

ESTUDO DO IMPACTO DAS TAXAS DE RECUPERAÇÃO DE PRODUTOS EM UMA CADEIA DE SUPRIMENTOS DIRETA E REVERSA

Mateus Santana da Silva

Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF) – Campos dos Goytacazes/RJ
mateus.santanasilva@hotmail.com

Timóteo Santana da Silva

Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF) – Campos dos Goytacazes/RJ
timoteo.santana@hotmail.com

Fermín Alfredo Tang Montané

Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF) – Campos dos Goytacazes/RJ
tang@uenf.br

Gudelia Morales

Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF) – Campos dos Goytacazes/RJ
gudelia@uenf.br

Resumo: No Brasil, com a promulgação da Lei Federal 12305 – Política Nacional de Resíduos Sólidos –, as empresas de manufatura serão conduzidas a providenciar a recuperação dos seus produtos e embalagens, após o descarte pelos clientes. A questão é que, para efetivar esta recuperação, necessitará que sua cadeia de suprimentos programe e operacionalize o resgate e o encaminhamento dos produtos descartados pelos clientes. Neste artigo será apresentado um modelo de programação linear inteira que representa uma cadeia de produção com a opção industrial chamada de remanufatura, uma atividade que utiliza os produtos usados e coletados. O modelo é resolvido para diferentes cenários, considerando taxas de retorno de produtos usados crescentes, além da escolha no número de centros de distribuição, centros de coleta e centros de desmontagem, instalações que devem respeitar posições geográficas estimadas pelas distâncias entre elas. Os resultados mostram uma diminuição nos custos quando são consideradas quantidades ótimas de produtos novos e remanufaturados, além de decidir pelo número e localização ótima das facilidades. À luz desses valores pode-se afirmar que a atividade de remanufatura se mostra rentável.

Palavras-chaves: Cadeia de Suprimento, logística reversa, programação linear inteira.

Abstract: In Brazil, with the promulgation of Federal Law 12 305 - National Policy on Solid Waste - manufacturing companies will be conducted to provide for the recovery of their products and packaging, after dropping by customers. The point is that to effect this recovery will need its supply chain schedule and operationalize the rescue and transport of waste products by customers. This article will show a linear programming model that represents an production chain with the industry option called remanufacturing, an activity that uses the products used and collected. The model is solved for different scenarios, considering rates of return used products growing, besides choosing the number of distribution centers, collection centers and centers for the disassembly, installations must comply with geographical positions estimated by the distances between them. The results show a decrease in costs when are considered optimal amounts of new and remanufactured products, and decide the optimal number and location of facilities. In light of these values can be stated that the remanufacturing activity shows itself profitable.

Key-words: Supply Chain, reverse logistics, integer linear programming.

1. Introdução

O crescimento da população mundial determina o aumento do consumo em um planeta de recursos finito e, com ele, o aumento do descarte de materiais. Esta realidade, incentivada pelas mudanças tecnológicas concebidas para uma rápida obsolescência, traz como resultado a geração de grande quantidade de lixo, principalmente nas localidades urbanas no mundo.

No Brasil, com a promulgação da Lei Federal 12305 – Política Nacional de Resíduos Sólidos –, em agosto de 2010, muitas empresas de manufatura de equipamentos originais, de montagem de produtos novos e aquelas que somente comercializam produtos novos, serão conduzidas a providenciar a recuperação dos produtos colocados no mercado após o desinteresse do cliente na utilização, isto é, ao final de vida útil de um produto, como, por exemplo: autopeças, computadores, celulares, etc. Essa situação levará o país a práticas concretas de prevenção com os materiais descartados, contribuindo com a qualidade de vida e proteção do meio ambiente, como já é obrigação por lei em países europeus.

Efetivar esta recuperação necessitará de uma cadeia de suprimentos que resgate e encaminhe os produtos descartados (ou produtos usados) pelos clientes. Esta cadeia de suprimentos é chamada de reversa, pelo fato de começar do cliente para logo encaminhar o produto usado na direção do reuso, da desmontagem, incluindo o encaminhamento dos componentes úteis (que podem ser incorporados na mesma ou em outras cadeias produtivas) e/ou o descarte correto. Quando acontece da cadeia de um produto usado levá-lo de volta a seu próprio procedimento produtivo, esse processo recebe o nome de cadeia de suprimentos de ciclo fechado.

Neste artigo, será apresentado um modelo de programação linear inteira que incorpora a opção industrial da cadeia de suprimentos reversa, chamada remanufatura. Um produto é considerado remanufaturado quando ele é obtido após um processo que consiste nas seguintes etapas: desmontagem do item usado, limpeza de seus módulos, reparação ou substituição de peças danificadas, gastas ou desatualizadas (*updating* no caso de eletro-eletrônico), além de testes de qualidade e a montagem de um novo item que deverá apresentar perfeita condição de funcionamento, igual ao de um produto genuíno. Em geral, um produto pode ser denominado remanufaturado se seus componentes provêm de itens usados – após verificação de excelente funcionamento (Majumder e Groenevelt, 2001).

