

DIMENSIONAMENTO DE LOTES COM REMANUFATURA E SUBSTITUIÇÃO

Maristela Oliveira Santos

Universidade de São Paulo – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação
Av. Trabalhador São-carlense, 400, 13560-970, São Carlos, SP, Brasil
e-mail: mari@icmc.usp.br

Sadao Massago

Universidade Federal de São Carlos – Departamento de Matemática
Rod. Washington Luís, Km 235, 13565-905, São Carlos, SP, Brasil
e-mail: sadao@dm.ufscar.br

Douglas Alem

Universidade Federal de São Carlos – Departamento de Engenharia de Produção
Rod. João Leme dos Santos, Km 110, 18052-780, Sorocaba, SP, Brasil
e-mail: douglas@ufscar.br

RESUMO

Neste trabalho, é proposto um modelo matemático para o problema de dimensionamento de lotes com remanufatura e substituição de itens, em que os processos de manufatura e remanufatura apresentam restrições de capacidade com tempos de preparação não desprezíveis. Além disso, supõe-se que as linhas de produção são compartilhadas por ambas as atividades produtivas. O objetivo do problema é determinar um plano de produção que atenda a demanda sem atraso, minimizando o custo de produção, preparação para a manufatura e remanufatura, estoque e substituição de itens. Experimentos computacionais preliminares indicam que o custo total pode ser reduzido se o custo de estoque dos produtos retornáveis for zero, por exemplo. Além disso, existe uma tendência na estabilização da demanda atendida pela remanufatura, sugerindo que mesmo altas taxas de retorno de itens não influenciam na decisão de remanufaturar mais itens.

PALAVRAS-CHAVE. Dimensionamento de lotes; Remanufatura; Substituição de itens.

ABSTRACT

In this paper, we propose a mathematical model for the lot-sizing problem with remanufacturing and items substitution, in which the manufacturing and remanufacturing processes presented capacity constraints with non-negligible setup times. Also, the production lines are supposed to be shared for both production activities. The goal of this problem is to determine a production schedule to fulfill demands without backlogging, minimizing the cost of production, setup for manufacturing and remanufacturing, inventory and items substitution. Preliminary computational experiments indicate that the total cost can be reduced if the returned product cost is null. for instance. Moreover, there is a trend in stabilizing the demand supplied from the remanufacturing process, which suggests that even high rates of returned items do not affect the decision of remanufacturing more items.

KEYWORDS. Lot-sizing; Remanufacturing; Items substitution.

1 Introdução

Os problemas de dimensionamento de lotes (PDL) e suas extensões em contextos industriais e logísticos têm sido amplamente estudados pela comunidade científica e pelos pesquisadores de diversas indústrias. Do ponto de vista teórico, existe o desafio no desenvolvimento de novos modelos matemáticos e métodos de solução eficientes para às variações do PDL. Na prática, a motivação é aumentar a eficiência dos sistemas produtivos, pela adoção de técnicas matemáticas e computacionais que auxiliem na tomada de decisão. Boas revisões sobre problemas clássicos de dimensionamento de lotes podem ser encontrados em Karimi et al. [2003], Brahimi et al. [2006] e Jans e Degraeve [2008].

Nos problemas tradicionais de dimensionamento de lotes, as decisões que devem ser tomadas estão relacionadas a quando e quanto produzir de determinado item para atender a demanda ao longo de um horizonte de planejamento definido, de modo a gerar um plano de produção de custo mínimo ou maximizar a margem de contribuição dos itens, por exemplo. Além disso, as demandas dos clientes são atendidas somente a partir de produtos manufaturados [Pan et al., 2009]. No entanto, devido a incentivos governamentais, legalidades sobre as questões ambientais e à competitividade, as indústrias têm buscado alternativas viáveis de produção e crescimento sustentável, o que inclui a remanufatura de produtos descartados para atender demandas futuras [Barquet e Forcellini, 2009]. Entretanto, existem algumas características próprias dos processos de remanufatura que os tornam desafiadores para o planejamento e programação da produção, dentre os quais podemos citar [Guide e Wassenhove, 2002; Lu, 2009]:

- A quantidade de produtos que retornam e o momento em que eles estarão disponíveis para serem remanufaturados são valores muito variáveis ao longo do horizonte de planejamento, pois dependem do ciclo de vida do produto, das preferências de mercado, do tipo de tecnologia ou processo que produziu o produto, etc. Isso dificulta a gestão de aquisição de materiais e as políticas de controle de estoque.
- A relação entre demanda e produção é mais complicada do que em problemas sem a possibilidade de remanufatura, pois a produção convencional depende da quantidade de produtos que retornam, que por sua vez depende do atendimento da demanda em períodos anteriores.
- Como as condições físicas e de funcionamento dos produtos retornáveis são variáveis, é difícil estimar os recursos requeridos na remanufatura, assim como se torna complexa a programação dos tipos de máquinas pelas quais o produto precisa passar e os tempos de preparação necessários, o que dificulta as decisões sobre o dimensionamento de lotes e/ou o sequenciamento da produção.
- O processo de desmontagem dos produtos remanufaturados é complicado e pode ser caro, pois são necessárias operações adicionais de inspeção e análise do produto para a sua posterior desmontagem. Ainda, muitas peças e componentes podem estar danificados, fazendo com que a remanufatura não seja economicamente viável.
- É necessário ter uma rede de logística reversa para o recolhimento dos produtos usados, uma vez que o ganho com o processo de remanufatura deve ser maior do que os custos logísticos de coleta dos produtos retornáveis para justificar a sua implementação.

