretende desenvolver na presente pesquisa. Huajun *et al.* (2008) tratam da quantidade a ser desmontada em um remanufatura sob pedido, porém somente contempla a característica necessidade de desmontar os produtos retornados. Karamouzian *et al.* (2010) e Denizel *et al.* (2010) tratam da quantidade a ser remanufaturada e vendida após a desmontagem e identificação da qualidade do item, considerando a capacidade interna finita que não deve ser excedida nas rotas produtivas necessárias para cada classe de qualidade dos itens. Li *et al.* (2009) usam programação dinâmica estocástica para determinação de tamanhos de lote, porém a situação analisada contempla somente as características incerteza com

relação à quantidade e momento de retorno e necessidade de balancear o retorno dos produtos com a demanda.

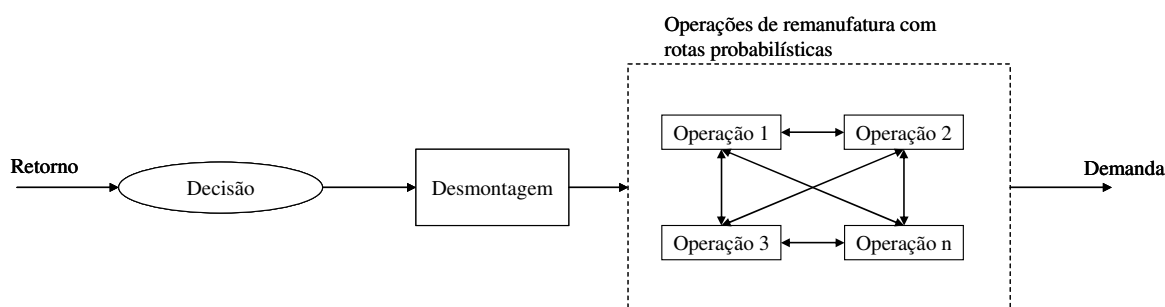
Portanto, embora a pesquisa em remanufatura tenha recebido bastante atenção recentemente, ainda carece de propostas que preencham as lacunas identificadas na presente pesquisa. Concluí-se, assim, que a proposta do modelo para programação mestre de desmontagem considerando roteiros estocásticos a ser elaborada na presente pesquisa é inédita e, dessa forma, consiste em uma contribuição original à pesquisa.

### 5.3 Modelagem matemática

#### 5.3.1 Definição do problema

Neste passo do estudo é feita a identificação dos três elementos principais do problema: alternativas de decisão, objetivo e restrições. Isso é mostrado a seguir por meio do modelo conceitual.

Um sistema de remanufatura considerando roteiros estocásticos pode ser ilustrado de acordo com a figura 5.1 a seguir.



**FIGURA 5.1 – Representação de um sistema de remanufatura com roteiros estocásticos**

A primeira operação da remanufatura é a desmontagem e, portanto, a primeira decisão a ser tomada é relacionada à quantidade de produtos a ser desmontada para atender à demanda, ou seja, o programa mestre de desmontagem. Considerando uma remanufatura que trabalha sob pedido, há uma demanda determinística representada, por exemplo, pela carteira de pedidos. Na presente tese, como o foco do problema são os roteiros estocásticos, é

considerado infinito o suprimento de produtos retornados, ou seja, a característica de incerteza da quantidade e momento dos retornos não é considerada no processo analisado.

Cada produto desmontado gera um determinado número de itens a serem recuperados. A recuperação desses itens consiste na passagem pelas diversas operações dentro da remanufatura, que formam os possíveis roteiros ou rotas produtivas. Essas operações necessárias não são as mesmas para todos os itens. Pois, em função da condição desses itens, existe uma probabilidade  $p_i$  de que cada item tenha que passar em cada rota  $i$ , cada qual com seu custo associado, que dependerá principalmente do número e custo das operações da rota. Admite-se também que todos os itens gerados possam ser recuperados, ou seja, a característica de incerteza quanto à taxa de recuperação dos materiais que compõem os produtos retornados não é considerada. Além dos custos das rotas, os principais custos associados a este problema são: custo de desmontagem de cada produto, custo de estocagem de produtos sobressalentes e custo de *setup* para cada rodada de desmontagem. Esta estrutura de custos é semelhante à de diversos modelos da literatura como, por exemplo, em Ahiska e King (2010), Feng e Viswanathan (2010), Gan e Su (2009) e Konstantaras *et al.* (2010). Além disso, o custo, de acordo com Lage Junior e Godinho Filho (2009), é o objetivo de desempenho priorizado pela maioria das remanufaturas e modelos propostos na literatura. A decisão consiste, portanto, em determinar o quanto desmontar de produtos retornados para atender a demanda e minimizar os custos.

### 5.3.2 Construção do modelo matemático

Com base na descrição da seção 5.3.1, uma opção de modelagem matemática para tratar o problema é a programação dinâmica. Hastings (1973) argumenta que problemas relativos a ordens de compra ou de produção invariavelmente envolvem uma sequência de decisões no tempo e são bastante adequados para análises utilizando programação dinâmica. Ainda, Denardo (1982) afirma que a vantagem é que “a programação dinâmica pode dar frutos na forma de *insights* ou números”.

Para o problema apresentado na presente tese, pode-se considerar que a quantidade de peças já desmontadas e atribuídas a cada rota é o estado de entrada do sistema. Assim, após a decisão de quantos produtos desmontar (variável de decisão), a quantidade resultante de peças atribuídas a cada rota é o estado de saída (incerto) do sistema. Por fim,

após cada rodada de desmontagem, o tomador de decisão deve decidir quanto desmontar na próxima rodada (estágio). No parágrafo a seguir é apresentado o enunciado que resultará no modelo matemático utilizando a programação dinâmica estocástica que é a base para as análises do presente capítulo.

Assumindo que um pedido de tamanho  $N$  tenha sido recebido, a operação deve desmontar os produtos retornados para atendê-lo. Existe uma probabilidade  $p_1$  de que, ao desmontar um produto, seus itens sigam pelo roteiro produtivo 1 e uma probabilidade  $p_2 = (1 - p_1)$  que sigam pelo roteiro produtivo 2, ou seja, neste caso existem apenas dois roteiros possíveis. O custo do roteiro produtivo 1 é  $C_1$ . O custo do roteiro produtivo 2 é  $C_2$ . Há também um custo de  $C_d$  para desmontar cada unidade do produto, um custo de *setup*  $C_s$  cada vez que o processo de desmontagem for estabelecido e um custo  $C_e$  para cada unidade armazenada (no caso em que forem desmontadas ou houver mais unidades que o necessário para atender ao pedido). Supondo que  $n$  decisões já foram tomadas, há  $r_1$  itens já desmontados e que devem seguir pela rota 1, e  $r_2$  itens já desmontados e que devem seguir pela rota 2. Com base no estado inicial do sistema, dado pelo vetor  $(r_1, r_2)$ , deve-se decidir o número de produtos a ser desmontado, aqui denotado por  $m$ .

Se  $r_1 + r_2 \geq N$ , ou seja, se existirem mais itens que o necessário para atender ao pedido, ou então existir exatamente a quantidade de itens necessária, não há problema. Ou seja, não é preciso desmontar nenhum produto adicional, basta processar os itens de forma a minimizar os custos com as rotas da seguinte maneira:

Se  $r_1 + r_2 = N$ :

$$\text{Custo total mínimo} = r_1 C_1 + r_2 C_2$$

Se  $r_1 + r_2 > N$ :

*Custo total mínimo* =

$$\text{mín}[n_1 C_1 + n_2 C_2] + C_e (r_1 + r_2 - N), \quad n_1, n_2 \in \mathbf{Z}, 0 \leq n_1 \leq r_1, 0 \leq n_2 \leq r_2, n_1 + n_2 = N$$

Já para os casos em que  $r_1 + r_2 < N$ , o custo total esperado do problema é dado por:

$$C_d m + C_s + \sum_{k=0}^m (C_{m,k} p_1^k p_2^{m-k} (k C_1 + (m-k) C_2))$$

Em que,

$C_{m,k}$  é a combinação de  $m$  elementos tomados  $k$  a  $k$ ;

$k$  = número de itens na rota 1 (equivalente ao número de sucessos na distribuição binomial);

As expressões acima estabelecem o custo esperado somente para o caso de um estágio único. Como em programação dinâmica deve-se utilizar o princípio de otimalidade de Bellman (BELLMAN, 1957), é preciso seguir a política ótima a partir do estado resultante da decisão tomada. Assim, define-se  $f_n^*(r_1, r_2)$  como o custo esperado de uma política ótima, após  $n$  decisões, com o estado definido por  $r_1$  itens já desmontados e que devem seguir pela rota 1, e  $r_2$  itens já desmontados e que devem seguir pela rota 2. Como ótimo neste caso representa a minimização de custos, pode-se definir:

$$f_n^*(r_1, r_2) = \underset{m>0}{\text{mín}} \left[ \underset{m < N - r_1 - r_2}{\text{mín}} \left[ C_d m + C_s + \sum_{k=0}^m (C_{m,k} p_1^k p_2^{m-k} (f_{n-1}^*(r_1 + k, r_2 + m - k))) \right] \right]$$

$$\underset{m \geq N - r_1 - r_2}{\text{mín}} \left[ C_d m + C_s + \sum_{k=0}^m (C_{m,k} p_1^k p_2^{m-k} (W_k + f_{n-1}^*(r_1 + k, r_2 + m - k))) \right]$$

Em que,

$$W_k = \underset{m \geq N - r_1 - r_2}{\text{mín}} (n_1 C_1 + n_2 C_2) + C_e (r_1 + r_2 + m - N), \quad n_1, n_2 \in \mathbf{Z}, 0 \leq n_1 \leq r_1 + k, 0 \leq n_2 \leq r_2 + m - k, n_1 + n_2 = N$$

$C_{m,k}$  é a combinação de  $m$  elementos tomados  $k$  a  $k$ ;

$k$  = número de itens na rota 1 (equivalente ao número de sucessos na distribuição binomial);

E com as condições limitantes de  $f_n^*(r_1, r_2) = 0 \quad \forall (r_1 + r_2) \geq N$ .

Essa formulação não indica o número de estágios que são necessários para completar a ordem. Porém, de acordo com Smith (1991, p. 111), o número de estágios para este tipo de problema não precisa ser determinado, pois “a decisão sobre a quantidade produzida será sempre a mesma para um dado estado”. Assim, retirando o índice  $n$  das expressões, tem-se:

$$f^*(r_1, r_2) = \underset{m>0}{\text{mín}} \left[ \underset{m < N-r_1-r_2}{\text{mín}} \left[ C_d m + C_s + \sum_{k=0}^m (C_{m,k} p_1^k p_2^{m-k} (f^*(r_1+k, r_2+m-k))) \right] \right],$$

$$\underset{m \geq N-r_1-r_2}{\text{mín}} \left[ C_d m + C_s + \sum_{k=0}^m (C_{m,k} p_1^k p_2^{m-k} (W_k + f^*(r_1+k, r_2+m-k))) \right]$$

Em que,

$$W_k = \underset{m \geq N-r_1-r_2}{\text{mín}} (n_1 C_1 + n_2 C_2) + C_e (r_1 + r_2 + m - N), \quad n_1, n_2 \in \mathbb{Z}, 0 \leq n_1 \leq r_1 + k, 0 \leq n_2 \leq r_2 + m - k, n_1 + n_2 = N$$

$C_{m,k}$  é a combinação de  $m$  elementos tomados  $k$  a  $k$ ;

$k$  = número de itens na rota 1 (equivalente ao número de sucessos na distribuição binomial);

$$f^*(r_1, r_2) = 0 \quad \forall (r_1 + r_2) \geq N.$$

Alguns comentários devem ser realizados neste ponto. No modelo proposto optou-se pela existência de apenas dois roteiros de remanufatura e pela geração de apenas um item para cada produto desmontado, embora possam existir mais de duas rotas e a desmontagem de um produto possa gerar vários itens. O motivo, em ambos os casos, é evitar a “maldição da dimensionalidade”, ou seja, se o número de roteiros e/ou o número de itens gerados na desmontagem fossem aumentados, os cálculos necessários aumentariam rapidamente, tornando o modelo pouco tratável. No entanto, isso não significa um distanciamento significativo da realidade. Primeiro, porque o autor pôde verificar na prática nos estudos de caso, que apesar da desmontagem de um produto poder gerar vários itens, a maior parte é de pequeno valor e normalmente apenas um é de classificação “A” em relação ao custo de remanufatura e, portanto, necessita ser considerado na tomada de decisão relativa ao programa mestre. Por exemplo, dos cerca de 400 itens que formam o produto final da empresa 4 dos estudos de caso, apenas 1 representa aproximadamente 40% do custo total. Segundo, apesar de poderem existir diversos roteiros, normalmente um deles tem custo maior, por exemplo, se uma das operações necessárias for realizada em um equipamento na manufatura em vez da remanufatura. Nesses casos, podem-se separar todos os roteiros em apenas dois grupos: um que possui o custo maior e os demais. Além disso, há sempre a possibilidade de que um item tenha apenas dois roteiros diferentes, como exemplificado na seção 5.4 por meio de uma situação real.

De acordo com Hillier e Lieberman (2010), ao se desenvolver um modelo, um método eficiente é iniciar com uma versão simples e, progressivamente, ir avançando para

modelos mais elaborados. Além disso, conforme apontado por diversos autores como Guide e Wassenhove (2009), Pokharel e Mutha (2009) e Wang *et al.* (2010), as incertezas na remanufatura aumentam muito a complexidade das soluções desenvolvidas, que acabam se distanciando das necessidades reais práticas por serem difíceis de serem implantadas. Dessa forma, a contribuição esperada da proposta é dupla: apresentar um primeiro modelo matemático do problema, que posteriormente poderá ser melhorado (pavimentação do caminho para pesquisas futuras) e satisfazer a necessidade de modelos que se aproximem dos problemas práticos no sentido de oferecer indicações gerenciais práticas para tomadores de decisão da área. Modelos mais complexos, baseados na proposta anterior, serão desenvolvidos em pesquisas futuras do autor.

### **5.3.3 Solução do modelo matemático**

Na presente seção o modelo matemático é solucionado por meio de exemplos numéricos, com os seguintes objetivos: ilustrar o uso do modelo proposto e realizar uma análise de sensibilidade para verificar como a estrutura dos custos afeta as decisões ótimas e, conseqüentemente, obter indicações gerenciais a respeito da decisão sobre a quantidade a ser desmontada quando há roteiros estocásticos.

Foi utilizada uma planilha eletrônica para auxiliar os cálculos considerando o caso de um pedido de  $N = 3$ . Os resultados são apresentados nas seções a seguir.