Pode-se encontrar remanufatura na indústria dos computadores pessoais, nas empresas de partes de automóveis, das máquinas copiadoras, dos equipamentos médicos, dos pneus, etc.

Na Figura 1 mostra-se uma cadeia de suprimentos abrangente que apresenta as atividades direta e reversa de produtos manufaturados incluindo a coleta, a desmontagem e a possibilidade de reuso da unidade ou das partes, via canibalização, o que as devolve à cadeia de produção do produto original. Adiciona-se o processamento mecânico ou químico para encaminhar essas partes à outras cadeias produtivas e/ou à disposição final – do que não tem serventia – sem agredir o meio ambiente. Considera-se uma cadeia abrangente porque é incorporado ao processo de manufatura de produtos a etapa referente à extração dos insumos, tendência atual das empresas sustentáveis e com responsabilidade social.

Até 1997 foram reportados modelos modificados de localização de facilidades adaptados para o planejamento da rede de distribuição reversa. Porém, no artigo de Fleischmann *et al.* (1997) assinala-se que existiam poucas pesquisas integrando a logística direta – do processo de produção – e a reversa. Fleischmann (2001) propôs um modelo de programação linear inteira mista de localização de facilidades que integrou a rede das cadeias direta e reversa, onde as restrições cumpriam com o balanço entre demanda e oferta de materiais. No artigo de Demirel e Gokçen (2007) foi formulado um modelo de programação linear inteiro que integra as cadeias direta e reversa com objetivo de minimizar custos de instalação de centros de coleta e tratamento dos produtos usados coletados. Nesse modelo

genérico, o aproveitamento de material se destinou a remanufatura, pesquisa que serviu como fonte principal do presente artigo.

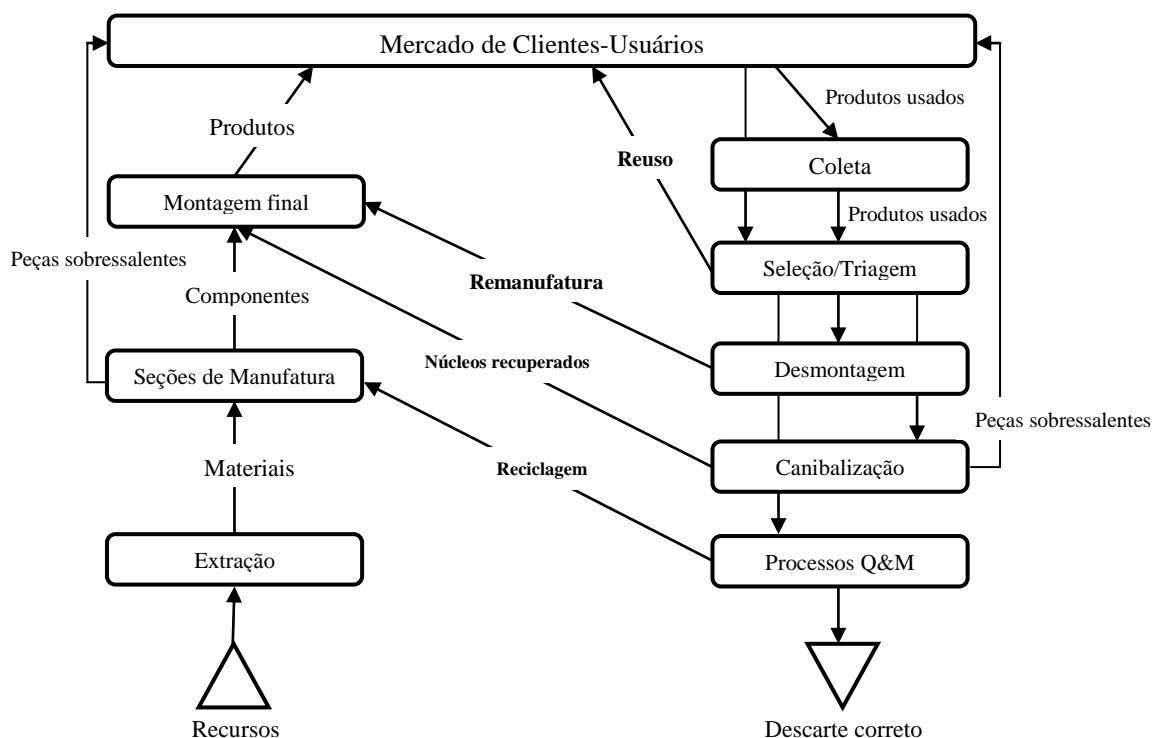


Figura 1. Cadeia de produção integrada ao descarte de produtos manufaturados pelos clientes (modificado de White *et al.* (2003) *apud* Lebreton (2007)).

2. Metodologia

Neste artigo a formulação do modelo considera como premissa uma cadeia de produção menos complexa, mostrada na Figura 2. A cadeia consiste na produção de dois diferentes tipos de produtos, que utilizam três componentes cada um deles. As variáveis de decisão estão representadas pela quantidade de cada produto a ser produzida para satisfazer demandas conhecidas, a escolha do número de centros de distribuição, de centros coleta e de centros de desmontagem dos produtos recuperados, a quantidade de produtos e componentes transportados entre essas facilidades, e a quantidade de componentes comprados de fornecedores externos.