Para lidar com esses desafios, alguns autores têm investigado problemas de remanufatura em diversos contextos e sob diferentes óticas. O Galbreth e Blackburn [2006] estudaram um problema monoperíodo de remanufatura em que os produtos usados apresentam condições

variáveis. O modelo proposto auxilia nas decisões de quantos itens adquirir para remanufaturar e quão seletivo é preciso ser no processo de inspeção dos itens, considerando que quanto mais itens forem adquiridos, maior é o sortimento de peças e mais seletivo os decisores podem ser na seleção dos itens para remanufaturar. A extensão desse problema para o caso multiperíodo é desenvolvida em Lu [2009], em que o autor considera adicionalmente uma função objetivo linear por partes para capturar o fato de que o custo de remanufatura aumenta a medida em que a qualidade dos produtos decresce.

O Teunter et al. [2006] considera duas versões do problema de dimensionamento de lotes com opção de remanufatura, assumindo que não há restrições de capacidade nem de produtos retornáveis, e que os custos de preparação são relevantes. Na primeira versão, supõe-se que há um custo conjunto de *setup* para os processos de manufatura e remanufatura. Tal suposição é especialmente apropriada quando os dois processos competem pelos mesmos recursos, e.g., a mesma linha de produção é usada para a manufatura e remanufatura. Para este problema, os autores mostram algumas propriedades e desenvolvem uma generalização do algoritmo de Wagner-Whitin [Wagner e Whitin, 1958] para obter soluções exatas. Na segunda versão, assume-se que os custos de *setup* são independentes, de modo a refletir sistemas de produção em que existem linhas dedicadas para cada um dos processos. Para resolver essa versão, são desenvolvidas heurísticas baseadas no problema clássico de dimensionamento de lotes.

Em Pan et al. [2009], foi estudado um problema de dimensionamento de lotes com opção de manufatura, remanufatura e descarte de produtos retornáveis, motivado por uma fundição chinesa que produz aço a partir de minérios e também recolhe sucata de aço para utilizar no seu processo produtivo. A sucata é utilizada na remanufatura ou é descartada. Os processos de manufatura e remanufatura utilizam os recursos da fábrica e são limitados, porém não são considerados tempos de preparação. A demanda é atendida pelos produtos derivados da remanufatura e manufatura. O trabalho apresenta uma série de propriedades úteis no desenvolvimento de políticas ótimas, considerando uma função objetivo com custos côncavos, e ainda estuda algumas simplificações do problema básico proposto. Revisões sobre aspectos gerais envolvendo remanufatura podem ser encontradas em Ilgin e Gupta [2010] e Lage Junior e Godinho Filho [2012].

O Li et al. [2006] consideram outro PDL dinâmico sem restrição de capacidade com opção de remanufatura e substituição de produtos. Os autores consideram custos de preparação diferentes para a diferenciar os processos de manufatura e remanufatura, mas os tempos de preparação são desprezados. Para resolver problemas com grandes quantidade de produtos retornados, é proposto um algoritmo baseado em programação dinâmica. O problema considerado pelos autores ocorre em meios produtivos que produzem produtos com alto valor agregado, como computadores, componentes eletrônicos, copiadoras, motores de veículos ou equipamentos médicos, onde a remanufatura de produtos devolvidos é uma prática comum. Em artigo subsequente, Li et al. [2007] investigaram uma extensão do modelo matemático anterior, em que os processos de manufatura e remanufatura são executados em duas linhas de produção independentes e com capacidades limitadas. Os lotes de produção de itens manufaturados e remanufaturados são considerados inteiros, ou seja, adota-se a produção por bateladas. Porém, os autores consideram apenas dois itens retornáveis e ainda não contabilizam os tempos de preparação das linhas, ou seja, os tempos de preparação são nulos. Além disso, existe a possibilidade de terceirização de produtos, caso não seja possível atender a demanda com a produção e remanufatura. Inicialmente, os autores desenvolvem um algoritmo genético para determinar os períodos que requerem a preparação das linhas para a manufatura e/ou remanufatura. Posteriormente, é proposto um algoritmo baseado em programação dinâmica para obter uma solução ótima em relação a quantos produtos novos devem ser manufaturados ou remanufaturados em cada período,

com o objetivo de minimizar os custos associados a manufatura, remanufatura, terceirização, estocagem e preparação.