#### **5.3.3.1 Ilustração do uso do modelo proposto**

Como forma de ilustração do uso, o modelo proposto foi solucionado utilizando os seguintes valores dos parâmetros:  $N=3$ ,  $C_d=10$ ,  $C_e=12$ ,  $C_s=14$ ,  $C_1=11$ ,  $C_2=44$ ,  $p_1=0,8$  e  $p_2=0,2$ . Com isso, as equações tomam a seguinte forma:



$$f^*(r_1, r_2) = \underset{m>0}{\text{mín}} \left[ \underset{m<3-r_1-r_2}{\text{mín}} \left[ 10m + 14 + \sum_{k=0}^m (C_{m,k} 0,8^k 0,2^{m-k} (f^*(r_1+k, r_2+m-k))) \right] \right],$$

$$\underset{m \geq 3-r_1-r_2}{\text{mín}} \left[ 10m + 14 + \sum_{k=0}^m (C_{m,k} 0,8^k 0,2^{m-k} (W_k + f^*(r_1+k, r_2+m-k))) \right]$$

Em que,

$$W_k = \text{mín}(n_1 11 + n_2 44) + 12(r_1 + r_2 + m - 3), \quad n_1, n_2 \in \mathbf{Z}, 0 \leq n_1 \leq r_1 + k, 0 \leq n_2 \leq r_2 + m - k, n_1 + n_2 = 3$$

$$f^*(r_1, r_2) = 0 \quad \forall (r_1 + r_2) \geq 3.$$

Para resolver o problema é preciso encontrar a solução para os estados em que  $r_1 + r_2 < 3$ , pois para todos os estados em que  $r_1 + r_2 \geq 3$ ,  $f^*(r_1, r_2) = 0$  (condições limitantes). Assim é preciso calcular (1,1), (2,0), (0,2), (1,0), (0,1) e (0,0).

Calculando o estado (1,1):

$$f^*(1,1) = \underset{m>0}{\text{mín}} \left[ \underset{m<3-1-1}{\text{mín}} \left[ 10m + 14 + \sum_{k=0}^m (C_{m,k} 0,8^k 0,2^{m-k} (f^*(1+k, 1+m-k))) \right] \right],$$

$$\underset{m \geq 3-1-1}{\text{mín}} \left[ 10m + 14 + \sum_{k=0}^m (C_{m,k} 0,8^k 0,2^{m-k} (W_k + f^*(1+k, 1+m-k))) \right]$$

Com

$$W_k = \text{mín}(n_1 11 + n_2 44) + 12(1+1+m-3), \quad n_1, n_2 \in \mathbf{Z}, 0 \leq n_1 \leq 1+k, 0 \leq n_2 \leq 1+m-k, n_1 + n_2 = 3$$

Ou seja,

$$f^*(1,1) = \underset{m \geq 1}{\text{mín}} \left[ 10m + 14 + \sum_{k=0}^m (C_{m,k} 0,8^k 0,2^{m-k} (W_k + f^*(1+k, 1+m-k))) \right]$$

Com

$$W_k = \text{mín}(n_1 11 + n_2 44) + 12(1+1+m-3), \quad n_1, n_2 \in \mathbf{Z}, 0 \leq n_1 \leq 1+k, 0 \leq n_2 \leq 1+m-k, n_1 + n_2 = 3$$

Se desmontar um produto:

$$m = 1$$

$$\begin{aligned} &= 10(1) + 14 + 0,2(W_0 + f^*(1 + 0, 1 + 1 - 0)) + 0,8(W_1 + f^*(1 + 1, 1 + 1 - 1)) \\ &= 24 + 0,2(W_0 + f^*(1, 2)) + 0,8(W_1 + f^*(2, 1)) \\ &= 24 + 0,2(99 + f^*(1, 2)) + 0,8(66 + f^*(2, 1)) \\ &= 24 + 0,2(99) + 0,8(66) = 96,6 \end{aligned}$$

Pois,

$$f^*(1, 2) = 0;$$

$$f^*(2, 1) = 0;$$

$$W_0 = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(1 + 1 + 1 - 3), \quad 0 \leq n_1 \leq 1 + 0, 0 \leq n_2 \leq 1 + 1 - 0, n_1 + n_2 = 3$$

Assim

$$W_0 = (1(11) + 2(44)) + 12(0) = 99;$$

$$W_1 = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(1 + 1 + 1 - 3), \quad 0 \leq n_1 \leq 1 + 1, 0 \leq n_2 \leq 1 + 1 - 1, n_1 + n_2 = 3$$

Assim

$$W_1 = (2(11) + 1(44)) + 12(0) = 66.$$

Se desmontar dois produtos:

$$m = 2$$

$$\begin{aligned} &= 10(2) + 14 + 0,04(W_0 + f^*(1 + 0, 1 + 2 - 0)) + 0,32(W_1 + f^*(1 + 1, 1 + 2 - 1)) + 0,64(W_2 + f^*(1 + 2, 1 + 2 - 2)) \\ &= 34 + 0,04(W_0 + f^*(1, 3)) + 0,32(W_1 + f^*(2, 2)) + 0,64(W_2 + f^*(3, 1)) \\ &= 34 + 0,04(111 + f^*(1, 3)) + 0,32(78 + f^*(2, 2)) + 0,64(45 + f^*(3, 1)) \\ &= 34 + 0,04(111) + 0,32(78) + 0,64(45) = 92,2 \end{aligned}$$

Pois,

$$f^*(1, 3) = 0;$$

$$f^*(2, 2) = 0;$$

$$f^*(3, 1) = 0;$$

$$W_0 = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(1 + 1 + 2 - 3), \quad 0 \leq n_1 \leq 1 + 0, 0 \leq n_2 \leq 1 + 2 - 0, n_1 + n_2 = 3$$

$$\text{Assim, } W_0 = \min(1(11) + 2(44); 0(11) + 3(44)) + 12(1) = \min(99; 132) + 12 = 99 + 12 = 111;$$

$$W_1 = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(1 + 1 + 2 - 3), \quad 0 \leq n_1 \leq 1 + 1, 0 \leq n_2 \leq 1 + 2 - 1, n_1 + n_2 = 3$$

$$\text{Assim, } W_1 = \min(2(11) + 1(44); 1(11) + 2(44)) + 12(1) = \min(66; 99) + 12 = 66 + 12 = 78;$$

$$W_2 = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(1 + 1 + 2 - 3), \quad 0 \leq n_1 \leq 1 + 2, 0 \leq n_2 \leq 1 + 2 - 2, n_1 + n_2 = 3$$

$$\text{Assim, } W_2 = (3(11) + 0(44); 2(11) + 1(44)) + 12(1) = \min(33; 66) + 12 = 33 + 12 = 45.$$

A partir de  $m=3$ , os custos aumentam progressivamente. Assim,  $f^*(1,1)=\min(96,6; 92,2; \dots) = 92,2$ , o que corresponde a desmontar dois produtos.

Calculando o estado (2,0):

$$f^*(2,0) = \min_{m>0} \left[ \min_{m<3-2-0} \left[ 10m + 14 + \sum_{k=0}^m (C_{m,k} 0,8^k 0,2^{m-k} (f^*(2+k,0+m-k))) \right] \right],$$

$$\min_{m \geq 3-2-0} \left[ 10m + 14 + \sum_{k=0}^m (C_{m,k} 0,8^k 0,2^{m-k} (W_k + f^*(2+k,0+m-k))) \right]$$

Com

$$W_k = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(2+0+m-3), \quad n_1, n_2 \in \mathbb{Z}, 0 \leq n_1 \leq 2+k, 0 \leq n_2 \leq 0+m-k, n_1 + n_2 = 3$$

Ou seja,

$$f^*(2,0) = \min_{m \geq 1} \left[ 10m + 14 + \sum_{k=0}^m (C_{m,k} 0,8^k 0,2^{m-k} (W_k + f^*(2+k,0+m-k))) \right]$$

Com

$$W_k = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(2+0+m-3), \quad n_1, n_2 \in \mathbb{Z}, 0 \leq n_1 \leq 2+k, 0 \leq n_2 \leq 0+m-k, n_1 + n_2 = 3$$

Se desmontar um produto:

$$\begin{aligned} m &= 1 \\ &= 10(1) + 14 + 0,2(W_0 + f^*(2+0,0+1-0)) + 0,8(W_1 + f^*(2+1,0+1-1)) \\ &= 24 + 0,2(W_0 + f^*(2,1)) + 0,8(W_1 + f^*(3,0)) \\ &= 24 + 0,2(66 + f^*(2,1)) + 0,8(33 + f^*(3,0)) \\ &= 24 + 0,2(66) + 0,8(33) = 63,6 \end{aligned}$$

Pois,

$$f^*(2,1) = 0;$$

$$f^*(3,0) = 0;$$

$$W_0 = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(2+0+1-3), \quad 0 \leq n_1 \leq 2+0, 0 \leq n_2 \leq 0+1-0, n_1 + n_2 = 3$$

$$\text{Assim, } W_0 = (2(11) + 1(44)) + 12(0) = 66;$$

$$W_1 = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(2+0+1-3), \quad 0 \leq n_1 \leq 2+1, 0 \leq n_2 \leq 0+1-1, n_1 + n_2 = 3$$

$$\text{Assim, } W_1 = (3(11) + 0(44)) + 12(0) = 33.$$

Se desmontar dois produtos:

$$m = 2$$

$$\begin{aligned} &= 10(2) + 14 + 0,04(W_0 + f^*(2+0,0+2-0)) + 0,32(W_1 + f^*(2+1,0+2-1)) + 0,64(W_2 + f^*(2+2,0+2-2)) \\ &= 34 + 0,04(W_0 + f^*(2,2)) + 0,32(W_1 + f^*(3,1)) + 0,64(W_2 + f^*(4,0)) \\ &= 34 + 0,04(78 + f^*(2,2)) + 0,32(45 + f^*(3,1)) + 0,64(45 + f^*(4,0)) \\ &= 34 + 0,04(78) + 0,32(45) + 0,64(45) = 80,32 \end{aligned}$$

Pois,

$$f^*(2,2) = 0;$$

$$f^*(3,1) = 0;$$

$$f^*(4,0) = 0;$$

$$W_0 = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(2+0+2-3), \quad 0 \leq n_1 \leq 2+0, 0 \leq n_2 \leq 0+2-0, n_1 + n_2 = 3$$

$$\text{Assim, } W_0 = \min(2(11) + 1(44); 1(11) + 2(44)) + 12(1) = \min(66; 99) + 12 = 66 + 12 = 78;$$

$$W_1 = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(2+0+2-3), \quad 0 \leq n_1 \leq 2+1, 0 \leq n_2 \leq 0+2-1, n_1 + n_2 = 3$$

$$\text{Assim, } W_1 = \min(3(11) + 0(44); 2(11) + 1(44)) + 12(1) = \min(33; 66) + 12 = 33 + 12 = 45;$$

$$W_2 = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(2+0+2-3), \quad 0 \leq n_1 \leq 2+2, 0 \leq n_2 \leq 0+2-2, n_1 + n_2 = 3$$

$$\text{Assim, } W_2 = (3(11) + 0(44)) + 12(1) = 45.$$

A partir de  $m=3$ , os custos aumentam progressivamente. Assim,  $f^*(2,0) = \min(63,6; 80,32; \dots) = 63,6$ , o que corresponde a desmontar um produto.

Calculando o estado (0,2):

$$f^*(0,2) = \min_{m>0} \left[ \min_{m<3-0-2} \left[ 10m + 14 + \sum_{k=0}^m (C_{m,k} 0,8^k 0,2^{m-k} (f^*(0+k,2+m-k))) \right] \right],$$

$$\min_{m \geq 3-0-2} \left[ 10m + 14 + \sum_{k=0}^m (C_{m,k} 0,8^k 0,2^{m-k} (W_k + f^*(0+k,2+m-k))) \right]$$

Com

$$W_k = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(0+2+m-3), \quad n_1, n_2 \in \mathbb{Z}, 0 \leq n_1 \leq 0+k, 0 \leq n_2 \leq 2+m-k, n_1 + n_2 = 3$$

Ou seja,

$$f^*(0,2) = \min_{m \geq 1} \left[ 10m + 14 + \sum_{k=0}^m (C_{m,k} 0,8^k 0,2^{m-k} (W_k + f^*(0+k,2+m-k))) \right]$$

Com

$$W_k = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(0 + 2 + m - 3), \quad n_1, n_2 \in \mathbb{Z}, 0 \leq n_1 \leq 0 + k, 0 \leq n_2 \leq 2 + m - k, n_1 + n_2 = 3$$

Se desmontar um produto:

$$m = 1$$

$$= 10(1) + 14 + 0,2(W_0 + f^*(0 + 0,2 + 1 - 0)) + 0,8(W_1 + f^*(0 + 1,2 + 1 - 1))$$

$$= 24 + 0,2(W_0 + f^*(0,3)) + 0,8(W_1 + f^*(1,2))$$

$$= 24 + 0,2(132 + f^*(0,3)) + 0,8(99 + f^*(1,2))$$

$$= 24 + 0,2(132) + 0,8(99) = 129,6$$

Pois,

$$f^*(0,3) = 0;$$

$$f^*(1,2) = 0;$$

$$W_0 = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(0 + 2 + 1 - 3), \quad 0 \leq n_1 \leq 0 + 0, 0 \leq n_2 \leq 2 + 1 - 0, n_1 + n_2 = 3$$

$$\text{Assim, } W_0 = (0(11) + 3(44)) + 12(0) = 132;$$

$$W_1 = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(0 + 2 + 1 - 3), \quad 0 \leq n_1 \leq 0 + 1, 0 \leq n_2 \leq 2 + 1 - 1, n_1 + n_2 = 3$$

$$\text{Assim, } W_1 = (1(11) + 2(44)) + 12(0) = 99.$$

Se desmontar dois produtos:

$$m = 2$$

$$= 10(2) + 14 + 0,04(W_0 + f^*(0 + 0,2 + 2 - 0)) + 0,32(W_1 + f^*(0 + 1,2 + 2 - 1)) + 0,64(W_2 + f^*(0 + 2,2 + 2 - 2))$$

$$= 34 + 0,04(W_0 + f^*(0,4)) + 0,32(W_1 + f^*(1,3)) + 0,64(W_2 + f^*(2,2))$$

$$= 34 + 0,04(144 + f^*(0,4)) + 0,32(111 + f^*(1,3)) + 0,64(78 + f^*(2,2))$$

$$= 34 + 0,04(144) + 0,32(111) + 0,64(78) = 125,2$$

Pois,

$$f^*(0,4) = 0;$$

$$f^*(1,3) = 0;$$

$$f^*(2,2) = 0;$$

$$W_0 = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(0 + 2 + 2 - 3), \quad 0 \leq n_1 \leq 0 + 0, 0 \leq n_2 \leq 2 + 2 - 0, n_1 + n_2 = 3$$

$$\text{Assim, } W_0 = \min(0(11) + 3(44)) + 12(1) = \min(132) + 12 = 132 + 12 = 144;$$

$$W_1 = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(0 + 2 + 2 - 3), \quad 0 \leq n_1 \leq 0 + 1, 0 \leq n_2 \leq 2 + 2 - 1, n_1 + n_2 = 3$$

$$\text{Assim, } W_1 = \min(1(11) + 2(44); 0(11) + 3(44)) + 12(1) = \min(99; 132) + 12 = 99 + 12 = 111;$$

$$W_2 = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(0 + 2 + 2 - 3), \quad 0 \leq n_1 \leq 0 + 2, 0 \leq n_2 \leq 2 + 2 - 2, n_1 + n_2 = 3$$

$$\text{Assim, } W_2 = \min(2(11) + 1(44); 1(11) + 2(44)) + 12(1) = \min(66; 99) + 12 = 66 + 12 = 78.$$