De modo a minimizar os custos totais, se incluem: custos de abertura dos centros, custos de transporte de produtos e componentes, custos de produção e custos de aquisição de componentes virgens. Nas restrições consideradas encontram-se o balanceamento do fluxo entre as facilidades e a satisfação de demanda.

O modelo de Programação Linear Inteira (PLI) é resolvido utilizando uma extensão do algoritmo *Branch-and-Bound (B&B)*. O *B&B* conhecido como método de *ramificação e limitação* consiste na divisão sucessiva do conjunto de soluções viáveis do modelo de PLI original em subconjuntos (ação de ramificação) de modo que, sem perda de soluções viáveis do modelo original se encontre uma solução ótima. A avaliação do valor ótimo da função objetivo nestes subconjuntos se considera um valor referencial (ação de limitação), de modo que sirva como estratégia a de excluir subconjuntos já analisados cujas soluções ótimas tenham valores piores que o referencial e continuar revisando outros subconjuntos de pontos viáveis segundo um processo hábil de enumeração implícita. O valor referencial obtido será considerado, um limitante inferior quando se refira a um modelo de maximização, ou um limitante superior quando se trata de um modelo de minimização. A cada iteração, o cálculo

do valor ótimo é realizado utilizando o algoritmo Simplex sobre os subconjuntos, desconsiderando a restrição de inteireza.

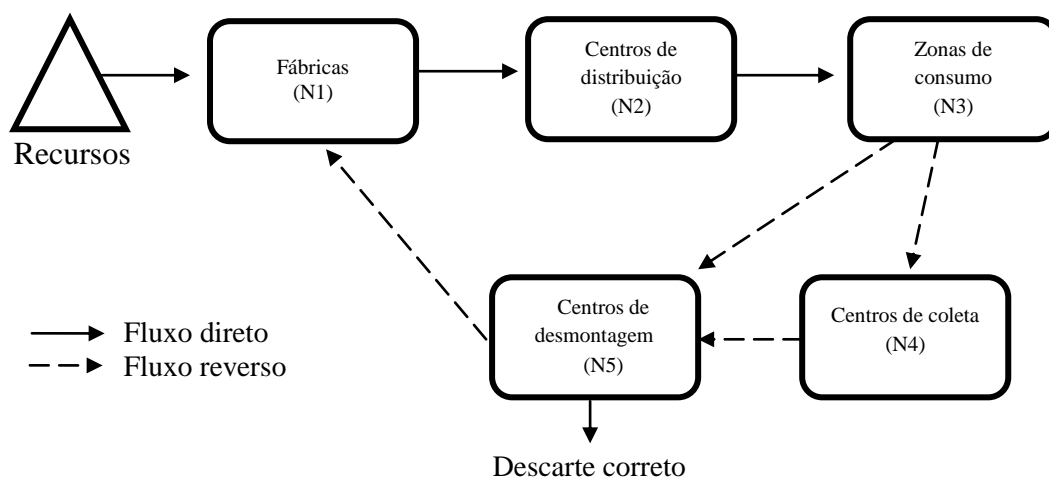


Figura 2. Cadeia de suprimentos que integra manufatura e remanufatura.

A extensão do *B&B* utilizado é o algoritmo *Branch-and-Cut (B&C)*, incluído na biblioteca de algoritmos do CPLEX®. O *B&C* tem como estratégia a inclusão de restrições viáveis, numa etapa prévia ao cálculo das soluções dos subconjuntos com o objetivo de acelerar o cálculo da solução ótima. Estas restrições viáveis adicionadas estão inspiradas no método de planos de corte, com elas se ajusta melhor o conjunto viável original, em uma interpretação geométrica se envolve o conjunto viável original por um poliedro mais próximo das variáveis inteiras. Como resultado se gerará uma diminuição de subconjuntos a ser visitados para alcançar o ótimo.

3. Descrição do modelo

De acordo com Ballou (2006), a cadeia de suprimentos é um conjunto de atividades funcionais (transportes, controle de estoques, distribuição, etc) que se repetem inúmeras vezes ao longo do canal, pelos quais matérias-primas vão sendo convertidas em produtos acabados, aos quais se agrega valor para o consumidor. No entanto, existem empresas que além de lidar com o gerenciamento do fluxo dos produtos da fábrica até o consumidor final, necessitam incluir em seus planejamentos o *canal logístico reverso*, sendo este igualmente administrado.

