

# MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROBLEMA DE COLETA DE RESÍDUOS DE BIOMASSA DE MADEIRA PARA FINS ENERGÉTICOS

**Flávio de Almeida Galvão Jr.<sup>1</sup>**

Programa de Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos  
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

**Claudio Barbieri da Cunha<sup>2</sup>**

Departamento de Engenharia de Transportes  
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Recebido: 15/06/2002 - Aprovado: 15/08/2002

## RESUMO

Este artigo trata da coleta de resíduos de madeira para fins energéticos. O processo de coleta foi decomposto em dois problemas de otimização: o de seleção dos produtores de madeira que ofereçam menor custo de aquisição e transporte de resíduos e o de dimensionamento da frota e designação dos veículos. São apresentadas as formulações matemáticas e estratégia de solução em ambiente de planilha eletrônica, de forma integrada com um conjunto de pacotes comerciais de otimização. Resolveu-se um problema real envolvendo a geração de vapor e energia para uma nova planta de refino de açúcar. Os resultados demonstraram ser viável obter a solução ótima para o problema de seleção de fornecedores, mas para o dimensionamento da frota e designação dos veículos os tempos de processamento resultaram muito elevados.

**Palavras-chave:** Dimensionamento de frota; designação e programação de veículos; coleta de resíduos.

## ABSTRACT

This paper deals with the wood waste collection problem for energy generation purposes. The problem to be solved has been decomposed into two optimization problems: the producer selection problem, aiming to minimize waste procurement and transportation costs and the fleet sizing and vehicle assignment problem. Both mathematical formulations are presented, as well as the solution strategy, based on spreadsheet optimization solvers. The proposed model was applied to a real world problem involving steam and energy generation for a sugar refinery plant. The producer selection problem could be solved satisfactorily to optimality. On the other hand, the CPU times for the fleet sizing and vehicle assignment problem resulted excessively high.

**Keywords:** Fleet sizing; vehicle assignment and scheduling; collect of waste residues

# 1. INTRODUÇÃO

O recente colapso no sistema de fornecimento de energia elétrica no Brasil, particularmente nas regiões sudeste e centro-oeste, determinou novas soluções para a geração de energia elétrica, entre as quais não só a geração distribuída, ou seja, a produzida nas proximidades dos respectivos centros de consumo e também o uso de combustíveis alternativos, como o resíduo de biomassa de madeira.

A questão dos preços do combustível é de vital importância para a viabilidade da geração própria de energia e vapor. A exploração de biomassa é competitiva quando comparada a outras fontes, como gás natural, óleo combustível, carvão etc. Adicionalmente, estes últimos são mais prejudiciais que os combustíveis renováveis, do ponto de vista ambiental.

Forsberg (2000) argumenta que a biomassa para conversão de energia é concebida como um dos recursos renováveis mais importantes no futuro dos sistemas de energia. Exemplos de bem sucedidas instalações em outros países, que incentivam o uso destes combustíveis renováveis para gerar energia, vapor ou ambos, induzem e estimulam estudos na área e contribuem para a sua aplicação mais ampla no Brasil.

Estudos e pesquisas diversas evidenciaram que os valores dos combustíveis provenientes de resíduos de biomassa são mais convenientes sob aspectos de custos e ambientais, porém, as questões logísticas para organizar a coleta desse combustível têm oferecido empecilhos à sua utilização de forma mais ampla.

Os resíduos de madeira são originados desde o corte da árvore nas florestas até a manufatura de produtos derivados, uma vez que o aproveitamento global é da ordem de 30 a 40%, em metros cúbicos. Em outras palavras, essas atividades podem gerar até 70% de resíduos de madeira que, até o momento, não estão sendo adequadamente tratados ou aproveitados.

Em diversas regiões brasileiras existe concentração de empresas que manufaturam a madeira, como as indústrias moveleiras e serrarias, entre outras, que geram resíduos, tais como cavacos, serragem, pontalotes, sobra de plainas, lascas, etc.