Neste trabalho, propõe-se uma extensão dos modelos matemáticos propostos em Li et al. [2006] e Li et al. [2007], em que múltiplos produtos são considerados na manufatura/remanufatura e substituição de itens, e ambos os processos apresentam restrições de capacidade com custos e tempos de preparação não desprezíveis. Além disso, considerou-se que as linhas de produção são compartilhadas para ambas as atividades produtivas. O problema envolve operações que tornam os produtos remanufaturados utilizáveis e comercializáveis como sendo novos. Além disso, permite-se que os produtos (itens) com melhor desempenho sejam utilizados para atender a demanda dos itens com o desempenho inferior. A estrutura de substituição permitida no problema considera a substituição em uma via apenas, ou seja, um item i pode ser substituído por um produto j , mas não ao contrário. Este tipo de substituição ocorre em indústrias de semicondutores que produzem os circuitos integrados com diferentes características de desempenho. Nesse caso, apenas os circuitos com maior desempenho (como ser mais veloz) poderiam substituir os circuitos com menor desempenho [Li et al., 2006]. Várias estruturas de substituição podem ser encontradas em Lang e Domschke [2010], que discutem formulações eficientes para o problema de planejamento da produção com substituição de produtos. Para analisar o comportamento do modelo proposto, foram realizados experimentos computacionais com dados de entrada baseados nos trabalhos de Trigeiro et al. [1989] e Li et al. [2007]. Vários cenários considerando variação na taxa de retorno dos itens retornáveis foram considerados, bem como cenários com taxas diferentes de substituição.

O restante do artigo está definido da seguinte maneira. A Seção 2 define o problema de dimensionamento de lotes com opção de remanufatura e substituição de itens. A Seção 3 ilustra os testes computacionais preliminares. A Seção 4 apresenta as considerações finais e as perspectivas de trabalhos.

2 Definição do Problema e Formulação Matemática

O modelo matemático proposto é uma combinação das formulações apresentadas nos trabalhos de Li et al. [2006] e Li et al. [2007]. Considere o terno (N, K, T) , que representa o número de produtos, de recursos e de períodos, respectivamente. Os recursos (K) são utilizados tanto para os processos de manufatura quanto de remanufatura. Os produtos manufaturados e remanufaturados podem ser utilizados para o atendimento da demanda, sem distinção em termos de funcionalidade e qualidade. No sistema produtivo, existem produtos de maior qualidade que podem ser utilizados para o atendimento da demanda de produtos com menor qualidade ou desempenho. No entanto, esta substituição é de somente uma via, i.e., se i substitui j , então j não pode substituir nenhum item. Na formulação matemática, assume-se que a cada período do horizonte de planejamento, a quantidade de produtos retornáveis é conhecida e os mesmos podem ser remanufaturados no mesmo período em que chegam ao sistema. A demanda deve ser entregue sem atraso, ou seja, não é permitido o *backlogging*. Para a definição do modelo matemático, considere os seguintes dados de entrada e variáveis de decisão:

Dados de Entrada

c_{it}	Custo unitário de manufatura de um item i no período t
s_{it}	Custo de preparação (setup) para manufaturar o item i no período t
ts_{it}	Tempo de preparação (setup) para manufaturar o item i no período t
rc_{it}	Custo unitário de remanufatura do item i no período t
rs_{it}	Custo de preparação para remanufatura do item i no período t
tr_{it}	Tempo de preparação para remanufatura do item i no período t
h_{it}	Custo unitário de estoque do item i disponível para consumo no final do período t
rh_{it}	Custo unitário de estoque do item retornável i no período t
cs_{ijt}	Custo unitário por utilizar o item i para substituir uma unidade do item j no período t
d_{it}	Quantidade de item i que retorna ao sistema no período t
D_{it}	Demanda do item i no período t
S_{ij}	= 1, se o item i pode substituir o item j ; 0, caso contrário
e_{ik}	Quantidade do recurso k requerido para manufaturar o item i
f_{ik}	Quantidade do recurso k requerido para remanufaturar o item i
MC_{kt}	Quantidade do recurso k disponível no período t para a atividade de manufatura
RC_{kt}	Quantidade do recurso k disponível no período t para a atividade de remanufatura
MC, MR	Números suficientemente grandes
<i>Variáveis de Decisão</i>	
z_{it}	Quantidade de item i manufaturado no período t
I_{it}	Quantidade em estoque do item i no final do período t
x_{it}	Quantidade do item i remanufaturado no período t
y_{it}	Quantidade do item retornável i em estoque no final do período t
w_{ijt}	Quantidade do item i usado para atender a demanda do item j no período t (w_{iit} é a quantidade do item i usado para atender a sua própria demanda no período t)
δ_{it}	= 1, se o item i é manufaturado no período t ; 0, caso contrário
η_{it}	= 1, se o item i é remanufatura no período t ; 0, caso contrário

O modelo matemático inteiro-misto pode ser escrito da seguinte maneira:

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (s_{it} \cdot \delta_{it} + c_{it} \cdot z_{it} + rs_{it} \cdot \eta_{it} + rc_{it} \cdot x_{it} + h_{it} \cdot I_{it} + hr_{it} \cdot y_{it}) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^T cs_{ijt} \cdot w_{ijt} \quad (1)$$

$$y_{it} = y_{i(t-1)} - x_{it} + d_{it} \quad \forall i, t \quad (2)$$

$$I_{it} = I_{i(t-1)} + x_{it} + z_{it} - \sum_{j=1}^N S_{ij} \cdot w_{ijt} \quad \forall t, i \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^N S_{ij} \cdot w_{ijt} = D_{jt} \quad \forall t, i \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N (e_{ik} \cdot z_{it} + tc_{it} \cdot \delta_{it} + f_{ik} \cdot x_{it} + ts_{it} \cdot \eta_{it}) \leq MC_{kt} \quad \forall k, t \quad (5)$$

$$z_{it} \leq MC \cdot \delta_{it} \quad \forall i, t \quad (6)$$

$$x_{it} \leq MR \cdot \eta_{it} \quad \forall i, t \quad (7)$$

$$x_{it}, y_{it}, I_{it}, z_{it}, u_{it} \geq 0; \delta_{it}, \eta_{it} \in \{0, 1\} \quad \forall i, t \quad (8)$$

A função objetivo (1) visa a minimização do custo total formado por custo de preparação para manufatura e remanufatura, custos das produções, custos de estoque dos bens prontos para o uso e do produto retornável e custos de substituição. As restrições (2) contabilizam os estoques dos produtos retornáveis. As restrições (3) controlam os estoques dos produtos prontos para utilização, (4) determina a quantidade de itens produzidos para atender a demanda do item j bem como a produção necessária do item i que vai ser utilizado para substituir este item. As restrições (5) – (7) são restrições associadas a capacidade de manufatura e remanufatura. Os estoques iniciais dos itens são considerados nulos ($y_{i0} = I_{i0} = 0, \forall i$). As restrições 8 são restrições sobre o domínio das variáveis.

3 Experimentos Computacionais

3.1 Geração dos dados

Para testar o desempenho do modelo proposto, foram utilizadas as instâncias G30, G53, G57, G62, G69 e G72 descritas por Trigeiro et al. [1989]. A instância G30, com 6 produtos e 15 períodos, tem os tempos de produção fracionários. As capacidades de produção foram consideradas de acordo com as instâncias selecionadas, as quais são consideradas difíceis na literatura. Nos testes realizados não foi avaliado o comportamento do modelo perante a variação da capacidade produtiva. Os dados adicionais, como custos e tempos de remanufatura, foram gerados de acordo com o trabalho de Li et al. [2007], i.e.: $f_{ik} = 2e_{ik}$, $hr_{it} = 0.9h_{it}$, $tr_{it} = 0.9ts_{it}$, $rs_{it} \sim U[0.5s_{it}; 0.7s_{it}]$, $d_{it} \sim U[tx_{\min}D_{it}, tx_{\max}D_{it}]$, em que $\sim U[\cdot]$ indica que o parâmetro é uniformemente distribuído. Para determinar como a substituição ocorre, os itens foram divididos em dois grupos. O primeiro grupo é composto por 50% dos itens com melhor desempenho e contém alguns itens que podem substituir os outros. O segundo grupo é composto pelos itens restantes e contém alguns itens que podem ser substituídos pelos outros. Uma parcela dos elementos do segundo grupo foram selecionados aleatoriamente para serem substituíveis por algum elemento do primeiro grupo.

O custo de substituição foi $cs_{ijt} \sim U[0, 1]$. O custo de manufatura do primeiro e do segundo grupo foi gerado uniformemente entre $[3, 5]$ e $[2, 3]$, respectivamente, independente se ocorre a substituição ou não. Os custos correspondentes de remanufatura foram gerados uniformemente entre $[2, 3]$ e $[1, 2]$, para o primeiro e segundo grupo, respectivamente. Para garantir que os custos dos itens que podem substituir os demais são maiores ou iguais aos itens que os mesmos substituem, foi proposto o seguinte ajuste: se o item i substitui o item j , então $c_{it} = c_{jt} + 1$, se $c_{jt} > c_{it}$. Analogamente, $rc_{it} = rc_{jt} + 1$, se $rc_{jt} > rc_{it}$.

Os testes foram realizados em um computador com o processador Intel i7, 2.8GHz, 8 GB de RAM e 500GB de HDD, sob o sistema operacional Windows 7. O modelo matemático foi codificado no *software* ILOG CPLEX 12.1, usando a biblioteca ILOG Concert. As instâncias foram executadas durante um tempo máximo de 30 minutos.