Se desmontar três produtos:

$$m = 3$$

$$\begin{aligned} &= 10(3) + 14 + 0,008(W_0 + f^*(0 + 0, 2 + 3 - 0)) + 0,096(W_1 + f^*(0 + 1, 2 + 3 - 1)) \\ &\quad + 0,384(W_2 + f^*(0 + 2, 2 + 3 - 2)) + 0,512(W_3 + f^*(0 + 3, 2 + 3 - 3)) \\ &= 44 + 0,008(W_0 + f^*(0,5)) + 0,096(W_1 + f^*(1,4)) + 0,384(W_2 + f^*(2,3)) + 0,512(W_3 + f^*(3,2)) \\ &= 44 + 0,008(156 + f^*(0,5)) + 0,096(123 + f^*(1,4)) + 0,384(90 + f^*(2,3)) + 0,512(57 + f^*(3,2)) \\ &= 44 + 0,008(156) + 0,096(123) + 0,384(90) + 0,512(57) \\ &= 120,8 \end{aligned}$$

Pois,

$$f^*(0,5) = 0;$$

$$f^*(1,4) = 0;$$

$$f^*(2,3) = 0;$$

$$f^*(3,2) = 0;$$

$$W_0 = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(0 + 2 + 3 - 3), \quad 0 \leq n_1 \leq 0 + 0, 0 \leq n_2 \leq 2 + 3 - 0, n_1 + n_2 = 3$$

$$\text{Assim, } W_0 = \min(0(11) + 3(44)) + 12(2) = \min(132) + 24 = 132 + 24 = 156;$$

$$W_1 = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(0 + 2 + 3 - 3), \quad 0 \leq n_1 \leq 0 + 1, 0 \leq n_2 \leq 2 + 3 - 1, n_1 + n_2 = 3$$

$$\text{Assim, } W_1 = \min(1(11) + 2(44); 0(11) + 3(44)) + 12(2) = \min(99; 132) + 24 = 99 + 24 = 123;$$

$$W_2 = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(0 + 2 + 3 - 3), \quad 0 \leq n_1 \leq 0 + 2, 0 \leq n_2 \leq 2 + 3 - 2, n_1 + n_2 = 3$$

Assim,

$$W_2 = \min(2(11) + 1(44); 1(11) + 2(44); 0(11) + 3(44)) + 12(2) = \min(66; 99; 132) + 24 = 66 + 24 = 90;$$

$$W_3 = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(0 + 2 + 3 - 3), \quad 0 \leq n_1 \leq 0 + 3, 0 \leq n_2 \leq 2 + 3 - 3, n_1 + n_2 = 3$$

Assim,

$$W_3 = \min(3(11) + 0(44); 2(11) + 1(44); 1(11) + 2(44)) + 12(2) = \min(33; 66; 99) + 24 = 33 + 24 = 57;$$

A partir de  $m=4$ , os custos aumentam progressivamente. Assim,  $f^*(0,2) = \min(129,6; 125,2; 120,8; \dots) = 120,8$ , o que corresponde a desmontar três produtos.

Calculando o estado (1,0):

$$f^*(1,0) = \underset{m>0}{\min} \left[ \underset{m<3-1-0}{\min} \left[ 10m + 14 + \sum_{k=0}^m (C_{m,k} 0,8^k 0,2^{m-k} (f^*(1+k,0+m-k))) \right], \right. \\ \left. \underset{m \geq 3-1-0}{\min} \left[ 10m + 14 + \sum_{k=0}^m (C_{m,k} 0,8^k 0,2^{m-k} (W_k + f^*(1+k,0+m-k))) \right] \right]$$

Com

$$W_k = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(1+0+m-3), \quad n_1, n_2 \in \mathbb{Z}, 0 \leq n_1 \leq 1+k, 0 \leq n_2 \leq 0+m-k, n_1 + n_2 = 3$$

Se desmontar um produto:

$$\begin{aligned} m &= 1 \\ &= 10(1) + 14 + 0,2(f^*(1+0,0+1-0)) + 0,8(f^*(1+1,0+1-1)) \\ &= 24 + 0,2(f^*(1,1)) + 0,8(f^*(2,0)) \\ &= 24 + 0,2(92,2) + 0,8(63,6) \\ &= 93,32 \end{aligned}$$

Pois,

$$f^*(1,1) = 92,2, \text{ de acordo com os cálculos anteriores;}$$

$$f^*(2,0) = 63,6, \text{ de acordo com os cálculos anteriores;}$$

Se desmontar dois produtos:

$$\begin{aligned} m &= 2 \\ &= 10(2) + 14 + 0,04(W_0 + f^*(1+0,0+2-0)) + 0,32(W_1 + f^*(1+1,0+2-1)) + 0,64(W_2 + f^*(1+2,0+2-2)) \\ &= 34 + 0,04(W_0 + f^*(1,2)) + 0,32(W_1 + f^*(2,1)) + 0,64(W_2 + f^*(3,0)) \\ &= 34 + 0,04(99 + f^*(1,2)) + 0,32(66 + f^*(2,1)) + 0,64(33 + f^*(3,0)) \\ &= 34 + 0,04(99) + 0,32(66) + 0,64(33) = 80,2 \end{aligned}$$

Pois,

$$f^*(1,2) = 0;$$

$$f^*(2,1) = 0;$$

$$f^*(3,0) = 0;$$

$$W_0 = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(1+0+2-3), \quad 0 \leq n_1 \leq 1+0, 0 \leq n_2 \leq 0+2-0, n_1 + n_2 = 3$$

$$\text{Assim, } W_0 = \min(1(11) + 2(44)) + 12(0) = \min(99) + 0 = 99;$$

$$W_1 = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(1+0+2-3), \quad 0 \leq n_1 \leq 1+1, 0 \leq n_2 \leq 0+2-1, n_1 + n_2 = 3$$

Assim,  $W_1 = \text{mín}(2(11)+1(44))+12(0) = \text{mín}(66)+0 = 66$ ;

$W_2 = \text{mín}(n_1 11 + n_2 44) + 12(1+0+2-3)$ ,  $0 \leq n_1 \leq 1+2$ ,  $0 \leq n_2 \leq 0+2-2$ ,  $n_1 + n_2 = 3$

Assim,  $W_2 = \text{mín}(3(11)+0(44))+12(0) = \text{mín}(33)+0 = 33$ .

A partir de  $m=3$ , os custos aumentam progressivamente. Assim,  $f^*(1,0) = \text{mín}(93,32; 80,2; \dots) = 80,2$ , o que corresponde a desmontar dois produtos.

Calculando o estado (0,1):

$$f^*(0,1) = \underset{m>0}{\text{mín}} \left[ \underset{m<3-0-1}{\text{mín}} \left[ 10m + 14 + \sum_{k=0}^m (C_{m,k} 0,8^k 0,2^{m-k} (f^*(0+k, 1+m-k))) \right] \right],$$

$$\underset{m \geq 3-0-1}{\text{mín}} \left[ 10m + 14 + \sum_{k=0}^m (C_{m,k} 0,8^k 0,2^{m-k} (W_k + f^*(0+k, 1+m-k))) \right]$$

Com

$$W_k = \text{mín}(n_1 11 + n_2 44) + 12(0+1+m-3), \quad n_1, n_2 \in \mathbf{Z}, 0 \leq n_1 \leq 0+k, 0 \leq n_2 \leq 1+m-k, n_1 + n_2 = 3$$

Se desmontar um produto:

$$\begin{aligned} m &= 1 \\ &= 10(1) + 14 + 0,2(f^*(0+0, 1+1-0)) + 0,8(f^*(0+1, 1+1-1)) \\ &= 24 + 0,2(f^*(0,2)) + 0,8(f^*(1,1)) \\ &= 24 + 0,2(120,8) + 0,8(92,2) \\ &= 121,92 \end{aligned}$$

Pois,

$$f^*(0,2) = 120,8, \text{ de acordo com os cálculos anteriores;}$$

$$f^*(1,1) = 92,2, \text{ de acordo com os cálculos anteriores;}$$

Se desmontar dois produtos:

$$\begin{aligned} m &= 2 \\ &= 10(2) + 14 + 0,04(W_0 + f^*(0+0, 1+2-0)) + 0,32(W_1 + f^*(0+1, 1+2-1)) + 0,64(W_2 + f^*(0+2, 1+2-2)) \\ &= 34 + 0,04(W_0 + f^*(0,3)) + 0,32(W_1 + f^*(1,2)) + 0,64(W_2 + f^*(2,1)) \\ &= 34 + 0,04(132 + f^*(0,3)) + 0,32(99 + f^*(1,2)) + 0,64(66 + f^*(2,1)) \\ &= 34 + 0,04(132) + 0,32(99) + 0,64(66) = 113,2 \end{aligned}$$



Pois,

$$f^*(0,3) = 0;$$

$$f^*(1,2) = 0;$$

$$f^*(2,1) = 0;$$

$$W_0 = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(0 + 1 + 2 - 3), \quad 0 \leq n_1 \leq 0 + 0, 0 \leq n_2 \leq 1 + 2 - 0, n_1 + n_2 = 3$$

$$\text{Assim, } W_0 = \min(0(11) + 3(44)) + 12(0) = \min(132) + 0 = 132;$$

$$W_1 = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(0 + 1 + 2 - 3), \quad 0 \leq n_1 \leq 0 + 1, 0 \leq n_2 \leq 1 + 2 - 1, n_1 + n_2 = 3$$

$$\text{Assim, } W_1 = \min(1(11) + 2(44)) + 12(0) = \min(99) + 0 = 99;$$

$$W_2 = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(0 + 1 + 2 - 3), \quad 0 \leq n_1 \leq 0 + 2, 0 \leq n_2 \leq 1 + 2 - 2, n_1 + n_2 = 3$$

$$\text{Assim, } W_2 = \min(2(11) + 1(44)) + 12(0) = \min(66) + 0 = 66.$$

Se desmontar três produtos:

$$m = 3$$

$$\begin{aligned} &= 10(3) + 14 + 0,008(W_0 + f^*(0 + 0, 1 + 3 - 0)) + 0,096(W_1 + f^*(0 + 1, 1 + 3 - 1)) \\ &\quad + 0,384(W_2 + f^*(0 + 2, 1 + 3 - 2)) + 0,512(W_3 + f^*(0 + 3, 1 + 3 - 3)) \\ &= 44 + 0,008(W_0 + f^*(0,4)) + 0,096(W_1 + f^*(1,3)) + 0,384(W_2 + f^*(2,2)) + 0,512(W_3 + f^*(3,1)) \\ &= 44 + 0,008(144 + f^*(0,4)) + 0,096(111 + f^*(1,3)) + 0,384(78 + f^*(2,2)) + 0,512(45 + f^*(3,1)) \\ &= 44 + 0,008(144) + 0,096(111) + 0,384(78) + 0,512(45) \\ &= 108,8 \end{aligned}$$

Pois,

$$f^*(0,4) = 0;$$

$$f^*(1,3) = 0;$$

$$f^*(2,2) = 0;$$

$$f^*(3,1) = 0;$$

$$W_0 = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(0 + 1 + 3 - 3), \quad 0 \leq n_1 \leq 0 + 0, 0 \leq n_2 \leq 1 + 3 - 0, n_1 + n_2 = 3$$

$$\text{Assim, } W_0 = \min(0(11) + 3(44)) + 12(1) = \min(132) + 12 = 132 + 12 = 144;$$

$$W_1 = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(0 + 1 + 3 - 3), \quad 0 \leq n_1 \leq 0 + 1, 0 \leq n_2 \leq 1 + 3 - 1, n_1 + n_2 = 3$$

$$\text{Assim, } W_1 = \min(1(11) + 2(44); 0(11) + 3(44)) + 12(1) = \min(99; 132) + 12 = 99 + 12 = 111;$$

$$W_2 = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(0 + 1 + 3 - 3), \quad 0 \leq n_1 \leq 0 + 2, 0 \leq n_2 \leq 1 + 3 - 2, n_1 + n_2 = 3$$

$$\text{Assim, } W_2 = \min(2(11) + 1(44); 1(11) + 2(44)) + 12(1) = \min(66; 99) + 12 = 66 + 12 = 78;$$

$$W_3 = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(0 + 1 + 3 - 3), \quad 0 \leq n_1 \leq 0 + 3, 0 \leq n_2 \leq 1 + 3 - 3, n_1 + n_2 = 3$$

$$\text{Assim, } W_3 = \min(3(11) + 0(44); 2(11) + 1(44)) + 12(1) = \min(33; 66) + 12 = 33 + 12 = 45;$$

A partir de  $m=4$ , os custos aumentam progressivamente. Assim,  $f^*(0,1) = \min(121,92; 113,2; 108,8; \dots) = 108,8$ , o que corresponde a desmontar três produtos.