Existem trabalhos enfatizando várias áreas da remanufatura, por exemplo, Gupta *et al.* (2000), Lu e Bostel (2007). Entretanto, são poucos os estudos que abordam tanto o fluxo direto dos produtos quanto o reverso, a chamada cadeia de suprimentos que integra a manufatura e a remanufatura, com a intenção de medir a resposta para um aumento na coleta seletiva. Neste ambiente de planejamento de cadeias de suprimento, há de se destacar também os níveis de decisões que podem ser considerados, e estes estão inteiramente atrelados ao horizonte temporal do planejamento (Ballou, 2006). Existem as decisões a longo prazo, no nível estratégico, que geralmente incluem medidas de localização e quantidades das instalações, etc, as decisões a médio prazo, no nível tático, e a curto prazo, no nível operacional, onde são tomadas decisões a cada hora ou diariamente, podendo definir quantidades e momento de reposição, despacho de produtos, dentre outras.

O estudo de modelos de otimização aplicados a cadeias de suprimento com manufatura e remanufatura são de suma importância para dar apoio a tomada de decisões e resolver os diversos problemas que envolvem essas atividades.

Nesta seção apresenta-se um modelo de programação linear inteira, o qual considera as interações e as decisões associadas ao gerenciamento de uma cadeia logística direta e reversa. Este modelo foi apresentado no trabalho de Demirel e Gokçen (2007).

O modelo calcula valores ótimos no dimensionamento da produção e do transporte, tanto de produtos novos como de remanufaturados, bem como, pretende resolver o problema da localização das facilidades de distribuição, coleta e desmontagem que compõem a cadeia logística.

Foram considerados os custos referentes à decisão de abertura desses três tipos de facilidades, bem como o custo de produção de produtos novos, o custo de transporte tanto de produtos novos quanto de componentes – os quais são obtidos através da desmontagem dos produtos que são retornados e remanufaturados –, e o custo de compra de componentes novos. O objetivo deste modelo é minimizar a soma de todos os custos citados.

A efeito de determinar a quantidade de produtos que retornariam à cadeia logística e os que seriam remanufaturados, foram consideradas frações (ou porcentagens) da demanda total, as quais permitem dimensionar os custos referentes aos processos de coleta, desmontagem e descarte correto de produtos. As frações utilizadas são coerentes às porcentagens de recuperação conhecidas na gestão de materiais recicláveis.

De acordo com o esquema mostrado na Figura 2, os produtos fabricados são inicialmente direcionados aos centros de distribuição, e logo após, aos mercados consumidores. Cada zona de consumo tem uma demanda já conhecida e assume-se que ela dever ser satisfeita. O fluxo reverso da cadeia inicia-se com a coleta de produtos usados a partir dos consumidores, e a quantidade de produtos que serão retornados é determinada pela taxa de retorno que é uma fração da demanda. A partir do descarte pelo cliente existem dois caminhos que podem ser usados para transportar os produtos usados até os centros de desmontagem. Um dos caminhos é o encaminhamento direto desses produtos usados, do consumidor para o centro de desmontagem. O outro caminho seria o transporte dos produtos usados até os centros de coletas, que seriam uma espécie de intermediários que direcionariam esses produtos até os centros de desmontagem. Nos centros de desmontagem esses produtos seriam analisados e organizados de acordo com a sua qualidade, e assim seriam classificados como passíveis de remanufatura ou como descartáveis, sendo que isso é controlado pela taxa de reaproveitamento. Os produtos remanufaturáveis seriam então desmontados na forma de componentes e passariam por uma série de processos de limpeza, teste e inspeção que transformariam esses componentes em partes praticamente novas e prontas para serem usadas no processo produtivo de produtos acabados. A partir dos centros de desmontagem esses componentes “novos” seriam transportados até as fábricas, reiniciando assim o ciclo.

Em relação ao suprimento de componentes necessários para a produção, é admitido que uma parte seria obtida através da compra de componentes novos dos fornecedores, e a outra parte seria obtida através da desmontagem dos produtos usados em boa condição de remanufatura.

Uma reformulação do modelo apresentado por Demirel e Gokçen (2007) é proposta no presente artigo, visando uma representação mais clara e organizada do mesmo. Para isso, as representações das variáveis de fluxo e localização foram unificadas. O modelo reformulado é apresentado a seguir.

Dados do Modelo:

N_1 : conjunto dos índices das fábricas, $N_1 = \{1, \dots, n_1\}$

N_2 : conjunto dos índices dos centros de distribuição, $N_2 = \{n_1+1, \dots, n_1+n_2\}$

N_3 : conjunto dos índices dos centros de consumo, $N_3 = \{(n_1+n_2)+1, \dots, (n_1+n_2)+n_3\}$

N_4 : conjunto com os índices dos centros de coleta, $N_4 = \{(n_1+n_2+n_3)+1, \dots, (n_1+n_2+n_3)+n_4\}$

N_5 : conjunto com os índices dos centros de desmontagem, $N_5 = \{(n_1+n_2+n_3+n_4)+1, \dots, (n_1+n_2+n_3+n_4)+n_5\}$

$N: N_1 \cup N_2 \cup N_3 \cup N_4 \cup N_5$

K : tipos de produtos a serem produzidos;

f_j : Custo de instalação da facilidade j , onde $j \in N_2 \cup N_4 \cup N_5$.

c_j^k : Custo de manufatura do produto k na fábrica j , onde $k \in K, j \in N_1$.

tp_{ij}^k : Custo de transporte unitário da facilidade i à j do produto k , onde $k \in K, i$ e $j \in N$.

tc_{ij} : Custo de transporte unitário de componentes da facilidade i à j , onde i e $j \in N$.

pc : Custo unitário de componentes.