3.2 Análise dos Resultados

Análise do Modelo sem a Possibilidade de Substituição

Inicialmente, desconsiderou-se a possibilidade de substituição de itens. Foram testadas 6 configurações para o número de itens e períodos (N, T) : (6,15), (6,30), (12,15), (12,30), (24,15) e (24,30). Para cada configuração, foram geradas 10 taxas de retorno distintas nos seguintes intervalos: $[2, 10]$, $[11, 20]$, $[21, 30]$, \dots , $[91, 100]$ (em %). Além disso, considera-se, para cada configuração, um exemplo sem itens retornáveis. No total, foram executadas 66 instâncias. Para analisar o desempenho do modelo proposto com e sem incentivo à remanufatura de itens, propôs-se resolver as instâncias de duas formas: anulando-se o custo de estoque dos itens retornáveis no primeiro caso, e mantê-lo no segundo caso. Vale ressaltar que o custo de estoque dos itens finais é igual em ambos os casos.

A Figura 1 (a) apresenta a variação do custo total *com* e *sem* incentivo à remanufatura para o exemplar (24, 15). No primeiro caso, note que o custo total decresce rapidamente à medida em que a taxa de retorno dos itens aumenta. Porém, a partir de 50% da taxa de retorno, há uma tendência na estabilização do custo total em torno de 7,6% do custo total inicial (sem itens retornáveis). Como o custo de estoque de itens retornáveis é zero na situação de incentivo à remanufatura e é menos dispendioso remanufaturar do que manufaturar, a tendência do modelo é aproveitar o máximo de itens retornáveis para atender a demanda. Porém, como o processo de remanufatura consome mais capacidade, não é possível atender

toda a demanda apenas pela remanufatura, o que implica num limite máximo de itens que compensam ser remanufaturados, independentemente da taxa de retorno. Por outro lado, a falta de incentivo à remanufatura ocasiona o aumento do custo total proporcional à quantidade de itens retornáveis, devido à presença do termo $\sum_{i,t} hr_{it} \cdot y_{it}$ na função objetivo. Observe na Figura 1 (b) que, para esse exemplar, cerca de 17% (83%) da demanda é atendida pela remanufatura (manufatura) de itens na situação de incentivo, e 16% (84%) na situação sem incentivo. Tal comportamento sugere que o custo de estoque de itens retornáveis não é um fator crítico que limita o atendimento da demanda via remanufatura. Nesta classe de exemplos, o CPLEX obteve a solução ótima do problema sem taxa de retorno em 40 segundos de execução do algoritmo. Para as demais instâncias, não se obteve o certificado de otimalidade no tempo limite de 30 minutos, sendo o *gap*¹ médio 0.34%.

As Tabelas 1 e 2 confirmam que os resultados das outras classes de exemplos são similares. Nos casos com e sem incentivo à remanufatura, em média 14% ($\pm 0,02\%$) da demanda é atendida pela manufatura, sendo o restante atendido pela manufatura convencional. Por exemplo, considere as instâncias com $N = 12$ e $T = 30$, neste caso, o *gap* médio foi de 1,17%, o atendimento médio da demanda por itens manufaturados foi de 86%, e a taxa de atendimento da demanda por itens remanufaturados estabilizou-se com a taxa de retorno no intervalo $[91 - 100]\%$ da demanda. Neste exemplar, o *gap* é de 1,38%. No primeiro caso, a remanufatura dos itens é claramente vantajosa porque é possível reduzir o custo total. No segundo caso, embora o custo total aumente devido à estocagem de produtos retornáveis, ainda sim é vantajoso remanufaturar, uma vez que a manufatura é mais dispendiosa do que a remanufatura. Os resultados também indicam que a porcentagem de demanda atendida pela remanufatura estabiliza-se em taxas de retorno menores na situação sem incentivo. Em todos os casos, a porcentagem de atendimento da demanda pela remanufatura é relativamente baixa devido a restrições de capacidade, conforme já mencionado. Para algumas instâncias, não se obteve o certificado de otimalidade no tempo limite de 30 minutos. Para todos os exemplos com taxa de retorno nula, as soluções ótimas são obtidas em menos de 40 segundos.

Tabela 1: Resultados das instâncias com incentivo à remanufatura e sem taxa de substituição

Itens	Períodos	Gap (%)	%Manufatura	%Remanufatura	Tempo (s)	Taxa Estabilização
6	15	0,25	84	16	1042	[81-90]
6	30	1,49	87	13	1701	[71-80]
12	15	0,93	90	10	1494	[91-100] ^a
12	30	1,17	86	14	1648	[91-100] ^b
24	15	0,34	87	13	1489	[81-90]
24	30	0,53	85	15	1652	[91-100]