Têm-se observado um significativo crescimento dessas indústrias de beneficiamento de madeira, ou seja, indústrias moveleiras e serrarias, bem como das demais indústrias que, de modo geral, se valem de estruturas e estrados de madeira (paletes). As evidências que justificam tal crescimento englobam a implantação de novos empreendimentos que se instalaram em resposta aos incentivos brasileiros nos âmbitos federal, estadual e municipal, na forma de redução temporária de impostos, financiamentos, treinamento de mão-de-obra, etc.

Do ponto de vista ambiental, um aspecto fundamental a favor do aproveitamento dos resíduos de madeira está associado às pressões crescentes dos agentes ambientais e da sociedade, em decorrência da própria conscientização da existência dos resíduos de biomassa de madeira, além do aumento dos volumes gerados e das dificuldades de descarte.

Yan *et al.* (1997), de maneira uníssona ao demais estudiosos da área, argumentam que, de modo geral, as centrais térmicas que utilizam a biomassa como principal combustível produzem baixos índices de substâncias como  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{S}$ , hidrocarbonetos e particulados. As emissões de  $\text{CO}_2$  são consideradas quase zero, uma vez que não existe nenhuma contribuição adicional de carbono, por estar em equilíbrio com os absorvidos pelas florestas donde originam as respectivas biomassas. Além do mais, existem sistemas eficientes para a coleta do subproduto da queima da madeira (cinza), que pode

vir a ser utilizado como insumo para a indústria de fertilizantes.

O desconhecimento da logística para coleta de resíduos de biomassa de madeira, de diversas fontes geradoras, tem imposto dificuldades à implantação de novas usinas termoelétricas. Tendo em vista as características e a complexidade desse sistema de abastecimento, tais como inúmeras fontes produtoras, diferentes capacidades produtivas, dispersão de localização geográfica dos produtores, é imperativa a definição de um sistema eficiente de coleta e transporte desses resíduos, para assegurar a competitividade dessa alternativa de geração.

Nesse contexto, este trabalho aborda o problema de uma empresa internacional, com forte atuação no mercado mundial de açúcar de alta qualidade, que passou a estudar a possibilidade de implantação de uma unidade própria no Brasil para o refino de açúcar. Neste caso, o problema energético é relevante, uma vez que o custo da geração de vapor na produção de açúcar pode atingir cifras da ordem de até 50% do valor final do produto.

Assim, uma alternativa provável que passou a ser considerada consiste na geração de vapor e energia elétrica a partir de uma usina própria, alimentada por resíduos de madeira. A tecnologia da utilização de resíduos de biomassa de madeira como combustível para geração de vapor e energia, pela conversão térmica, é bastante conhecida.

Inspirado nesse problema, e em outras empresas com dificuldades similares, o presente trabalho aborda a questão de coleta de resíduos de biomassa de madeira para fins energéticos. Em especial serão tratados os problemas de seleção dos produtores de madeira que ofereçam menor custo de resíduos e transporte, o dimensionamento da frota quanto ao número de veículos e a determinação da seqüência diária de coleta, para minimizar o custo total de abastecimento.

Foram desenvolvidos modelos de otimização cuja premissa é a sua utilização em ambiente de planilhas eletrônicas, em conjunto com pacotes de programas comerciais de otimização, dentro das mais modernas tendências observadas de modelagem matemática por meio de planilhas (Ragsdale, 1998; Winston e Albright, 1997).

Este trabalho integra um conjunto de pesquisas que vêm sendo realizadas nas áreas de Logística e Transportes na Escola Politécnica da USP e que envolvem, genericamente, o desenvolvimento e a implantação computacional de novos algoritmos de solução para problemas de roteirização e de programação de veículos. Entre os trabalhos desenvolvidos mais recentemente, pode-se relacionar Cunha (1997), que tratou do problema de roteirização de uma frota heterogênea de veículos com restrições de janelas de tempo; Souza (1999) com o problema de transporte do tipo "Carga Única Coleta e Entrega"; Znamenski (2000) com o problema de roteirização e programação de veículos para o transporte de idosos e deficientes; Teixeira (2001) com o problema de dimensionamento e roteirização de uma frota heterogênea de veículos; Silva (2000), com o problema de programação de ônibus.