Calculando o estado (0,0):

$$f^*(0,0) = \min_{m>0} \left[ \min_{m<3-0-0} \left[ 10m + 14 + \sum_{k=0}^m (C_{m,k} 0,8^k 0,2^{m-k} (f^*(0+k, 0+m-k))) \right] \right]$$

$$\min_{m \geq 3-0-0} \left[ 10m + 14 + \sum_{k=0}^m (C_{m,k} 0,8^k 0,2^{m-k} (W_k + f^*(0+k, 0+m-k))) \right]$$

Com

$$W_k = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(0 + 0 + m - 3), \quad n_1, n_2 \in \mathbb{Z}, 0 \leq n_1 \leq 0 + k, 0 \leq n_2 \leq 0 + m - k, n_1 + n_2 = 3$$

Se desmontar um produto:

$$m = 1$$

$$= 10(1) + 14 + 0,2(f^*(0+0, 0+1-0)) + 0,8(f^*(0+1, 0+1-1))$$

$$= 24 + 0,2(f^*(0,1)) + 0,8(f^*(1,0))$$

$$= 24 + 0,2(108,8) + 0,8(80,2)$$

$$= 109,92$$

Pois,

$$f^*(0,1) = 108,8, \text{ de acordo com os cálculos anteriores;}$$

$$f^*(1,0) = 80,2, \text{ de acordo com os cálculos anteriores;}$$

Se desmontar dois produtos:

$$m = 2$$

$$= 10(2) + 14 + 0,04(f^*(0+0, 0+2-0)) + 0,32(f^*(0+1, 0+2-1)) + 0,64(f^*(0+2, 0+2-2))$$

$$= 34 + 0,04(f^*(0,2)) + 0,32(f^*(1,1)) + 0,64(f^*(2,0))$$

$$= 34 + 0,04(120,8) + 0,32(92,2) + 0,64(63,6)$$

$$= 109,04$$

Pois,

$$f^*(0,2) = 120,8, \text{ de acordo com os cálculos anteriores;}$$

$$f^*(1,1) = 92,2, \text{ de acordo com os cálculos anteriores;}$$

$$f^*(2,0) = 63,6, \text{ de acordo com os cálculos anteriores;}$$

Se desmontar três produtos:

$$m = 3$$

$$\begin{aligned} &= 10(3) + 14 + 0,008(W_0 + f^*(0 + 0, 0 + 3 - 0)) + 0,096(W_1 + f^*(0 + 1, 0 + 3 - 1)) \\ &\quad + 0,384(W_2 + f^*(0 + 2, 0 + 3 - 2)) + 0,512(W_3 + f^*(0 + 3, 0 + 3 - 3)) \\ &= 44 + 0,008(W_0 + f^*(0,3)) + 0,096(W_1 + f^*(1,2)) + 0,384(W_2 + f^*(2,1)) + 0,512(W_3 + f^*(3,0)) \\ &= 44 + 0,008(132 + f^*(0,3)) + 0,096(99 + f^*(1,2)) + 0,384(66 + f^*(2,1)) + 0,512(33 + f^*(3,0)) \\ &= 44 + 0,008(132) + 0,096(99) + 0,384(66) + 0,512(33) \\ &= 96,8 \end{aligned}$$

Pois,

$$f^*(0,3) = 0;$$

$$f^*(1,2) = 0;$$

$$f^*(2,1) = 0;$$

$$f^*(3,0) = 0;$$

$$W_0 = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(0 + 0 + 3 - 3), \quad 0 \leq n_1 \leq 0 + 0, 0 \leq n_2 \leq 0 + 3 - 0, n_1 + n_2 = 3$$

$$\text{Assim, } W_0 = \min(0(11) + 3(44)) + 12(0) = \min(132) + 0 = 132;$$

$$W_1 = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(0 + 0 + 3 - 3), \quad 0 \leq n_1 \leq 0 + 1, 0 \leq n_2 \leq 0 + 3 - 1, n_1 + n_2 = 3$$

$$\text{Assim, } W_1 = \min(1(11) + 2(44)) + 12(0) = \min(99) + 0 = 99;$$

$$W_2 = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(0 + 0 + 3 - 3), \quad 0 \leq n_1 \leq 0 + 2, 0 \leq n_2 \leq 0 + 3 - 2, n_1 + n_2 = 3$$

$$\text{Assim, } W_2 = \min(2(11) + 1(44)) + 12(0) = \min(66) + 0 = 66;$$

$$W_3 = \min(n_1 11 + n_2 44) + 12(0 + 0 + 3 - 3), \quad 0 \leq n_1 \leq 0 + 3, 0 \leq n_2 \leq 0 + 3 - 3, n_1 + n_2 = 3$$

$$\text{Assim, } W_3 = \min(3(11) + 0(44)) + 12(0) = \min(33) + 0 = 33;$$

A partir de  $m=4$ , os custos aumentam progressivamente. Assim,  $f^*(0,0) = \min(109,92; 109,04; 96,8; \dots) = 96,8$ , o que corresponde a desmontar três produtos.

A tabela 5.1 a seguir resume os resultados acima e a decisão a ser tomada em cada estado.

$f(r_1, r_2)$	$m$				$f^*(r_1, r_2)$	Desmontar
	1	2	3	4		
$f(1,1)$	96,60	92,20	...	...	92,20	2
$f(2,0)$	63,60	80,32	...	...	63,60	1
$f(0,2)$	129,60	125,20	120,80	...	120,80	3
$f(1,0)$	93,32	80,20	92,70	...	80,20	2
$f(0,1)$	121,92	113,20	108,80	...	108,80	3
$f(0,0)$	109,92	109,04	96,80	...	96,80	3

**TABELA 5.1 – Resultados do exemplo numérico ilustrativo**

Portanto, para os parâmetros utilizados, a solução ótima corresponde a:

- a) se o estado inicial for (1,1), desmontar dois produtos;
- b) se o estado inicial for (2,0), desmontar um produto;
- c) se o estado inicial for (0,2), desmontar três produtos;
- d) se o estado inicial for (1,0), desmontar dois produtos;
- e) se o estado inicial for (0,1), desmontar três produtos;
- f) se o estado inicial for (0,0), desmontar três produtos.

Em se tratando de um sistema que atende a demanda sob pedido e que todos os produtos podem ser recuperados, e considerando o presente exemplo em que o pedido é igual a três produtos, as decisões práticas evidentes (intuitivas) seriam as seguintes:

- a) se não houver produtos desmontados, que corresponde ao estado (0,0), desmontar três produtos;
- b) se houver apenas um produto já desmontado, que corresponde aos estados (0,1) ou (1,0), desmontar dois produtos; e
- c) se houver dois produtos já desmontados, que corresponde aos estados (0,2) ou (2,0) ou (1,1), desmontar apenas um produto.

No entanto, os resultados do modelo, para os parâmetros utilizados, demonstram que as melhores soluções são divergentes das soluções intuitivas nos seguintes casos:

- a) para o estado (1,1) a solução ótima corresponde a desmontar dois produtos, em vez de apenas um;
- b) para o estado (0,2) a solução ótima corresponde a desmontar três produtos, em vez de apenas um; e
- c) para o estado (0,1) a solução ótima corresponde a desmontar três produtos, em vez de dois.

Essas e outras situações contra-intuitivas são tratadas com mais detalhes na seção a seguir.

### 5.3.3.2 Análise de sensibilidade

Ainda utilizando como base dos cálculos um pedido de  $N = 3$ , os parâmetros do modelo foram modificados para verificar como afetam a decisão de quantos produtos desmontar e custos totais resultantes. Como o foco da presente pesquisa são os roteiros estocásticos, o objetivo principal é verificar como os custos das rotas e respectivas probabilidades influenciam as decisões.

Primeiramente o custo de uma das rotas,  $C_1$ , foi aumentado progressivamente, mantendo-se os demais custos constantes. Os resultados mostraram que a partir de determinado valor de  $C_1$ , desmontar mais itens que o necessário para atender ao pedido passa a ter custo total menor. Isso pode ser explicado da seguinte maneira: desmontar mais produtos que o necessário para atender à demanda, por um lado, incorre em custos maiores com desmontagem e estoque. Por outro lado, aumenta as chances de que se tenham mais itens que possam ser processados na rota de menor custo. E como este custo de uma das rotas é significativamente inferior, os custos maiores com desmontagem e estoque são compensados pelo menor custo esperado com as rotas.

Aumentando-se o valor de  $C_1$  é possível verificar também que, dentro de um intervalo de valores de  $C_1$ , para o estado (0,1), desmontar os produtos em mais de uma etapa passa a ter menores custos. Ou seja, nesse caso específico do estado (0,1), o custo esperado seria minimizado se o tomador de decisão optasse por começar desmontando apenas um produto. Em seguida, se o resultado fosse (1,1), o tomador de decisão deveria desmontar mais dois produtos, e se o resultado fosse (0,2), o tomador de decisão deveria desmontar mais um produto. Nessa situação, mesmo com o custo de *setup* incidindo duas vezes sobre o custo total, o custo mínimo esperado seria menor relativamente à decisão de desmontar a quantidade necessária ou superior para cumprir a ordem com um único *setup*. Isso pode ser explicado da seguinte maneira: semelhantemente ao caso anterior, há uma compensação de custos. Nesse caso, embora o custo com *setups* seja maior, ao desmontar primeiramente apenas um produto, o tomador de decisão pode, verificando o resultado obtido, tomar outra

decisão que aumente as chances de que se tenham mais itens que possam ser processados na rota de menor custo. E como este custo de uma das rotas é significativamente inferior, os custos maiores com *setups* são compensados pelo menor custo esperado com as rotas.

A alteração das probabilidades das rotas influencia nos valores de  $C_1$  e  $C_2$  que determinam as condições acima. Por exemplo, quanto menor a probabilidade da rota 1, menor será a diferença entre  $C_1$  e  $C_2$  que justifica a desmontagem de mais produtos que o necessário para atender a demanda.

A situação modelada no presente trabalho é a de um sistema de remanufatura sob encomenda, com suprimento infinito de produtos usados e 100% de recuperação dos materiais. Na prática, considerando-se que não deve haver faltas (*backorder*) a decisão lógica seria a de sempre desmontar a exata quantidade de produtos demandada. No entanto, com a análise de sensibilidade realizada aqui, pôde-se verificar que (i) em alguns casos, desmontar mais produtos que o necessário para atender a determinado pedido pode significar redução do custo total esperado; e (ii) em alguns casos, desmontar os produtos em mais de uma etapa, ou seja, realizando mais de um *setup*, pode significar redução do custo total esperado.

### 5.3.4 Validação do modelo matemático

Primeiramente, pode-se verificar que sendo os custos das rotas iguais, a decisão de quantos produtos desmontar e os custos totais resultantes são independentes das probabilidades. Ou seja, utilizando-se o modelo proposto é possível verificar que o custo total ótimo é o mesmo quaisquer que sejam as probabilidades atribuídas às rotas 1 e 2, desde que os custos das rotas sejam iguais e que sejam mantidos os valores dos demais parâmetros. Consequentemente, o custo total resultante também é o mesmo. Como esse seria o resultado esperado em uma situação prática, o modelo é válido.

Outra verificação que valida o modelo é por meio da atribuição de uma probabilidade muito alta a uma das rotas, que na prática representaria a existência de apenas um roteiro produtivo. Para constatar a validade do modelo, o custo total encontrado pelos cálculos deve ser o mesmo para a situação em que existisse apenas um roteiro. Por exemplo, para os mesmos parâmetros utilizados na seção 5.3.3.1, somente modificando as probabilidades da rota 1 para 0,999 e da rota 2 para 0,001 encontra-se como custo total ótimo do estado (0,0) o valor de 77,09. Por outro lado, se houvesse apenas uma rota com custo 11,

custo de desmontagem igual a 10 e custo de *setup* igual a 14, então o custo de desmontar 3 produtos seria igual a 77, pois:  $10(3)+14+3(11) = 77$ . Esse resultado confirma que, se na prática houvesse apenas uma rota com custo igual a 11, o custo total de se desmontar 3 produtos para atender uma demanda igual a 3 seria 77, como confirmado pelo modelo.

#### 5.4 Aplicação prática do modelo

Nesta seção o modelo é resolvido utilizando-se parâmetros coletados de uma situação real. A empresa que forneceu os dados, cujo nome será preservado, é uma remanufaturadora independente localizada no interior do estado de São Paulo e que atua no setor de remanufatura de autopeças desde 1991.

O produto remanufaturado é embreagem. Os principais itens que formam a embreagem são: platô, disco de embreagem, mola membrana, tampa e rolamento. O item foco é a mola membrana, que corresponde a aproximadamente 7 % do custo total do produto.

Após a desmontagem da embreagem, a mola membrana pode seguir por dois roteiros diferentes: o primeiro roteiro, aqui denominado de roteiro 1, possui as seguintes operações: desengraxe, jateamento, lixamento, tratamento de superfície e banho protetivo; o segundo roteiro, aqui denominado de roteiro 2, possui as seguintes operações: desengraxe, jateamento, metalização, lixamento, tratamento de superfície e banho protetivo. O roteiro 2 possui uma operação a mais que o roteiro 1, a operação de metalização. As molas com desgaste maior devem passar pelo roteiro produtivo 2. Em função disso o custo do roteiro 2 é cerca de 1% superior ao do roteiro 1. De acordo com os dados históricos da empresa, aproximadamente 30% das molas membranas passam pelo roteiro 2 e os restantes 70% passam pelo roteiro 1. O custo de preparação (*setup*) da desmontagem é relativamente pequeno, pois são necessários apenas poucos ajustes e que são realizados em tempo relativamente curto. Os custos de desmontagem de cada embreagem e de estocagem de cada mola membrana também são relativamente pequenos, porém superiores ao custo de *setup*.

Para que os dados sejam mantidos em sigilo, os valores dos custos foram modificados, mantendo-se as proporções para que os resultados e análises permaneçam válidos. Assim, definindo-se o custo do roteiro 1 como 100 unidades monetárias, o custo do roteiro 2 é de 101 unidades monetárias. Os demais custos, modificados em função dos custos dos dois roteiros produtivos, são: o custo de desmontagem de uma embreagem é de 7

unidades monetárias; o custo de *setup* da desmontagem é de 1 unidade monetária; e o custo de estocagem de uma peça do tipo mola membrana é de 5 unidades monetárias. Para facilitar a compreensão dos resultados e comparação com o exemplo ilustrativo da seção 5.3.3.1, é analisada uma situação fictícia de um pedido de 3 embreagens, ou seja, o parâmetro  $N$  será igual a 3.

Com isso, as equações tomam a seguinte forma:

$$f^*(r_1, r_2) = \underset{m < 3 - r_1 - r_2}{\text{mín}} \left[ \underset{m \geq 3 - r_1 - r_2}{\text{mín}} \left[ 7m + 1 + \sum_{k=0}^m (C_{m,k} 0,7^k 0,3^{m-k} (f^*(r_1 + k, r_2 + m - k))) \right] \right]$$

$$\underset{m \geq 3 - r_1 - r_2}{\text{mín}} \left[ 7m + 1 + \sum_{k=0}^m (C_{m,k} 0,7^k 0,3^{m-k} (W_k + f^*(r_1 + k, r_2 + m - k))) \right]$$

Em que,

$$W_k = \underset{m \geq 3 - r_1 - r_2}{\text{mín}} (n_1 100 + n_2 101) + 5(r_1 + r_2 + m - 3), \quad n_1, n_2 \in \mathbb{Z}, 0 \leq n_1 \leq r_1 + k, 0 \leq n_2 \leq r_2 + m - k, n_1 + n_2 = 3$$

$$f^*(r_1, r_2) = 0 \quad \forall (r_1 + r_2) \geq 3.$$

A tabela 5.2 a seguir resume os resultados dos cálculos de acordo com as equações acima e a decisão a ser tomada em cada estado.