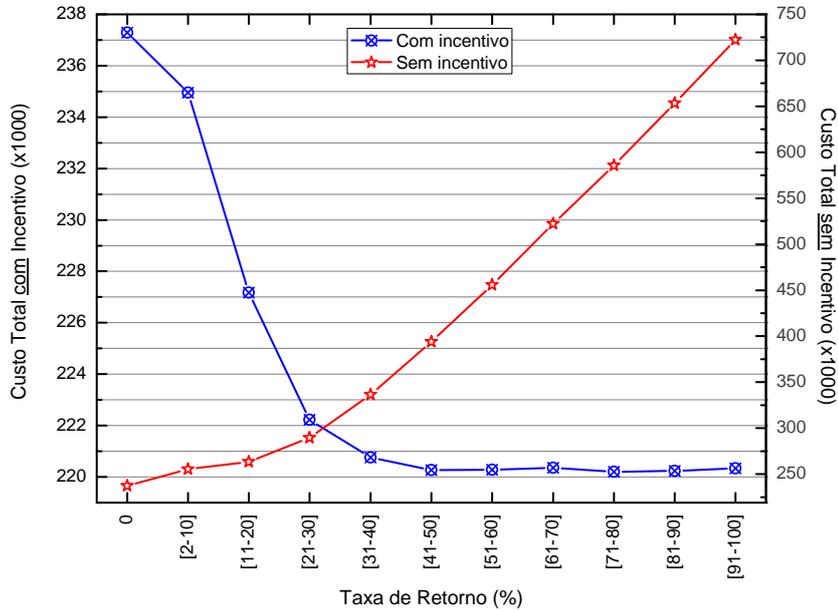
^a *gap* 1,37%.

^b *gap* 1,38%.

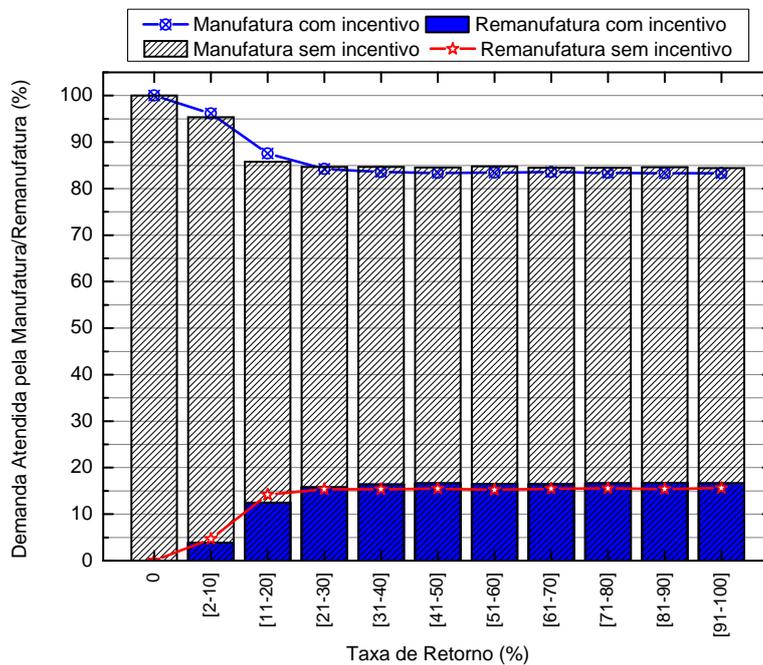
Análise dos Exemplos Considerando Várias Taxas de Retorno e Substituição

Para analisar o impacto da substituição nas instâncias anteriores, considerou-se que para as configurações (6,15) e (6,30) apenas um item pode ser substituído, e para as configurações (12,15), (12,30), (24,15) e (24,30), dois itens podem ser substituídos. Analogamente aos testes anteriores, os casos com e sem incentivo à remanufatura foram investigados. A Figura 2 apresenta a variação do custo total *com* e *sem* incentivo à remanufatura para o exemplar

¹*gap* determinado em relação ao limitante inferior fornecido pelo CPLEX.



(a)



(b)

Figura 1: a) Variação do custo total contra a taxa de retorno de itens. b) Demanda atendida pela manufatura e remanufatura (%) para várias taxas de retorno de itens. Exemplar ilustrativo refere-se a $N = 24$ e $T = 15$ sem a possibilidade de substituição de itens.

Tabela 2: Resultados das instâncias sem incentivo à remanufatura e sem taxa de substituição

Itens	Períodos	Gap	%Manufatura	%Remanufatura	Tempo(s)	Taxa Estabilização (%Remanufatura)
6	15	0,90	83%	17%	1147	[91-100]
6	30	3,11	85%	15%	1778	[91-100]
12	15	0,50	90%	10%	1640	[61-70]
12	30	2,41	85%	15%	1645	[31-40]
24	15	0,64	87%	13%	1644	[21-30]
24	30	1,88	84%	16%	1653	[31-40]