O trabalho está organizado da seguinte forma: no item 2 apresenta-se a caracterização do problema de coleta de resíduos de biomassa de madeira para fins energéticos, seguindo-se a revisão da bibliografia no item 3. A modelagem matemática é apresentada no item 4. No item 5 descreve-se a aplicação dos modelos propostos a um problema real. Por fim, no item 6 apresentam-se as considerações finais sobre o problema tratado e sua modelagem matemática.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Dada uma usina de geração (central), cuja localização é conhecida previamente, e que deve produzir continuamente vapor e energia ao longo de todo o ano, com um mínimo de variações, o problema de coleta de resíduos de biomassa de madeira para fins energéticos pode ser enunciado da seguinte forma: dado um conjunto de potenciais fornecedores de resíduos de biomassa de madeira, deve-se selecionar um subconjunto de fornecedores que minimize o custo global do fornecimento dos resíduos (aquisição mais transporte) para uma usina de geração; deverá, também, ser dimensionada a frota ótima de veículos, com a respectiva designação das suas viagens diárias, observando-se que os veículos farão sempre viagens de ida e volta, redondas, entre a refinaria de açúcar ou central de co-geração de vapor e energia (central) e cada fornecedor, coletando carga correspondente à capacidade total do veículo.

O conjunto de fornecedores potenciais também é conhecido, assim como as respectivas capacidades de geração de resíduos, os preços dos resíduos e as distâncias até a central.

No modelo proposto consideram-se como fornecedores (ou produtores) de resíduos as indústrias de madeiras de nível secundário, ou seja, as serrarias, empresas de compensados, aglomerados, indústrias moveleiras, entre outras, sem prejuízo para futuramente considerar o aproveitamento dos resíduos produzidos por atividades florestais e dos resíduos urbanos.

O período de tempo total considerado desde a data de geração dos resíduos até a data do seu efetivo consumo deverá ser menor ou igual a 14 dias corridos, conforme recomenda Forsberg (2000), por razões de degradação promovida por fungos causando riscos sanitários, odores e redução do poder calorífico.

Os veículos deverão fazer viagens ponto-a-ponto, entre cada fornecedor e a central, em ciclos regulares e definidos em função das respectivas capacidades de produção de resíduos, a fim de que a capacidade total do mesmo seja atingida num único carregamento. O carregamento do veículo num determinado fornecedor é realizado mesmo que a quantidade de resíduos não tenha atingido a capacidade prevista, cumprindo, da mesma forma, o ciclo e retornando à central. Caso o volume disponível exceda a capacidade do veículo, o resíduo deverá ser armazenado e aguardar a visita do próximo veículo.

O transporte de resíduos deverá, em princípio, ser realizado por uma ou mais empresas terceirizadas, porém com frota homogênea e jornada de trabalho pré-determinada. Os resíduos devem ser armazenados e transportados em contentores, para agilizar as operações de carga e descarga e minimizar o tempo de ciclo em cada viagem, melhorando o aproveitamento da frota.

Em suma, o modelo a ser proposto deverá selecionar os produtores que ofereçam menor custo de resíduos e transporte, dimensionar a frota quanto ao número de veículos e determinar a sequência diária de coleta dentro de um ciclo a ser estabelecido. Em outras palavras, pretende-se saber quantos veículos são necessários para atender o serviço de coleta e qual veículo atenderá cada produtor em cada dia. Observa-se que a ordem da coleta em um dia não é relevante, pois em cada viagem apenas um fornecedor é atendido, não havendo horários de coleta definidos.

## 3. REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA

Além do trabalho de Bodin *et al.* (1983), um importante referencial devido a sua abrangência, por apresentar inúmeros problemas diferentes que envolvem a roteirização e a programação de veículos e tripulações, buscaram-se na literatura referenciais teóricos que pudessem embasar este trabalho, entretanto não foram encontrados estudos que abordam o proble-

ma de coleta de resíduos com finalidade de aproveitamento energético.

Weintraub *et al.* (1996) desenvolveram uma heurística para apoiar e otimizar a programação diária de veículos para coleta de madeira das florestas e transporte até os pátios de seleção ou serrarias. A principal característica do sistema está em que os veículos se dirigem para um predeterminado ponto da floresta para serem carregados, de uma única vez.