$f(r_1, r_2)$	$m$				$f^*(r_1, r_2)$	Desmontar
	1	2	3	4		
$f(1,1)$	309,3	320,6	332,2	...	309,3	1
$f(2,0)$	308,3	320,1	332,0	...	308,3	1
$f(0,2)$	310,3	321,6	332,9	...	310,3	1
$f(1,0)$	316,6	315,6	327,2	339,1	315,6	2
$f(0,1)$	317,6	316,6	327,9	339,4	316,6	2
$f(0,0)$	323,9	323,9	322,9	334,4	322,9	3

**TABELA 5.2 – Resultados da aplicação prática do modelo**

Portanto, a solução ótima corresponde a:

- quando o estado inicial for (1,1), desmontar apenas um produto;
- quando o estado inicial for (2,0), desmontar apenas um produto;
- quando o estado inicial for (0,2), desmontar apenas um produto;
- quando o estado inicial for (1,0), desmontar dois produtos;
- quando o estado inicial for (0,1), desmontar dois produtos; e
- quando o estado inicial for (0,0), desmontar três produtos.



Uma análise de sensibilidade para o caso real aqui estudado demonstra várias situações em que as decisões seriam diferentes das triviais para uma remanufatura sob encomenda com 100% de aproveitamento dos itens. A figura 5.2 abaixo mostra a variação dos valores de  $C_2$  e os valores correspondentes de  $m$  (quantidade a ser desmontada) que minimizam o custo total esperado para cada estado em que  $(r_1+r_2 < 3)$ . Os demais custos foram mantidos os mesmos.

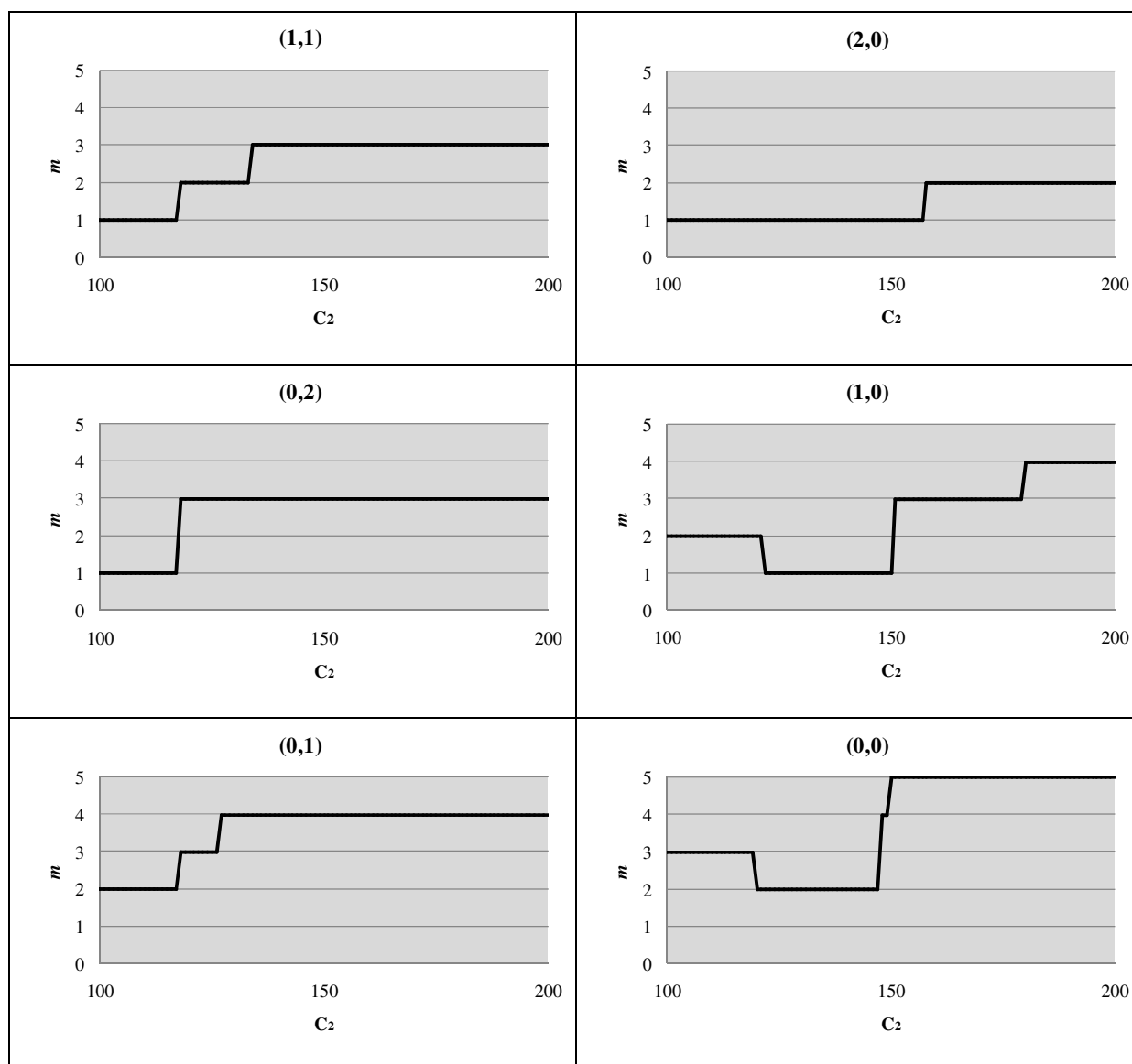


FIGURA 5.2 – Análise de sensibilidade do caso real com variação do custo da rota 2

Nota-se, por exemplo, que se o custo da rota 2 for 18% superior ao custo da rota 1, ou seja,  $C_1 = 100$  e  $C_2 = 118$ , mantendo-se os demais custos, o programa mestre de desmontagem deveria ser modificado para:

a) quando o estado inicial for (1,1), desmontar dois produtos;

- b) quando o estado inicial for (2,0), desmontar apenas um produto;
- c) quando o estado inicial for (0,2), desmontar três produtos;
- d) quando o estado inicial for (1,0), desmontar dois produtos;
- e) quando o estado inicial for (0,1), desmontar três produtos; e
- f) quando o estado inicial for (0,0), desmontar três produtos.

Já se o custo da rota 2 fosse 30% superior ao custo da rota 1, ou seja,  $C_1 = 100$  e  $C_2 = 130$ , mantendo-se os demais custos, o programa mestre de desmontagem deveria ser modificado para:

- a) quanto o estado inicial for (1,1), desmontar apenas dois produtos;
- b) quanto o estado inicial for (2,0), desmontar apenas um produto;
- c) quanto o estado inicial for (0,2), desmontar três produtos;
- d) quando o estado inicial for (1,0), desmontar um produto. Se o estado resultante for (2,0), deve-se desmontar mais um produto e se o estado resultante for (1,1), deve-se desmontar mais dois produtos;
- e) quando o estado inicial for (0,1), desmontar quatro produtos; e
- f) quando o estado inicial for (0,0), desmontar dois produtos. Se o estado resultante for (2,0), deve-se desmontar mais um produto, se o estado resultante for (1,1), deve-se desmontar mais dois produtos e se o estado resultante for (0,2), deve-se desmontar mais três produtos.

Outras situações semelhantes podem ser verificadas na figura 5.2.

## 5.5 Considerações finais

O objetivo do presente capítulo é propor um modelo matemático para determinar a quantidade ótima de produtos a ser desmontada para minimizar os custos de um sistema de remanufatura com a característica roteiros estocásticos, para preencher uma lacuna identificada na literatura e na prática.

As principais limitações do modelo proposto são considerar somente duas rotas possíveis, a geração de apenas um item na desmontagem e somente a característica roteiros estocásticos. Dessa forma, trabalhos futuros devem superar estas limitações, até o ponto em que a complexidade do modelo não incorra na “maldição da dimensionalidade”, o que o tornaria impraticável, ou então até que este acabe se distanciando das necessidades reais práticas por ser difícil de ser implantado.

A utilização do modelo proposto é ilustrada por meio de um exemplo numérico e de uma análise de sensibilidade para se verificar a influência dos custos e probabilidades das rotas na solução ótima. Uma situação real é solucionada por meio do modelo, utilizando-se os parâmetros de uma remanufatura de autopeças. As principais indicações gerenciais resultantes dessas análises e que contribuem para a prática dando uma compreensão melhor (*insights*) da característica roteiros estocásticos são:

- a) em alguns casos, desmontar mais produtos que o necessário para atender a um pedido pode ser vantajoso, em termos de custo total esperado, especialmente se no estado inicial houver mais itens na rota de maior custo. Isso porque, nessas situações, desmontar mais produtos aumentam as chances de que se tenham mais itens que devam passar pela rota de menor custo, compensando os custos extras de desmontagem e armazenagem;
- b) em alguns casos, desmontar os produtos em mais de uma etapa, ou seja, incorrendo em custos maiores com *setups*, pode ser vantajoso em termos de custo total esperado. Isso porque nessas situações, o tomador de decisão pode compensar os custos com *setups* pela redução dos custos esperados com o processamento na rota de menor custo, desmontando mais ou menos produtos em uma segunda etapa em função do estado resultante da primeira etapa de desmontagem.

A diferença entre os custos das rotas que tornam verdadeiras as afirmações (a) e (b) dependem das probabilidades das rotas. Quanto menor a probabilidade da rota de maior custo, menor será a diferença entre os custos das rotas que justifica a desmontagem de mais produtos que o necessário para atender a demanda ou a desmontagem em mais de uma etapa.

## **6 CONCLUSÕES**

### **6.1 Introdução**

O presente capítulo tem por objetivo concluir, apresentar as considerações finais e resumir os principais resultados da pesquisa realizada. Na seção 6.2 são apresentadas as respostas às questões que originaram o trabalho, na seção 6.3 os objetivos da pesquisa são avaliados, na seção 6.4 são resumidas as principais contribuições, na seção 6.5 são expostas as principais limitações e na seção 6.6 são propostos trabalhos futuros para complementar e/ou ampliar os resultados alcançados.

### **6.2 Respostas às questões de pesquisa**

As questões de pesquisa e respectivas respostas são apresentadas abaixo.

1) Quais são as necessidades de métodos e modelos na literatura para a remanufatura, no que se refere ao PCP e as características específicas da remanufatura?

Na literatura, as necessidades são:

- a) estudos que tratem de previsão e que levem em consideração as características necessidade de desmontar os produtos retornados, necessidade de rastreamento ao longo do processo, e roteiros estocásticos;
- b) pesquisas que tratem da atividade de planejamento agregado e que levem em conta as características necessidade de desmontar os produtos retornados, necessidade de rastreamento ao longo do processo e roteiros estocásticos;
- c) trabalhos que tratem da atividade de programação mestre da produção e que levem em consideração as características necessidade de rastreamento ao longo do processo e roteiros estocásticos;
- d) estudos que tratem de sistemas de coordenação de ordens e que levem em conta a necessidade de rastreamento ao longo do processo;

- e) estudos que foquem o planejamento da capacidade para sistemas de remanufatura levando-se em conta a necessidade de rastreamento ao longo do processo; e
- f) estudos que foquem a gestão e controle de estoques para sistemas de remanufatura com roteiros estocásticos.

2) Quais são as necessidades de métodos e modelos na remanufatura na prática em algumas empresas instaladas no Brasil, no que se refere ao PCP e as características específicas da remanufatura?

Os resultados dos estudos de caso realizados em quatro empresas do setor de remanufatura de autopeças apontam que sejam necessárias soluções para as características incerteza quanto à quantidade e momento de retorno, necessidade de balancear o retorno dos produtos com a demanda, necessidade de desmontar os produtos retornados, incerteza quanto à taxa de recuperação dos materiais, necessidade de uma rede de logística reversa, alta variabilidade dos tempos de processamento e roteiros estocásticos para qualquer uma das atividades do PCP.

### **6.3 Avaliação dos objetivos**

O principal objetivo da presente pesquisa é propor um método/modelo para preencher uma lacuna comum entre a literatura e a prática no que se refere ao PCP levando-se em consideração as características específicas da remanufatura. Tal objetivo é alcançado por meio da elaboração de um modelo matemático baseado em programação dinâmica probabilística para realização da programação mestre de desmontagem de produtos em sistemas de remanufatura com roteiros estocásticos. O modelo é inédito e traz compreensões sobre a tomada de decisão em ambientes de remanufatura em que se queira minimizar o custo total levando-se em consideração custos de desmontagem, estocagem, *setup* e com roteiros produtivos incertos.

## 6.4 Contribuições

As principais contribuições da presente pesquisa podem ser divididas em:

a) contribuições científicas:

- revisão bibliográfica sobre o PCP para a remanufatura, evidenciando as lacunas ainda existentes na literatura,
- realização de estudos de caso, descrevendo situações de algumas remanufaturas que atuam no setor de autopeças, suas características, dificuldades, realização do PCP, etc.,
- proposição de um modelo matemático baseado em programação dinâmica estocástica para elaborar o programa mestre de desmontagem em remanufaturas com roteiros probabilísticos,
- preenchimento de uma lacuna identificada na literatura a respeito de uma das atividades do PCP na remanufatura;

b) contribuições para a prática:

- demonstração de situações cujas decisões são contra-intuitivas ao se elaborar o programa mestre de desmontagem considerando roteiros estocásticos,
- geração de indicações gerenciais (*insights*) a respeito de decisões sobre a quantidade a ser desmontada de produtos com base na situação inicial do sistema (número de itens já desmontados em cada rota produtiva) com o objetivo de minimizar o custo total,
- proposição de um método matemático que pode ser facilmente implantado em uma planilha eletrônica para auxiliar tomadores de decisão em remanufaturas cujas condições se enquadrem na situação modelada.

## 6.5 Limitações da pesquisa

O modelo matemático proposto apenas considera uma característica específica da remanufatura, a saber, roteiros estocásticos. Também, no modelo somente é tratado o caso em que a desmontagem gera apenas um item cujos roteiros produtivos tenham custos significativos. Além disso, foram consideradas apenas duas rotas possíveis, quando na prática podem existir até  $2^n - 1$  rotas com custos diferentes possíveis (em que  $n$  é o número de equipamentos da remanufatura).