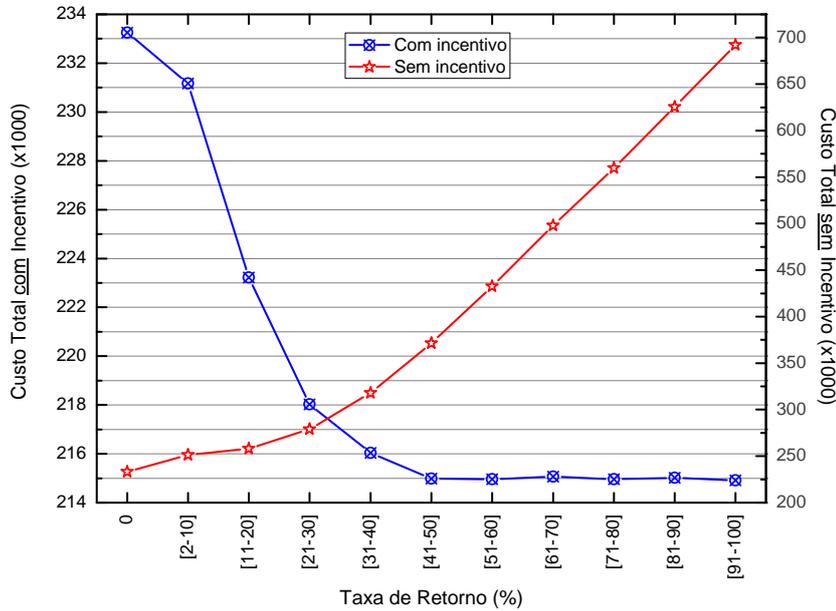
(24, 15) e possibilidade de substituição. Como os custos de substituição são mais baixos, observou-se uma pequena diminuição nos custos totais com e sem incentivo à remanufatura, em comparação aos custos sem possibilidade de substituição, conforme ilustra a Figura 2 (a). A Figura 2 (b) sugere que o percentual da demanda atendido pela manufatura e remanufatura são semelhantes à situação sem possibilidade de substituição. As Tabelas 3 e 4 mostram os resultados médios para todas as classes com possibilidade de substituição, com e sem incentivo à remanufatura, respectivamente. Os resultados indicam que o *solver* teve mais dificuldade na obtenção de soluções de boa qualidade nas instâncias com a possibilidade de substituição, mas sem incentivo à remanufatura. Note, por exemplo, que os *gaps* e os tempos médios de execução do algoritmo são superiores quando se permite substituição de itens. Porém, para todas as instâncias com taxa de retorno nula, as soluções ótimas são obtidas em menos de 100 segundos.

Tabela 3: Resultados das instâncias com incentivo à remanufatura e com taxa de substituição

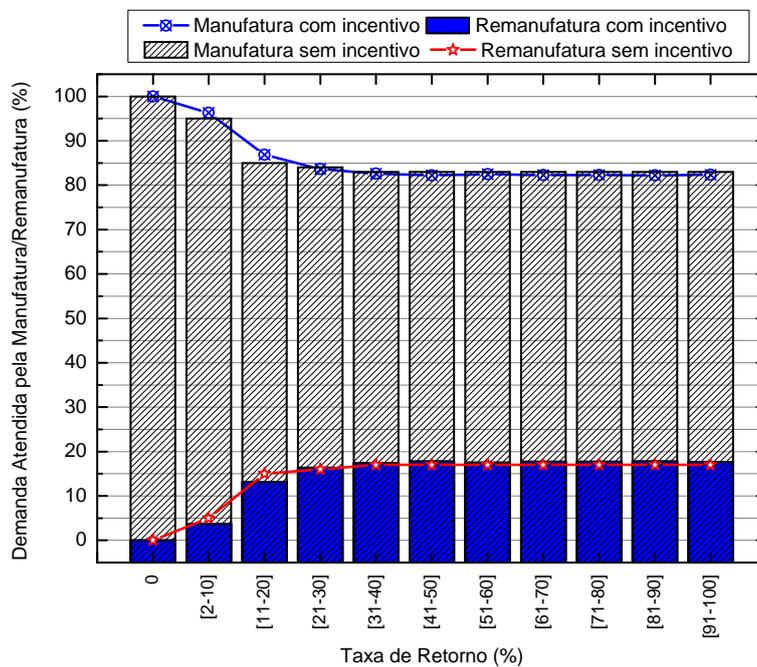
Itens	Períodos	Gap	%Manufatura	%Remanufatura	Tempo(s)	Taxa Estabilização (%Remanufatura)
6	15	0,02	86%	14%	426	[91-100]
6	30	1,45	85%	15%	1640	[51-60]
12	15	0,36	88%	12%	1478	[21-30]
12	30	1,03	85%	15%	1647	[31-40]
24	15	0,25	86%	14%	1503	[31-40]
24	30	0,60	84%	16%	1660	[31-40]

Tabela 4: Resultados das instâncias sem incentivo à remanufatura e com taxa de substituição

Itens	Períodos	Gap	%Manufatura	%Remanufatura	Tempo(s)	Taxa Estabilização (%Remanufatura)
6	15	1,33	83%	17%	1179	[71-80]
6	30	3,26	83%	17%	1641	[21-30]
12	15	0,79	88%	12%	1640	[31-40]
12	30	2,51	84%	16%	1641	[41-50]
24	15	0,83	86%	14%	1642	[31-40]
24	30	1,74	84%	16%	1647	[41-50]



(a)



(b)

Figura 2: a) Variação do custo total contra a taxa de retorno de itens. b) Demanda atendida pela manufatura e remanufatura (%) para várias taxas de retorno de itens. Exemplos ilustrativos referem-se a $N = 24$ e $T = 15$ com a possibilidade de substituição de itens.