D_j^k : Demanda do produto k na zona de consumo j , onde $j \in N_3$.

CAP_j^k : Capacidade da facilidade j referente ao produto k ; onde $k \in K$ e $j \in N_1 \cup N_2 \cup N_4 \cup N_5$.

ARM_j : Capacidade de armazenamento de partes/componentes na fábrica $j \in N_1$.

s^k : Taxa de retorno do produto k demandado nas zonas de consumo $s^k \in [0,1]$;

b^k : Taxa de aproveitamento do produto k recuperado para remanufatura $b^k \in [0,1]$;

a^k : Número de partes/componentes necessárias por unidade do produto k .

cw^k : Custo de descarte por produto k ; onde $k \in K$.

cd_j^k : Custo de desmontagem por produto k por facilidade j ; onde $k \in K$ e $j \in N_5$.

cc^k : Custo de coleta por produto k ; onde $k \in K$.

Variáveis de Decisão:

x_{ij}^k : quantidade do produto k , transportado da facilidade i à facilidade j ;

x_{ij} : quantidade de partes/componentes transportadas do centro de desmontagem i à fábrica j , onde $i \in N_5$ e $j \in N_1$.

$y_j = \begin{cases} 1, & \text{se a facilidade } j \in N_2 \cup N_4 \cup N_5 \text{ é aberta;} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$

q_j^k : número de unidades do produto k a ser produzidas na fábrica j , onde $k \in K$ e $j \in N_1$;

Q_j : número de partes/componentes compradas de fornecedor externo para a fábrica $j \in N_1$.

Modelo Matemático:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar} \quad & \sum_{j \in N_2 \cup N_4 \cup N_5} f_j y_j + \sum_{k \in K} \sum_{j \in N_1} c_j^k q_j^k + pc \sum_{j \in N_1} Q_j \\ & + \sum_{k \in K} \sum_{i \in N_1} \sum_{j \in N_2} tp_{ij}^k x_{ij}^k + \sum_{k \in K} \sum_{i \in N_2} \sum_{j \in N_3} tp_{ij}^k x_{ij}^k + \sum_{k \in K} \sum_{i \in N_3} \sum_{j \in N_4 \cup N_5} tp_{ij}^k x_{ij}^k + \sum_{k \in K} \sum_{i \in N_4} \sum_{j \in N_5} tp_{ij}^k x_{ij}^k + \sum_{i \in N_5} \sum_{j \in N_1} tc_{ij} x_{ij} \end{aligned}$$

Restrições de capacidade:

$$q_j^k \leq CAP_j^k \quad k \in K, j \in N_1 \quad (1)$$

$$Q_j + \sum_{i \in N_5} x_{ij} \leq ARM_j, \quad j \in N_1 \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N_1} x_{ij}^k \leq CAP_j^k y_j \quad k \in K, j \in N_2 \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N_3} x_{ij}^k \leq CAP_j^k y_j \quad k \in K, j \in N_4 \quad (4)$$

$$\sum_{i \in N_3 \cup N_4} x_{ij}^k \leq CAP_j^k y_j \quad k \in K, j \in N_5 \quad (5)$$

Restrições de equilíbrio de Fluxo:

$$q_j^k = \sum_{i \in N_1} x_{ij}^k \quad k \in K, j \in N_2 \quad (6)$$

$$\sum_{i \in N_2} x_{ij}^k = D_j^k, \quad k \in K, j \in N_3 \quad (7)$$

$$\sum_{i \in N_1} x_{ij}^k - \sum_{i \in N_3} x_{ji}^k = 0, \quad k \in K, j \in N_2 \quad (8)$$

$$s^k \sum_{i \in N_2} x_{ij}^k - \sum_{i \in N_4 \cup N_5} x_{ji}^k = 0, \quad k \in K, j \in N_3 \quad (9)$$

$$\sum_{i \in N_3} x_{ij}^k - \sum_{i \in N_5} x_{ji}^k = 0, \quad k \in K, j \in N_4 \quad (10)$$

$$a^k b^k \sum_{i \in N_3} x_{ij}^k + a^k b^k \sum_{i \in N_4} x_{ij}^k - \sum_{i \in N_1} x_{ji}^k = 0, \quad k \in K, j \in N_5 \quad (11)$$

$$\sum_{k \in K} a^k q_j^k = Q_j + \sum_{i \in N_5} x_{ij}^k, \quad j \in N_1 \quad (12)$$

$$x_{ij}^k, x_{ij}, q_j^k, Q_j \geq 0 \text{ e inteiras; } y_j \in \{0,1\} \quad (13)$$

A rede que representa a cadeia de suprimento mostrada na Figura 2 compreende os seguintes nós: n_1 fábricas, n_2 centros de distribuição, n_3 centros de consumo, n_4 centros de coleta e n_5 centros de desmontagem. É importante mencionar que o número de fábricas e centros de consumo é fixo, enquanto o número das outras facilidades será definido ao se resolver o modelo.