## 6.6 Trabalhos Futuros

Além das lacunas listadas na seção 6.2, em função principalmente das limitações da presente pesquisa, propõe-se como trabalhos futuros para ampliar e/ou complementar os resultados já alcançados:

- a) acrescentar outras características específicas da remanufatura ao modelo, principalmente a característica incerteza quanto à taxa de recuperação dos materiais, para que a determinação de quantos produtos desmontar seja mais realista;
- b) considerar no modelo que mais de um item seja gerado na desmontagem e cujos custos sejam significativos para considerar seus roteiros produtivos;
- c) expandir o modelo para mais de duas rotas, até o limite em que o número de variáveis de estado seja computacionalmente tratável.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACKOFF, R. L. *The art of problem solving: accompanied*. New York: John Wiley, 1978.
- AHISKA, S. S.; KING, R. E. Inventory optimization in a one product recoverable manufacturing system. *International Journal of Production Economics*, v. 124, 11–19, 2010.
- AKSOY, H. K.; GUPTA, S. M. Buffer allocation plan for a remanufacturing cell. *Computers & Industrial Engineering*, v. 48, p. 657–677, 2005.
- AKSOY, H. K.; GUPTA, S. M. Capacity and buffer trade-Offs in a remanufacturing system. *Proceedings of the SPIE International Conference on Environmentally Conscious Manufacturing II*, Newton, Massachusetts, p. 167-174, 2001.
- AKSOY, H. K.; GUPTA, S. M. Remanufacturing control in multistage systems with stochastic recovery rates. *Proceedings of the SPIE International Conference on Environmentally Conscious Manufacturing IV*, Philadelphia, Pennsylvania, p. 264-273, 2004.
- AKSOY, H. K.; GUPTA, S. M. Near optimal buffer allocation in remanufacturing systems with N-policy. *Computers & Industrial Engineering*, v. 59, 496–508, 2010.
- ALINOVIA, A.; BOTTANIA, E.; MONTANARI, R. Reverse Logistics: a stochastic EOQ-based inventory control model for mixed manufacturing/remanufacturing systems with return policies. *International Journal of Production Research* (article in press), 2011.
- ALLAHVERDIA, A.; GUPTA, J. N. D.; ALDOWAISAN, T. A review of scheduling research involving setup considerations. *Omega*, v. 27, n. 2, 219-239, 1999.
- ANDER-EGG, E. *Introducción a las técnicas de investigación social: para trabajadores sociales*. 7ª Ed. Buenos Aires: Humanitas, 1978.
- ANDRADE, E. L. *Introdução à pesquisa operacional: métodos e modelos para a análise de decisão*. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- APAREM, *Associação Paulista de Retífica de Motores*, Expo Reman Recon 2006. Disponível em: <<http://www.aparem.org.br>>. Acesso em: 24 novembro 2008.
- ARAS, N.; BOYACI, T.; VERTER, V. The effect of categorizing returned products in remanufacturing. *IIE Transactions*, v. 36, p. 319-331, 2004.
- ARAS, N.; VERTER, V.; BOYACI, T. Coordination and priority decisions in hybrid manufacturing/remanufacturing systems. *Production And Operations Management*, v. 15, n. 4, pp. 528–543, 2006.
- ARONSON, R. B. Remanufactured machine tools. *Manufacturing Engineering*, v. 131, n. 6, p. 75-83, 2003.
- ATASU, A.; SARVARY, M.; VAN WASSENHOVE, L. N. Remanufacturing as a Marketing Strategy. *Management Science*, v. 54, n. 10, 1731–1746, 2008.



AZEKA, F. *Identificação dos principais autores do PCP e análise da lacuna entre teoria e prática do PCP na região de São Carlos*. 2003. 167f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2003.

BAGHERPOUR, M.; POURGHANNAD, B.; SHAHRAKI, N. A New approach for an inventory model of a remanufacturing system with stochastic decomposition process. *Logistik Management*, n. 4, p.325-338, 2009.

BALLOU, R. H. The evolution and future of logistics and supply chain management. *Produção*, v. 16, n. 3, 375-386, 2006.

Barba-Gutiérrez, Y.; Adenso-Díaz, B.; Gupta, S. M. Lot sizing in reverse MRP for scheduling disassembly. *International Journal of Production Economics*, n. 111, p. 741–751, 2008.

BAYINDIR, Z. P.; ERKIP, N.; GÜLLÜ, R. A model to evaluate inventory costs in a remanufacturing environment. *International Journal of Production Economics*, v. 81–82, p. 597–607, 2003.

BEAMON, B. M; FERNANDES, C. Supply-chain network configuration for product recovery. *Production Planning & Control*, v. 15, n. 3, 270–281, 2004.

BEHRET, H.; KORUGAN, A. Performance analysis of a hybrid system under quality impact of returns. *Computers & Industrial Engineering*, v. 56, p. 507–520, 2009.

BELLMAN, R. *Dynamic Programming*. Princeton: Princeton University Press, 1957.

BERTHAUT, F.; PELLERIN, R.; GHARBI, A. Control of a repair and overhaul system with probabilistic parts availability. *Production Planning & Control*, V. 20, n. 1, p. 57-67, 2009.

BERTO, R. M. V. S.; NAKANO, D. N. A Produção Científica nos Anais do Encontro Nacional de Engenharia de Produção: Um Levantamento dos Métodos e Tipos de Pesquisa. *Produção*, v. 9, n. 2, 65-75, 1998.

BERTSEKAS, D. P. *Dynamic programming and stochastic control*. Belmont, MA: Athena Scientific, 2000.

BHATTACHARYA, S.; GUIDE, V. D. R. Jr.; WASSENHOVE, L. N. V. Optimal order quantities with remanufacturing across new product generations. *Production And Operations Management*, v. 15, n. 3, p. 421–431, 2006.

BRYMAN, A. *Research methods and organization studies*. London, Uniwin Hyman, 1989.

BURBIDGE, J. L. *Production control: a universal conceptual framework*. Production Planning & Control, v. 1, n. 1, 3-16, 1990.

CHENG, T. C. E.; SIN, C. C. S. A state-of-the-art review of parallel-machine scheduling research. *European Journal of Operational Research*, v. 47, n. 3, 271-292, 1990.

CHIOTELLIS, S.; KERNBAUM, S.; SELIGER, G. *Remanufacturing process planning for IT equipment*. German Research Foundation (Deutsche Forschungsgemeinschaft, DFG) within the industry transfer project 64, E8, Department of Assembly Technology and Factory Management, PTZ 2, Pascalstr. 8-9, DE 10587 Berlin, 2008.

CHIU, C. L. 3 R's of used car recovery in Philippine's approach. *Journal of Management and Social Sciences*, v. 4, n. 1, p. 12-28, 2008.

CLEGG, A. J.; WILLIAMS, D. J.; UZSOY, R. Production planning for companies with remanufacturing capability. *IEEE Transactions On Engineering Management*, 186-191, 1994.

COLIN, E. C. *Pesquisa operacional: 170 aplicações em estratégia, finanças, logística, produção, marketing e vendas*. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

CONTADOR, J. C.; CONTADOR, J. L. *Programação e controle da produção para indústria intermitente*. In: Contador, J. C. *Gestão de Operações*. São Paulo: Edgar Blücher, 1997.

ÇORBACIOGLU, U.; VAN DER LAAN, E. A. Setting the holding cost rates in a two-product system with remanufacturing. *International Journal of Production Economics*, v. 109, p. 185–194, 2007.

CORRÊA, H. L.; GIANESI, I. G. N.; CAON, M. *Planejamento, programação e controle da produção: MRPII / ERP: conceitos, uso e implantação*. São Paulo: Atlas, 2001.

CORRÊA, H.; GIANESI I. *Sistemas de Planejamento e Controle da Produção*. In: Contador, J. C. *Gestão de Operações*. São Paulo: Edgar Blücher, 1997.

COSTA FILHO, C. F. F.; COELHO JÚNIOR, L. C. B.; COSTA, M. G. F. Indústria de cartucho de toner sob a ótica da remanufatura: estudo de caso de um processo de melhoria. *Produção*, v. 16, n. 1, 100-110, 2006.

DARABĂ, D. Remanufacturing – opportunities and barriers. *7th international multidisciplinary conference*, Romania, 2007.

DEBO, L. G.; TOKTAY, L. B.; WASSENHOVE, L. N. V. Market segmentation and product technology selection for remanufacturable products. *Management Science*, v. 51, n. 8, p. 1193–1205, 2005.

DECROIX, G. A. Optimal policy for a multiechelon inventory system with remanufacturing. *Operations Research*, v. 54, n. 3, p. 532–543, 2006.

DENARDO, E. V. *Dynamic programming: models and applications*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1982.

DENIZEL, M.; FERGUSON, M.; SOUZA, G. C. Multiperiod remanufacturing planning with uncertain quality of inputs. *IEEE Transactions On Engineering Management*, v. 57, n. 3, 394-404, 2010.

DEPUY, G.W.; USHER, J. S.; WALKER, R. L.; TAYLOR, G. D. Production planning for remanufactured products. *Production Planning and Control*, v. 18, n. 7, p. 573-583, 2007.

- DI, W.; WANG, M. Optimal design of manufacturing/remanufacturing logistics network based on uncertain programming. *International Conference on Management Science & Engineering*, 867-873, Moscow, Russia, 2009.
- DOH, H. H.; LEE, D. H. Generic production planning model for remanufacturing systems. *Proceedings of IMechE*, v. 224, p. 159-168, 2009.
- DOMÍNGUEZ, E. A. *Boosting remanufacturing industry: looking for a change in manufacturing paradigm*. Master o Science in Environmental Management Business, 2005.
- DOWLATSHAHI, S. A strategic framework for the design and implementation of remanufacturing operations in reverse logistics. *International Journal of Production Research*, v. 43,n. 16, p. 3455 – 3480, 2005.
- ERNST, A. T. ; JIANG, H.; KRISHNAMOORTHY, M.; SIER, D. Staff scheduling and rostering: a review of applications, methods and models. *European Journal of Operational Research*, v. 153, n. 1, 3-27, 2004.
- FARIAS, A. T. O. *Desdobramento da função qualidade na prestação de serviços em uma empresa de remanufatura de autopeças*. 2004. 128f. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.
- FENG, Y.; VISWANATHAN, S. A new lot-sizing heuristic for manufacturing systems with product recovery. *International Journal of Production Economics*, (article in press), 2010.
- FERGUSON, M.; GUIDE, V. D. R. JR.; KOCA, E. SOUZA, G. C. Remanufacturing planning with different quality levels for product returns. *Social Science Research Network Electronic Paper Collection*, Working Paper No. RHS-06-050, 2007.
- FERNANDES, F. C. F.; GODINHO FILHO, M. *Planejamento e controle da produção: dos fundamentos ao essencial*. São Paulo: Atlas, 2010.
- FERNANDES, F. C. F.; GODINHO FILHO, M. Sistemas de coordenação de ordens: revisão, classificação, funcionamento e aplicabilidade. *Gestão & Produção*, v.14, n. 2, 337-352, 2007.
- FERRER, G. On the widget remanufacturing operation. *European Journal of Operational Research*, v. 135, p. 373-393, 2001.
- FERRER, G.; AYRES, R. U. The impact of remanufacturing in the economy. *Ecological Economics*, v. 32, p. 413–429, 2000.
- FERRER, G.; KETZENBERG, M. E. Value of information in remanufacturing complex products. *IIE Transactions*, v. 36, p. 265-277, 2004.
- FERRER, G.; WHYBARK, D. C. From garbage to goods: successful remanufacturing systems and skills. *Business Horizons*, November-December, p. 55-64, 2000.
- FERRER, G.; WHYBARK, D. C. Material planning for a remanufacturing facility. *Production and Operations Management*, v. 10, n. 2, 2001.

FLEISCHMANN, M.; BLOEMHOF-RUWAARD, J. M.; DEKKER, R.; VAN DER LAAN, E.; VAN NUNEN, J. O. A. E. E.; WASSENHOVE, L. N. V. Quantitative models for reverse logistics: a review. *European Journal of Operational Research*, v. 103, p. 1-17, 1997.

FRANKE, C.; BASDERE, B.; CIUPEK, M.; SELIGER, S. Remanufacturing of mobile phones—capacity, program and facility adaptation planning. *Omega*, v. 34, p. 562-570, 2006.

FREITAS, H.; OLIVEIRA, M.; SACCOL, A. Z. MOSCAROLA, J. O método de Pesquisa Survey. *Revista de Administração*. v. 35, n. 3, 105-112, 2000.

GALBRAITH, J. *Designing complex organizations*. Addison-Wesley, Reading, MA, 1973.

GALBRETH, M. R.; BLACKBURN, J. D. Optimal acquisition and sorting policies for remanufacturing. *Production And Operations Management*, v. 15, n. 3, p. 384–392, 2006.

GAN, S.; SU, C. Inventory control for remanufacturing system with stochastic product returns. *IEEE Transactions On Engineering Management*, 802-807, 2009.

GEORGIADIS, P.; ATHANASIOU, E. The impact of two-product joint lifecycles on capacity planning of remanufacturing networks. *European Journal of Operational Research*, v. 202, 420–433, 2010.

GEORGIADIS, P.; VLACHOS, D.; TAGARAS, G. The impact of product lifecycle on capacity planning of closed-loop supply chains with remanufacturing. *Production And Operations Management*, v. 15, n. 4, p. 514–527, 2006.

GEYER, R.; WASSENHOVE, L. N. V.; ATASU, A. The economics of remanufacturing under limited component durability and finite product life cycles. *Management Science*, v. 53, n. 1, p. 88-100, 2007.

GHARBI, A.; PELLERIN, R.; SADR, J. Production rate control for stochastic remanufacturing systems. *International Journal of Production Economics*, v. 112, p. 37–47, 2008.

GHAURI, P. N.; GRONHAUG, K. *Research methods in business studies: A Practical Guide*. New York: Prentice Hall, 1995.

GHIANI, G.; GUERRIERO, F.; LAPORTE, B. G.; MUSMANNO, R. Real-time vehicle routing: solution concepts, algorithms and parallel computing strategies. *European Journal of Operational Research*, v. 151, n. 1, p. 1-11, 2003.

GIUNTINI, R.; GAUDETTE, K. Remanufacturing: the next great opportunity for boosting US productivity. *Business Horizons*, November-December, p. 42-48, 2003.

GOLANY, B.; YANG, J.; YU, G. Economic lot sizing with remanufacturing options. *IIE Transactions*, v. 33, p. 995-1003, 2001.

GOVETTO, S. *Determining the environmental impact of remanufacturing end-of-life strategies compared to recycling and disposal strategies*. Master's of Science in Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, 2008.

GRAVES, R.; KONOPKA, J. M.; MILNE, R. J. Literature Review of Material Flow Control Mechanisms. *Production Planning & Control*, v. 6, 395-403, 1995.

GRAVES, S. C. A review of production scheduling. *Operations Research*, v. 29, n. 4, 646-656, 1981.

GRUBBSTROM, R. W.; TANG, O. Optimal production opportunities in a remanufacturing system. *International Journal of Production Research*, v. 44, n. 18-19, p. 3953-3966, 2006.

GUIDE, V. D. R. JR.; SOUZA, G. C.; VAN DER LAAN, E. A. Performance of static priority rules for shared facilities in a remanufacturing shop with disassembly and reassembly. *European Journal of Operational Research*, v. 164, p. 341-353, 2005.

GUIDE, V. D. R. JR.; WASSENHOVE, L. N. V. Managing products returns for remanufacturing. *Production and Operations Management*, v. 10, n. 2, p. 142-155, 2001.