4 Considerações Finais e Trabalhos Futuros

Neste trabalho, considerou-se um problema de dimensionamento de lotes no qual a demanda pode ser atendida por itens manufaturados e/ou remanufaturados e ainda há possibilidade de substituição de itens. Para tratar o problema, propôs-se a extensão de um modelo da literatura em que múltiplos produtos são considerados na manufatura/remanufatura e substituição de itens, e ambos os processos apresentam restrições de capacidade com custos e tempos de preparação não desprezíveis. Além disso, considerou-se que as linhas de produção são compartilhadas para ambas as atividades produtivas. Experimentos computacionais preliminares indicaram que o custo total pode ser reduzido se houver algum tipo de incentivo à remanufatura, como desconsiderar o custo de estoque dos produtos retornáveis, por exemplo. Além disso, existe uma tendência na estabilização da demanda atendida pela manufatura e remanufatura, sugerindo que mesmo altas taxas de retorno de itens podem não influenciar na decisão de remanufaturar mais itens. Além disso, análises iniciais considerando substituições simples sugeriram que os problemas podem ser complexos dependendo da estrutura de substituição e/ou dos custos. Entretanto, é necessário executar uma experimentação computacional mais exaustiva para confirmar tais hipóteses iniciais, gerando instâncias com estruturas de custos diferentes, por exemplo. Pesquisas futuras incluem testes computacionais adicionais para avaliar o desempenho do modelo perante a variação da capacidade produtiva e a influência da estrutura dos custos nas soluções obtidas. Outra possibilidade de trabalhos futuros inclui o desenvolvimento de métodos exatos e heurísticos para resolver instâncias práticas do modelo proposto.

Agradecimentos. Este trabalho teve o apoio do CNPq e da FAPESP.

Referências

- Barquet, A. e Forcellini, F.** (2009). Aspectos críticos na consolidação do sistema de remanufatura. *Revista Produção Online*, 9(4).
- Brahimi, N., Dauzere-Peres, S., Najid, N. M. e Nordli, A.** (2006). Single item lot sizing problems. *European Journal of Operational Research*, 168(1), 1–16.
- Galbreth, M. R. e Blackburn, J. D.** (2006). Optimal acquisition and sorting policies for remanufacturing. *Production and Operations Management*, 15(3), 384–392.
- Guide, V. D. R. e Wassenhove, L. N. V.** (2002). The reverse supply chain. *Harvard Business Review*, 80(2), 25–26.
- Ilgin, M. A. e Gupta, S. M.** (2010). Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ecmpo): A review of the state of the art. *Journal of Environmental Management*, 91(3), 563 – 591.
- Jans, R. e Degraeve, Z.** (2008). Modeling industrial lot sizing problems: A review. *International Journal of Production Research*, 46(6), 1619–1643.
- Karimi, B., Ghomi, S. F. e Wilson, J.** (2003). The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms. *Omega*, 31(14), 365–378.
- Lage Junior, M. e Godinho Filho, M.** (2012). Production planning and control for remanufacturing: literature review and analysis. *Production Planning e Control*, 0(0), 1–17.

- Lang, J. e Domschke, W.** (2010). Efficient reformulations for dynamic lot-sizing problems with product substitution. *OR Spectrum*, 32, 263–291.
- Li, Y., Chen, J. e Cai, X.** (2006). Uncapacitated production planning with multiple product types, returned product remanufacturing, and demand substitution. *OR Spectrum*, 28, 101–125.
- Li, Y., Chen, J. e Cai, X.** (2007). Heuristic genetic algorithm for capacitated production planning problems with batch processing and remanufacturing. *International Journal of Production Economics*, 105(2), 301–317.
- Lu, Y.** (2009). Optimal acquisition and sorting policies for remanufacturing over single and multiple periods. Master's thesis, University of Massachusetts Amherst.
- Pan, Z., Tang, J. e Liu, O.** (2009). Capacitated dynamic lot sizing problems in closed-loop supply chain. *European Journal of Operational Research*, 198(3), 810–821.
- Teunter, R. H., Bayindir, Z. P. e Den Heuvel, W. V.** (2006). Dynamic lot sizing with product returns and remanufacturing. *International Journal of Production Research*, 44(20), 4377–4400.
- Trigeiro, W. W., Thomas, L. J. e McClain, J. O.** (1989). Capacitated lot sizing with setup times. *Management Science*, 35(3), 353–366.
- Wagner, H. M. e Whitin, T. M.** (1958). Dynamic version of the economic lot size model. *Management Science*, 5(1), 89–96.