A função objetivo do modelo pretende minimizar o custo total do sistema de manufatura e remanufatura. O primeiro termo representa o custo de instalação de facilidades, o segundo representa o custo de manufatura, o terceiro custo de componentes novos. Os últimos cinco termos representam custos de transporte entre as diferentes facilidades. A restrição (1) limita a produção à capacidade das fábricas. A relação (2) estabelece a capacidade de armazenamento de componentes nas fábricas, considerando componentes novos e remanufaturados. As restrições (3), (4) e (5) impõem limites nas capacidades de distribuição coleta e desmontagem. A relação (6) define a produção dos diferentes produtos nas fábricas. A relação (7) garante que a demanda nas zonas de consumo seja atendida. As relações (8) e (10) representam equações de balanço de fluxos nos centros de distribuição e coleta, respectivamente. A relação (9) define o fluxo de produtos recuperados como uma fração dos produtos usados nas zonas de consumo. Este cálculo depende da taxa de retorno definida previamente. Vale lembrar que os produtos recuperados têm como destino os centros de coleta e desmontagem. A relação (11) define o fluxo de componentes recuperados prontos para remanufatura nas fábricas. Este fluxo é calculado considerando-se a taxa de aproveitamento dos produtos recuperados, b^k , e o número de componentes obtidos por produto, a^k . A relação (12) representa o consumo de componentes necessários para produção por fábrica considerando-se componentes remanufaturados e novos. Finalmente, na relação (13) são estabelecidas as características das variáveis do modelo.

4. Resultados computacionais

O modelo descrito é analisado através de um conjunto de problemas testes gerado de maneira aleatória. Estes problemas consideram uma cadeia de suprimento que inclui três fábricas ($n_1=3$), dois potenciais centros de distribuição ($n_2=2$), três zonas de consumo – ou mercados consumidores ($n_3=3$), dois potenciais centros de coleta ($n_4=2$) e dois potenciais centros de desmontagem ($n_5=2$).

O conjunto de parâmetros usados no modelo pretende refletir a realidade de um ambiente industrial. Os parâmetros utilizados para resolver o conjunto de problemas teste são apresentados nas Tabelas 1-4. Os custos de produção nas fábricas e os custos de desmontagem nos centros de desmontagem, para cada produto, são mostrados na Tabela 1. As informações acerca dos custos de transporte, custo de coleta, custo de descarte, taxas de retorno, taxas de aproveitamento e quantidade de componentes recuperados por produto são mostradas na Tabela 2. A Tabela 3 mostra os custos de abertura das potenciais facilidades. A Tabela 4 apresenta a capacidade de produção das fábricas e as demandas das zonas de consumo, para cada produto.

Tabela 1. Custos de produção e desmontagem

	Custos de Produção			Custos de Desmontagem (cd_j^k)	
	Fábrica 1	Fábrica 2	Fábrica 3	Centro 1	Centro 2
Produto 1	180	140	150	8	5
Produto 2	120	110	100	2	3

Tabela 2. Custos adicionais, taxas de re-manufatura e componentes por produto

	Custos adicionais			Taxas		Comp./ Produto (a^k)
	Transporte	Coleta (cc^k)	Descarte (cw^k)	Retorno (s^k)	Aproveitamento (b^k)	
Produto 1	0,02	0,5	2	0,2	0,2	3
Produto 2	0,01	1	1	0,1	0,4	3

Tabela 3. Custos de abertura das facilidades

	Custo de abertura por facilidade		
	Centro de desmontagem	Centro de distribuição	Centro de coleta
Centro 1	20000	10000	6000
Centro 2	25000	7500	8000

Tabela 4. Capacidade das fábricas e demanda dos produtos

	Capacidade de Produção			Demanda dos Produtos		
	Fábrica 1	Fábrica 2	Fábrica 3	Zona 1	Zona 2	Zona 3
Produto 1	2750	1000	1700	750	1000	1450
Produto 2	1800	2100	1500	1000	1500	1200

Os problemas teste foram construídos considerando-se cinco diferentes cenários variando-se as distâncias entre as facilidades em cada um deles. Essas distâncias foram geradas calculando-se valores aleatórios no intervalo [100 - 1000] com a finalidade de estimar os custos de transporte unitário entre as facilidades i à j por produto k , tp_{ij}^k , e para os

componentes, tc_{ij} . Em cada cenário foram considerados 4 problemas testes variando-se as taxas de retorno s^k para cada tipo de produto usado. Estas taxas de retorno variam no intervalo [0,1 - 0,5].

Os problemas teste foram resolvidos no CPLEX Studio IDE IBM 12.2 usando um processador Pentium Dual-Core 2,3GHz. O modelo encontrou o custo ótimo da cadeia de suprimento direta e reversa, sinalizando as quantidades ótimas de produtos que deverão ser transportadas entre as facilidades, bem como, a localização dos centros de distribuição, coleta e desmontagem que deverão ser abertas.