GUIDE, V. D. R. JR.; WASSENHOVE, L. N. V. The evolution of closed-loop supply chain research. *Operations Research*, v. 57, n. 1, p. 10-18, 2009.

GUIDE, V. D. R. Production planning and control for remanufacturing: industry practice and research needs. *Journal of Operations Management*, v. 18, n. 4, 467-483, 2000.

GUIDE, V. D. R.; JAYARAMAN, V.; LINTON, J. D. Building contingency planning for closed-loop supply chains with product recovery. *Journal of Operations Management*, v. 21, 259-279, 2003.

GUIDE, V. D. R.; JAYARAMAN, V.; SRIVASTAVA, R. Production planning and control for remanufacturing: A state-of-the-art survey. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 15, n. 1, 221-230, 1999.

GUNGOR, A.; GUPTA, S. M. Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery: a survey. *Computers & Industrial Engineering*, v. 36, 811-853, 1999.

HASTINGS, N. A. J. *Dynamic Programming: with management applications*. London: Butterworths, 1973.

HERMANSSON, H.; SUNDIN, E. Managing the remanufacturing organization for an optimal product life cycle. *IEEE Transactions On Engineering Management*, 2005.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. *Introdução à pesquisa operacional*. Porto Alegre: McGraw Hill, 2010.

HOPP, W.; SPEARMAN, M. *Factory Physics*. New York: McGraw Hill, 2008.

HORZOMI, A. M. Parts remanufacturing in the automotive industry. *Production and Inventory Management Journal*, v. 38, n. 1, 26-31, 1997.

HOU, Y.; ZHANG, H. Performance analysis on a complex remanufacturing system. *Asia - Pacific Journal of Operational Research*, v. 22, n. 3, p. 327-347, 2005.

HUA, H. Analysis of the bullwhip in a hybrid system with manufacturing/remanufacturing. *International Symposium on Information Engineering and Electronic Commerce*, p. 646-649, 2009.

HUAJUN, C.; YANBIN, D.; FEI, L. A disassembly capability planning model for the make-to-order remanufacturing system. *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, v. 7, n. 2, 329-332, 2008.

HUNTER, S. L.; BLACK, J. T. Lean remanufacturing: a cellular case study. *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, v. 6, n. 2, p. 129-144, 2007.

IERAPETRITOU, M.; LI, Z. *Modeling and managing uncertainty in process planning and scheduling*. Springer volume in Optimization and Logistics Challenges in the Enterprise, Springer, 2009.

IJOMAH, W.L. A tool to improve training and operational effectiveness in remanufacturing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, v. 21, n. 6, p.676-701, 2008.

INDERFURTH, K. Impact of uncertainties on recovery behavior in a remanufacturing environment: a numerical analysis. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, v. 35, n. 5, p. 318-336, 2005.

INDERFURTH, K. Optimal policies in hybrid manufacturing/remanufacturing systems with product substitution. *International Journal of Production Economics*, v. 90, p. 325-343, 2004.

INDERFURTH, K.; VAN DER LAAN, E. A. Leadtime effects and policy improvement for stochastic inventory control with remanufacturing. *International Journal of Production Economics*, v. 71, p. 381-390, 2001.

JULA, H. DESSOUKY, M. IOANNOU, P.A. Truck route planning in nonstationary stochastic networks with time windows at customer locations. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 7, n. 1, p. 51-62, 2006.

KARAMOUZIAN, A.; TEIMOURY, E.; MODARRES, M. A model for admission control of returned products in a remanufacturing facility using queuing theory. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 54, n. 1-4, p. 403-412, 2010.

KATO, P.; LAURINDO, F. J. B. Discutindo o Planejamento Integrado de uma Remanufatura em um ciclo fechado de Supply Chain. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, n°24, 03 a 05 de novembro, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis: ABEPRO, 2004.

KERR, W.; RYAN, C. Eco-efficiency gains from remanufacturing: a case study of photocopier remanufacturing at Fuji Xerox Australia. *Journal of Cleaner Production*, v. 9, p. 75-81, 2001.

KHOUBA, M. The single-period (news-vendor) problem: literature review and suggestions for future research. *Omega*, v. 27, n. 5, 537-553, 1999.

KIESMÜLLER, G. P. A new approach for controlling a hybrid stochastic manufacturing/remanufacturing system with inventories and different leadtimes. *European Journal of Operational Research*, v. 147, p. 62–71, 2003.

KIESMÜLLER, G. P.; VAN DER LAAN, E. A. An inventory model with dependent product demands and returns. *International Journal of Production Economics*, v. 72, p. 73-87, 2001.

KLEBER, R.; MINNERA, S.; KIESMÜLLER, G. A continuous time inventory model for a product recovery system with multiple options. *International Journal of Production Economics*, v. 79, p. 121–141, 2002.

KONSTANTARAS, I.; PAPACHRISTOS, S. Note on: An optimal ordering and recovery policy for reusable items. *Computers & Industrial Engineering*, v. 55, p. 729–734, 2008.

KONSTANTARAS, I.; PAPACHRISTOS, S. Optimal policy and holding cost stability regions in a periodic review inventory system with manufacturing and remanufacturing options. *European Journal of Operational Research*, v. 178, p. 433–448, 2007.

KONSTANTARAS, I.; SKOURI, K. Lot sizing for a single product recovery system with variable setup numbers. *European Journal of Operational Research*, v. 203, 326–335, 2010.

LAGE JUNIOR, M. Proposição de um jogo didático para o ensino-aprendizagem das diferenças entre manufatura e remanufatura. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, n°28, 13 a 16 de outubro, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: ABEPRO, 2008.

LAGE JUNIOR, M.; GODINHO FILHO, M. Análise estratégica do planejamento e controle da produção (pcp) na remanufatura: um estudo teórico. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, n°29, 06 a 09 de outubro, Salvador. *Anais...* Salvador: ABEPRO, 2009.

LAGE JUNIOR, M.; GODINHO FILHO, M. Variations of kanban system: literature review and classification. *International Journal of Production Economics*, v. 125, 13-21, 2010.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. *Fundamentos de metodologia científica*. 6ª edição, São Paulo: Atlas, 2005.

LAZZARINI, S. G. Estudos de caso: aplicabilidade e limitações do método para fins de pesquisa. *Economia e Empresas*. v. 2, n.4, 17-26, 1995.

LEE, J. E.; GEN, M.; RHEE, K. G. Network model and optimization of reverse logistics by hybrid genetic algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, v. 56, p. 951–964, 2009.

LEE, H. B.; CHO, N. W.; HONG, Y. S. A hierarchical end-of-life decision model for determining the economic levels of remanufacturing and disassembly under environmental regulations. *Journal of Cleaner Production*, v. 18, 1276-1283, 2010.

LI, Y.; CHEN, J.; CAI, X. Uncapacitated production planning with multiple product types, returned product remanufacturing, and demand substitution. *OR Spectrum*, v. 28, p. 101–125, 2006.

LI, Y.; CHEN, J.; CAI, X. Heuristic genetic algorithm for capacitated production planning problems with batch processing and remanufacturing. *International Journal of Production Economics*, v. 105, p. 301–317, 2007.

LI, J.; WU, Y.; LAI, K. K.; LIU, K. Replenishment routing problems between a single supplier and multiple retailers with direct delivery. *European Journal of Operational Research*, v. 190, p. 412–420, 2008.

LI, J.; GONZÁLEZ, M.; ZHU, Y. A hybrid simulation optimization method for production planning of dedicated remanufacturing. *International Journal of Production Economics*, v. 117, p. 286–301, 2009.

LI, X.; TIAN, P.; LEUNG, S. C. H. Vehicle routing problems with time windows and stochastic travel and service times: models and algorithm. *International Journal of Production Economics*, v. 125, p. 137–145, 2010.

LIANG, Y.; POKHAREL, S.; LIM, G. H. Pricing used products for remanufacturing. *European Journal of Operational Research*, v. 193, p. 390–395, 2009.

LIM, C.; SIM, E. Production Planning in Manufacturing/Remanufacturing Environment using Genetic Algorithm. *GECCO'05*, Washington, DC, USA., June 25-29, 2005.

LIN, Y. Optimal routing policy of a stochastic-flow network. *Computers & Industrial Engineering*, v. 56, p. 1414–1418, 2009.

LIU, G. F.; YANG, X. W. Multi-conditioned and Capacitated Production Planning Model for Remanufacturing System. *IEEE Transactions On Engineering Management*, 2009.

LUND, R. Remanufacturing: an American resource. In: *Proceedings Fifth International Environmentally Conscious Design and Manufacturing*. Rochester, NY, 1998.

LUND, R. Remanufacturing: United States experience and implications for developing nations. *The world bank*, Washington, DC, 1983.

MAHADEVAN, B.; PYKE, D. F.; Fleischmann, M. Periodic review, push inventory policies for remanufacturing. *European Journal of Operational Research*, v. 151, p. 536–551, 2003.

MAKRIDAKIS, S.; WHEELWRIGHT, S. C.; HYNDMAN, R. J. *Forecasting: methods and applications*. John Wiley & Sons, 1998.

MAPLES, G. E.; HEADY, R. B.; ZHU, Z. Parts remanufacturing in the oilfield industry. *Industrial Management & Data Systems*, v. 105, n. 8, p. 1070-1083, 2005.

MARTINS, R. A. *Sistemas de Medição de Desempenho: Um Modelo para Estruturação do Uso*. 1998. 269f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.



MEREDITH, J. Building operations management theory through case and field research. *Journal of Operations Management*, v. 16, 441-454, 1998.

MIGUEL, P. A. C. Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. *Produção*, v. 17, n. 1, 216-229, 2007.

MIGUEL, P. A. C (organizador). *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.

MINNER, S.; KLEBER, R. Optimal control of production and remanufacturing in a simple recovery model with linear cost functions. *OR Spektrum*, v. 23, p. 3–24, 2001.

MITRA, S. Revenue management for remanufactured products. *Omega*, v. 35, p. 553-562, 2007.

MULA, J.; POLER, R.; GARCÍA-SABATER, J.P.; LARIO, F.C. Models for production planning under uncertainty: a review. *International Journal of Production Economics*, v. 103, p. 271–285, 2006.

NAHMIAS, S. *Production and Operations Analysis*. New York: McGraw-Hill, 2009.

NAKASHIMA, K.; GUPTA, S. M. Optimal control of a remanufacturing system with consideration for product life cycle. *Proceedings of the SPIE International*, Providence, Rhode Island, p. 15-19, 2003.

NAKASHIMA, K.; ARIMITSU, H.; NOSE, T.; KURIYAMA, S. Optimal control of a remanufacturing system. *International Journal of Production Research*, v. 42, n. 17, p 3619-3625, 2004.

NENES, G.; PANAGIOTIDOU, S.; DEKKER, R. Inventory control policies for inspection and remanufacturing of returns: A case study. *International Journal of Production Economics*, v. 125, 300–312, 2010.

OLHAGER, J.; WIKNER, J. Production planning and control tools. *Production Planning and Control*, v. 11, n. 3, 210-222, 2000.

OUYANG, H.; ZHU, X. An inventory control model with disposal for manufacturing/remanufacturing hybrid system. *Computers & Industrial Engineering*. Article in Press, 2008.

PAN, Z.; TANG, J.; LIU, O. Capacitated dynamic lot sizing problems in closed-loop supply chain. *European Journal of Operational Research*, v. 198, 810–821, 2009.

PELLERIN, R.; GHARBI, A. Production control of hybrid repair and remanufacturing systems under general conditions. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 15, n. 4, 383-396, 2009.

PELLERIN, R.; SADR, J.; GHARBI, A.; MALHAME, R. A production rate control policy for stochastic repair and remanufacturing systems. *International Journal of Production Economics*, v. 121, 39–48, 2009.

PINEDO, M. *Planning and scheduling in manufacturing and services*. New York: Springer, 2005.

PIÑEYRO, P.; VIERA, O. The economic lot-sizing problem with remanufacturing and one-way substitution. *International Journal of Production Economics*, v. 124, 482–488, 2010.

POKHAREL, S.; MUTHA, A. Perspectives in reverse logistics: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 53, 175–182, 2009.

POTTS, C. N.; KOVALYOV, M. Y. Scheduling with batching: A review. *European Journal of Operational Research*, v. 120, n. 2, 228–249, 2000.

RAAFAT, F. Survey of literature on continuously deteriorating inventory models. *Journal of the Operational Research Society*, v. 42, n. 1, 27–37, 1991.

RICHTER, K.; SOMBRUTZKI, M. Remanufacturing planning for the reverse Wagner/Whitin models. *European Journal of Operational Research*, v. 121, p. 304–315, 2000.

RICHTER, K.; WEBER, J. The reverse Wagner/Whitin model with variable manufacturing and remanufacturing cost, *International Journal of Production Economics*, v. 71, p. 447–456, 2001.

ROBOTIS, A.; BHATTACHARYA, S.; WASSENHOVE, L. N. V. The effect of remanufacturing on procurement decisions for resellers in secondary markets. *European Journal of Operational Research*, v. 163 p. 688–705, 2005.

ROSS, S. M. *Introduction to stochastic dynamic programming*. San Diego: Academic Press, 1983.

ROY, A.; MAITY, K.; KAR, S.; MAITI, M. A production–inventory model with remanufacturing for defective and usable items in fuzzy-environment. *Computers & Industrial Engineering*, v. 56, 87–96, 2009.

RUBIO, S.; COROMINAS, A. Optimal manufacturing–remanufacturing policies in a lean production environment. *Computers & Industrial Engineering*, v. 55, p. 234–242, 2008.

SAADANY, A. M. A. E.; JABER, M. Y. A production/remanufacturing inventory model with price and quality dependant return rate. *Computers & Industrial Engineering*, article in Press: 2009.

SAADANY, A. M. A. EL.; JABER, M. Y. A production/remanufacture model with returns' subassemblies managed differently. *International Journal of Production Economics*, (article in press), 2010.

SAHINIDIS, N. V. Optimization under uncertainty: state-of-the-art and opportunities. *Computers and Chemical Engineering*, v. 28, p. 971–983, 2004.

SEITZ, M. A. Automotive remanufacturing: the challenges European remanufacturers are facing. *POMS 18th Annual Conference Dallas, Texas, U.S.A. May 4 to May 7, 2007*.

SHI, J.; ZHANG, G.; SHA, J. Optimal production and pricing policy for a closed loop system. *Resources, Conservation and Recycling*, (article in press), 2010.

SHI, J.; ZHANG, G.; SHA, J. Optimal production planning for a multi-product closed loop system with uncertain demand and return. *Computers & Operations Research*, v. 38, 641–650, 2011.

SILVA FILHO, O. S.; CEZARINO, W. Abordagem adaptativa aplicada ao planejamento agregado da produção sob incertezas. *Produção*, v. 20, n. 1, p. 114-126, 2010.