Quando o modelo é resolvido para o Cenário 2, considerando as taxas de retorno $s^1=0,2$ e $s^2=0,1$, o *custo total* encontrado foi de 1.702.374. Duas das potenciais facilidades de distribuição são abertas, enquanto somente um centro de coleta e um centro de desmontagem são abertos. A quantidade de componentes novos que são comprados para as fábricas 1, 2 e 3 são definidos como 1800, 9300 e 8772, respectivamente. Um esquema que ilustra os valores ótimos de produção nas fábricas e de produtos transportados entre as facilidades é mostrado na Figura 3. Por *custo total*, entende-se que é a soma do valor ótimo obtido no modelo proposto incluídos os custos relativos às atividades de desmontagem, descarte e coleta de produtos usados, relação (14). Entretanto, estes são custos fixos, por isso, não são apresentados como parte da função objetivo do modelo proposto deste trabalho, mas foram calculados através da expressão descrita abaixo.

Custos fixos:

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N_5} cd_j^k \left(\sum_{i \in N_3} b^k s^k D_i^k \right) + \sum_{k \in K} (1-b^k) s^k cw^k \left(\sum_{i \in N_3} D_i^k \right) + \sum_{k \in K} s^k cc^k \left(\sum_{i \in N_3} D_i^k \right) \quad (14)$$

Na Tabela 5 são apresentados os resultados encontrados a partir da resolução dos problemas teste, para cada cenário. As informações apresentadas incluem o custo total da cadeia de suprimento, o número de facilidades a serem instaladas e o tempo de execução.

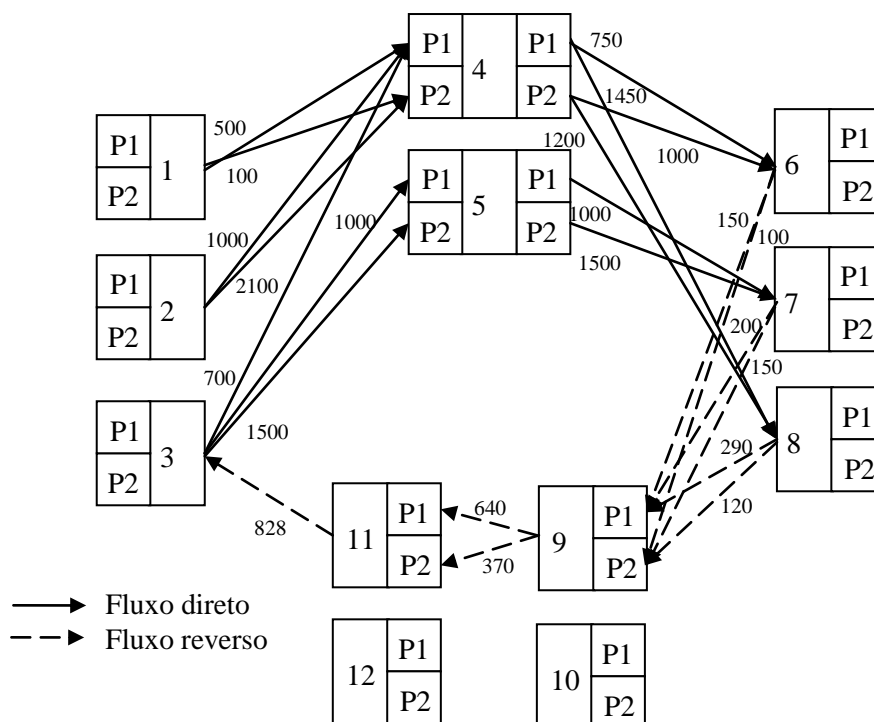


Figura 3. Solução ótima – Cenário 2 / taxa de retorno (0.2;0.1).

A partir dos resultados mostrados na Tabela 5, pode ser observado que quando as taxas de retorno aumentam, o custo total do sistema de remanufatura diminui. Por exemplo, no terceiro cenário (linhas 1 e 2), observa-se que quando as taxas de retorno de ambos os produtos aumentam para 0,3, o custo total diminui. Além disso, utiliza-se um centro de desmontagem adicional, pois quanto mais produtos são recuperados maior será a necessidade por facilidades de desmontagem.

Em todos os cenários, a tendência de redução do custo total como consequência do aumento das taxas de retorno foi verificada. Nota-se, sobretudo, que no Cenário 1, o modelo em sua solução ótima decidiu abrir somente um centro de desmontagem e nenhum centro de coleta para as taxas de retorno (0,2; 0,1). Quando estas taxas aumentam para 0,3 para os dois produtos (mostrado na Tabela 5), o modelo retorna um valor de custo total de 1.715.086, ou seja, maior que o custo total anterior. Isto possivelmente acontece porque na solução ótima o modelo decide abrir mais um centro de desmontagem pelo fato da taxa de retorno ser maior em relação ao exemplo resolvido com taxas 0,2 e 0,1, ou seja, maior quantidade de produtos retornados exigiu a abertura de mais uma facilidade de remanufatura.