SILVER, E. A.; PYKE, D. F.; PETERSON, R. *Inventory management and production planning and scheduling*. John Wiley & Sons, 1998.

SINDIPEÇAS, Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores, *Desempenho do Setor de Autopeças*. Disponível em: < [www.sindipecas.org.br/](http://www.sindipecas.org.br/) >. Acesso em: 11 novembro 2008.

SIPPER, D.; BULFIN, R. L. Jr. *Production: planning, control, and integration*. New York: McGraw-Hill, 1997.

SMITH, S. S.; CHEN, W. Rule-based recursive selective disassembly sequence planning for green design. *Advanced Engineering Informatics*, (article in press), 2010.

SMITH, D. K. *Dynamic programming: a practical introduction*. London: Ellis Horwood Limited, 1991.

SOLER, J. B. Exploratory study of a foreign market: Remanufacturing in the automotive sector in Spain. *Master's of Environmental Management for Business*, Cranfield University at Silsoe, 2005.

SOUZA, G. C.; KETZENBERG, M. E. Two-stage make-to-order remanufacturing with service-level constraints. *International Journal of Production Research*, v. 40, n. 2, p. 477-493, 2002.

SOUZA, G. C.; KETZENBERG, M. E.; GUIDE, V D. R. Jr. Capacitated remanufacturing with service level constraints. *Production and Operations Management*, v. 11, n. 2, p. 231-248, 2002.

STANFIELD, P. M.; KING, R. E.; HODGSON, T. J. Determining sequence and ready times in a remanufacturing system. *IEE Transactions*, v. 38, p. 597-607, 2006.

STEVENSON, M.; HENDRY, L. C.; KINGSMAN B. G. A review of production planning and control: the applicability of key concepts to the make-to-order industry. *International Journal of Production Research*, v. 43, n. 5, 869–898, 2005.

SUBRAMONIAM, R.; HUISINGH, D.; CHINNAM, R. B. Remanufacturing for the automotive aftermarket-strategic factors: literature review and future research needs. *Journal of Cleaner Production*, v. 17, 1163–1174, 2009.

SUBRAMONIAM, R.; HUISINGH, D.; CHINNAM, R. B. Aftermarket remanufacturing strategic planning decision-making framework: theory & practice. *Journal of Cleaner Production*, v. 18, 1575-1586, 2010.

SUN, X.; ZHOU, Y.; NIU, Y.; SUN, G. Optimal Control for a Remanufacturing Reverse Logistics System under Buy-Back Policy. *Proceedings of the Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA)*, 2006.

SUNDIN, E.; BRAS, B. Making functional sales environmentally and economically beneficial through product remanufacturing. *Journal of Cleaner Production*, n. 13, p. 913-925, 2005.

TAHA, H. A. *Pesquisa operacional*. São Paulo: Pearson Prentice-Hall, 2008.

TAKAHASHI, K.; MORIKAWA, K.; MYRESHKA; TAKEDA, D.; MIZUNO, A. Inventory control for a Markovian remanufacturing system with stochastic decomposition process. *International Journal of Production Economics*, v. 108, p. 416–425, 2007.

TANG, O.; GRUBBSTRÖM, R. W. Considering stochastic lead times in a manufacturing/remanufacturing system with deterministic demands and returns. *International Journal of Production Economics*, v. 93–94, p. 285–300, 2005.

TANG, O.; GRUBBSTRÖM, R.W.; ZANONI, S. Economic evaluation of disassembly processes in remanufacturing systems. *International Journal of Production Research*, v. 42, n. 17, p. 3603-3617, 2004.

TANG, O.; GRUBBSTRÖM, R.W.; ZANONI, S. Planned lead time determination in a make-to-order remanufacturing system. *International Journal of Production Economics*, v. 108, p. 426–435, 2007.

TANG, O.; NAIM, M. M. The impact of information transparency on the dynamic behaviour of a hybrid manufacturing/remanufacturing system. *International Journal of Production Research*, v. 42, n. 19, p. 4135-4152, 2004.

TEUNTER, R. H.; VLACHOS, D. On the necessity of disposal option for returned items that can be remanufactured. *International Journal of Production Economics*, v. 75, p. 257-266, 2002.

TEUNTER, R.; BAYINDIR, Z. P.; VAN DEN HEUVEL, W. Dynamic lot sizing with product returns and remanufacturing. *International Journal of Production Research*, v. 44, n. 20, p. 4377-4400, 2006.

TEUNTER, R.; KAPARIS, K.; TANG, O. Multi-product economic lot scheduling problem with separate production lines for manufacturing and remanufacturing. *European Journal of Operational Research*, v. 191, p. 1241–1253, 2008.

TEUNTER, R.; TANG, O.; KAPARIS, K. Heuristics for the economic lot scheduling problem with returns. *International Journal of Production Economics*, v. 118, 323–330, 2009.

TEUNTER, R.; VAN DER LAAN, E. On the non-optimality of the average cost approach for inventory models with remanufacturing. *International Journal of Production Economics*, v. 79 p. 67-73, 2002.

TEUNTER, R.; VAN DER LAAN, E. VLACHOS, D. Inventory strategies for systems with fast remanufacturing. *Journal of the Operational Research Society*, v. 55, p. 475–484, 2004.

THIERRY, M.; SALOMON, M.; NUNEM, J. V.; WASENHOF, L. V. Strategic issues in product recovery management. *California Management Review*, v. 37, n. 2, 114-135, 1995.

TN/MA/W/18/Add.11. *Market Access For Non-Agricultural Products*. Disponível em <[www.reman.org](http://www.reman.org)>. Acesso em: 08 novembro 2008.

TOKTAY, L. B.; WEIN, L. M.; ZENIOS, S. A. Inventory management of remanufacturable products. *Management Science*, v. 46, n. 11, p. 1412-1426, 2000.

TRIPATHI, M.; AGRAWAL, S.; PANDEY, M. K.; SHANKAR, R.; TIWARI, M. K. Real world disassembly modeling and sequencing problem: optimization by algorithm of self-guided ants (ASGA). *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 25, 483–496, 2009.

TUBINO, D. F. *Manual de planejamento e controle da produção*. 2. Edição. São Paulo: Atlas, 2000.

VAN DER LAAN, E. An NPV and AC analysis of a stochastic inventory system with joint manufacturing and remanufacturing. *International Journal of Production Economics*, v. 81–82, p. 317–331, 2003.

VAN DER LAAN, E.; TEUNTER, R. Simple heuristics for push and pull remanufacturing policies. *European Journal of Operational Research*, v. 175, 1084-1102, 2006.

VERDERAME, P. M.; ELIA, J. A.; LI, J.; FLOUDAS, C. A. Planning and scheduling under uncertainty: a review across multiple sectors. *Industrial Engineering Chemical Research*, v. 49, p. 3993–4017, 2010.

VLACHOS, D.; GEORGIADIS, P.; IAKOVOU, E. A system dynamics model for dynamic capacity planning of remanufacturing in closed-loop supply chains. *Computers & Operations Research*, v. 34, p. 367–394, 2007.

VOLLMANN, T. E.; BERRY, W. L.; WHYBARK, D. C.; JACOBS, F. R. *Manufacturing planning and control systems for supply chain management*. McGraw-Hill, 5 edition, 2004.

VOLLMANN, T. E.; BERRY, W. L.; WHYBARK, D. C.; JACOBS, F. R. *Sistemas de Planejamento & Controle da Produção para o Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos*. Porto Alegre: Bookman, 2006.

WANG, J.; ZHAO, J.; WANG, X. Optimum policy in hybrid manufacturing / remanufacturing system. *Computers & Industrial Engineering*, (article in press), 2010.

WAZED, M. A.; AHMED, S.; YUSOFF, N. Uncertainty factors in real manufacturing environment. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, v. 3, n. 2, p. 342-351, 2009.

WEI, C.; LI, Y.; CAI, X. Robust optimal policies of production and inventory with uncertain returns and demand. *International Journal of Production Economics*, (article in press), 2010.

World Commission of Environment and Development – WCED. Disponível em: <<http://www.nssd.net>>. Acesso em: 20 março 2009.

WU, M. L. The research on modeling and optimizing of remanufacturing reverse logistics networks. *Proceedings of 4th International Conference on Computer Science & Education*, 660-664, 2009.

XIAOYAN, Y.; FENGLIAN, G. Controlling remanufacturing time based on Markov process. *International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering*, 2009.

YANG, J.; GOLANY, B.; YU, G. A Concave-Cost Production Planning Problem with Remanufacturing Options. *Naval Research Logistics*, v. 52, p. 443-458, 2005.

YANG, X.; GAO, F. Controlling Remanufacturing Time Based on Markov Process. *International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering* 176-178, 2009.

YIN, R. K. *Case study research: design and methods*. Newbury Park, California: Sage Publications, 1990.

ZANONI, S.; FERRETTI, I.; TANG, O. Cost performance and bullwhip effect in a hybrid manufacturing and remanufacturing system with different control policies. *International Journal of Production Research*, v. 44, n. 18-19, p. 3847-3862, 2006.

ZHANG, J.; LIU, X.; TU, Y. L. A capacitated production planning problem for closed-loop supply chain with remanufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-10, 2010.

ZHOU, L.; NAIMA, M. M.; TANG, O.; TOWILLA, D. R. Dynamic performance of a hybrid inventory system with a Kanban policy in remanufacturing process. *Omega*, v. 34, p. 585-598, 2006.

ZHOU, Y.; FAN, T.; ZHOU, H.; XU, W. Economic Ordering Quantities for Manufacturing/Recovery Inventory System with Outsourcing. *IEEE Transactions On Engineering Management*, 2010.

ZIKOPOULOS, C.; TAGARAS, G. On the attractiveness of sorting before disassembly in remanufacturing. *IEE Transactions*, v. 40, p. 313-323, 2008.

ZUSSMAN, E.; ZHOU, M. C. Design and Implementation of an Adaptive Process Planner for Disassembly Processes. *IEEE Transactions On Robotics And Automation*, v. 16, n. 2, 171-179, 2000.

## APÊNDICE A

### Protocolo de Coleta dos Dados nos Estudos de Caso

#### Parte A – Descrição da empresa

Empresa: \_\_\_\_\_

Receita anual da empresa: \_\_\_\_\_

Quantidade produzida por ano: \_\_\_\_\_

Respondente e função na empresa:

\_\_\_\_\_

Que produtos a empresa **remanufatura**:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

A empresa é a fabricante do produto novo ou somente **remanufatura** esses produtos?

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Qual a porcentagem de produtos **remanufaturados** em relação ao total de produtos da empresa (**remanufaturados** / (manufaturados + **remanufaturados**)): \_\_\_\_\_

Número de funcionários na **remanufatura**: \_\_\_\_\_

Número de diferentes produtos **remanufaturados**: \_\_\_\_\_

Que porcentagem da sua operação é:

\_\_\_\_\_ % produzida para estoque

\_\_\_\_\_ % produzida sob encomenda

\_\_\_\_\_ % montada sob encomenda

Sistemas de PCP utilizados:

MRP

Kanban

OPT

Outros, especifique: \_\_\_\_\_

#### Parte B – Identificação das características específicas da remanufatura

1.a Como a empresa obtém os produtos para serem **remanufaturados**:

a) % retorno dos consumidores: \_\_\_\_\_

b) % de ferro-velho: \_\_\_\_\_

c) % de agências terceirizadas: \_\_\_\_\_

d) % outros, por favor, especifique: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

1.b A empresa controla os momentos e quantidades de retorno dos produtos para serem **remanufaturados**?

Se sim, por favor, especifique como: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

2. A empresa tenta balancear o retorno dos produtos usados com a demanda por produtos **remanufaturados**?

2.1 Se sim, baseado em que : \_\_\_\_\_% previsão \_\_\_\_\_% carteira de pedidos \_\_\_\_\_% outros, especifique: \_\_\_\_\_

2.2 Se não, como o excesso de retornos é utilizado (exemplos: refugo, estoque, venda para outras remanufaturas, etc.): \_\_\_\_\_

3. A empresa desmonta os produtos retornados?

4.a A empresa utiliza métodos de controle da qualidade dos produtos retornados? Se sim, por favor, especifique como: \_\_\_\_\_

4.b A empresa controla a quantidade (porcentagem ou taxa) de recuperação dos materiais que compõem os produtos retornados? Se sim, como é feito: \_\_\_\_\_

4.c Quão estável ou previsível é essa taxa de recuperação:

\_\_\_ totalmente imprevisível/ totalmente instável

\_\_\_ pouco previsível / pouco estável

\_\_\_ previsível / estável

\_\_\_ totalmente previsível / totalmente estável

5. A empresa possui uma rede de logística reversa para obter os produtos retornados? Se sim, especifique como é feito: \_\_\_\_\_

6. Os produtos da empresa ao retornarem para serem **remanufaturados** devem ser remontados com a mesma combinação anterior? Ou seja, existe a exigência que as mesmas peças que formavam o produto retornado sejam remontadas identicamente, não permitindo a intercambiabilidade de peças comuns entre os produtos? Se sim, especifique como a empresa faz: \_\_\_\_\_

7.a Nas operações de desmontagem, quão estáveis ou previsíveis são os tempos de processamento:

\_\_\_ totalmente imprevisível/ totalmente instável

\_\_\_ pouco previsível / pouco estável

\_\_\_ previsível / estável

\_\_\_ totalmente previsível / totalmente estável

7.b Nas operações de **remanufatura**, quão estáveis ou previsíveis são os tempos de processamento:

\_\_\_ totalmente imprevisível/ totalmente instável

\_\_\_ pouco previsível / pouco estável

\_\_\_ previsível / estável

\_\_\_ totalmente previsível / totalmente estável

7.c Nas operações de remontagem, quão estáveis ou previsíveis são os tempos de processamento:

\_\_\_ totalmente imprevisível/ totalmente instável

\_\_\_ pouco previsível / pouco estável

\_\_\_ previsível / estável

\_\_\_ totalmente previsível / totalmente estável



8. Após a desmontagem dos produtos retornados, quão previsíveis são os roteiros de processamento:

totalmente imprevisível

pouco previsível

previsível

totalmente previsível

X – Além de todas as características questionadas acima (questões de 1 a 9, incluindo subitens) a empresa possui alguma outra dificuldade no que diz respeito ao PCP para a remanufatura?

Não

Sim, explique: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

#### Parte C - Outros

Por que a empresa está no ramo da remanufatura (marque mais de uma se necessário)?

lucro

preocupação com sustentabilidade

exigência da matriz / dos acionistas

Outro, por favor explique: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

O que a empresa avalia que seja o maior ou os maiores obstáculos ao crescimento da atividade de remanufatura?

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

A empresa gostaria de receber uma cópia dos resultados dessa pesquisa?  sim  não

Muito obrigado pelo seu tempo dedicado a essa pesquisa.