Tabela 5. Resultados computacionais

	Taxas de retorno	Custo total (\$)	Facilidades abertas			Tempo (segs.)
	(s^1 ; s^2)		n_2	n_4	n_5	
Cenário 1	(0,2;0,1)	1.714.580	2	0	1	0,23
	(0,3;0,3)	1.715.086	2	0	2	0,23
	(0,4;0,4)	1.703.084	2	0	2	0,24
	(0,5;0,5)	1.691.498	2	0	2	0,21
Cenário 2	(0,2;0,1)	1.702.374	2	1	1	0,26
	(0,3;0,3)	1.702.087	2	0	2	0,21
	(0,4;0,4)	1.690.730	2	1	2	0,23
	(0,5;0,5)	1.679.187	2	1	2	0,23
Cenário 3	(0,2;0,1)	1.692.266	2	0	1	0,21
	(0,3;0,3)	1.683.997	2	0	2	0,23
	(0,4;0,4)	1.669.340	2	0	2	0,23
	(0,5;0,5)	1.656.337	2	0	2	0,23
Cenário 4	(0,2;0,1)	1.723.630	2	0	1	0,21
	(0,3;0,3)	1.714.430	2	0	2	0,23
	(0,4;0,4)	1.698.963	2	0	2	0,31
	(0,5;0,5)	1.683.902	2	0	2	0,28
Cenário 5	(0,2;0,1)	1.715.550	2	0	1	0,25
	(0,3;0,3)	1.714.960	2	0	2	0,26
	(0,4;0,4)	1.704.043	2	1	2	0,26
	(0,5;0,5)	1.692.713	2	1	2	0,20

Conclusões

O modelo considerado de programação linear inteira representa uma cadeia de suprimento que inclui os processos de produção direto e reverso, para manufatura e remanufatura. Este foi tratado como uma mistura de um problema acadêmico com parâmetros influenciados por taxas de retorno, próximas da realidade, de produtos usados. Foi resolvido e organizado em cinco cenários diferenciados pelas distâncias entre as facilidades, geradas aleatoriamente. Cada cenário foi composto por uma série de resoluções com taxas de retorno crescentes para analisar os custos totais decorrentes.

Conclui-se que à medida que as taxas de retorno dos produtos usados aumentam, os custos totais do sistema se reduzem, o que motivará o investimento em cadeias de suprimentos direta e reversa além de incentivar melhorias nos sistemas de coleta ao final da vida útil dos produtos.

Neste ambiente industrial, é bem provável que empresas que geralmente não conferem muito valor em boas práticas de logística reversa vão, durante os próximos anos, comprovar que investir no seu sistema de retorno resulta em aumento na sua rentabilidade e ganho de competitividade (Chaves e Chicarelli, 2005). Nesse intuito, novos estudos e trabalhos devem ser desenvolvidos a fim de darem suporte às decisões que futuramente passarão a focar também as cadeias logísticas reversas.

Referências

1. Arenales M., Armentano V. A., Morabito R. (2006). *Pesquisa Operacional – Para cursos de Engenharia*. Ed. Campus. 1ª Ed.
2. Ballou R. H. (2005). *Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos - Logística Empresarial*. Ed. Bookman. 5ª ed. p. 55.
3. Chaves G. L. D, Chicarelli R. L. A. (2005). *Logística reversa como atividade geradora de vantagem competitiva ao canal de distribuição de alimentos refrigerados*. XII SIMPEP – Bauru, SP, Brasil.
4. Demirel N. O, Gokçen H. (2007). *A mixed integer programming model for remanufacturing in reverse logistics environment*. Springer-Verlag London, p. 1197–1206.
5. Fleischmann M, Bloemhof-Ruwaard J.M, Dekker R, van der Laan E, van Nunen J.A.E.E, Van Wassenhove L.N. (1997). *Quantitative models for reverse logistics: A review*. European Journal of Operational Research, Vol. 103, nº 1, p. 1-17.
6. Fleischmann M. (2001). *Reverse logistics network structures and design*. ERIM Report Series Research In Management, Erasmus University Rotterdam.
7. Gupta S. M, Lee Y. J, Zanthopoulos X, Veerakamolmal P. (2000). *An Optimization Approach for A Reverse Logistics Supply Chain*. In: Proceedings of the International Group Technology and Cellular Manufacturing Conference, March 26- 29, San Juan, Puerto Rico.
8. Lebreton B. (2007). *Strategic Closed-Loop Supply Chain Management*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, cap. 1, p. 5.
9. Lu Z, Bostel N. (2007) *A facility location model for logistic system including reverse flows: The case of remanufacturing activities*. Computers and Operations Research 34, p. 299-323.
10. Majumder P, Groenevelt H. (2001). *Competition In Remanufacturing: Production and Operations Management*. Vol. 10, Ed. 2, p. 125–141.
11. White CD, Masanet E, Meisner-Rosen C e SL Bechman (2003). *Product Recovery with Some Byte: An Overview of Management Challenges and Environmental Consequences*

in Reverse Manufacturing for the Computer Industry. Journal of Cleaner Production, cap. 11, p. 445-458.