O sistema operacional computadorizado idealizado pelos autores baseou-se num modelo de simulação com regras heurísticas para apoiar a decisão de programação diária de caminhões, tendo sido implementado em 8 grandes florestas no Chile. A heurística permitiu às empresas florestais ganhos quantitativos relativos às reduções de veículos, de guindastes, dos custos de transporte, bem como qualitativos quanto às melhorias nos controles gerais do sistema, com a organização dos estoques de toras nas origens, das condições operacionais dos caminhões e guindastes, do balanceamento dos fluxos de entregas nos pontos de demanda. Adicionalmente, as empresas conseguiram suavizar as operações a jusante e a jornada de trabalho dos motoristas foi reduzida, em média, de 14 para 10 horas.

Van Vliet *et al.* (1992) trataram do problema de distribuição de açúcar a granel por veículos, em viagens com carga completa. A programação do veículo corresponde à determinação de quais viagens cada veículo deve realizar. Após cada entrega, o veículo deve retornar à fábrica para novo carregamento. Ao contrário do presente problema, a questão tratada pelos autores havia restrições quanto aos horários de entrega, a frota era heterogênea e os veículos podiam carregar em diferentes unidades produtivas observando as restrições de capacidade de carregamento.

Equi *et al.* (1997) estudaram o problema de transporte e programação de veículos para entrega de um único produto, oriundo de diversas plantas para entrega em diferentes destinos. Os veículos são carregados nas origens e realizam uma única entrega com carga completa em cada viagem, assim, uma ou mais viagens podem ser realizadas numa mesma jornada diária de trabalho.

Nenhum dos trabalhos encontrados na literatura aborda um aspecto essencial do presente trabalho: definida para cada fornecedor a frequência de coleta, deve-se determinar quais fornecedores serão coletados em cada um dos dias, para minimizar a frota necessária. Em outras palavras, busca-se distribuir o esforço de coleta nos diferentes dias que compõem o período, para reduzir a frota necessária.

## 4. MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROBLEMA PROPOSTO

Tendo em vista a complexidade do problema proposto, que consiste em:

- selecionar um subconjunto de fornecedores que minimize o custo global de aquisição e transporte dos resíduos;
- determinar os dias de coleta para os fornecedores e também definir a programação diária de coleta de cada um dos veículos em cada um dos dias do período, de forma a minimizar a frota total necessária para a realização do serviço, atendendo restrições de duração máxima da jornada dos veículos e uma certa independência das duas decisões, já que cada viagem de coleta serve apenas um fornecedor, isto é, não ocorrem roteiros, para a modelagem matemática, foram definidos dois problemas, conforme se vê na Figura 1: seleção dos fornecedores e dimensionamento da frota e designação dos veículos.

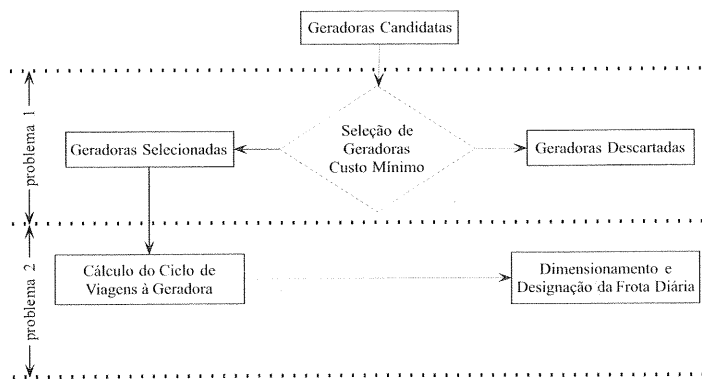


Figura 1 - Fluxograma da Metodologia Proposta

## 4.1. Seleção dos fornecedores

O problema consiste, inicialmente, em selecionar fornecedores de madeira que ofereçam menor custo de aquisição e transporte de resíduos, assegurando a quantidade mínima mensal a ser abastecida dentro de um certo período de dias, que representa o período em que este deverá ser consumido, ou seja, período entre a data da produção até a data do seu efetivo consumo.

Seja  $j=1,2,\dots,M$  o conjunto de potenciais fornecedores de resíduos de biomassa provenientes da indústria madeireira secundária.

Para cada potencial fornecedor (ou produtor ou geradora)  $j$  são conhecidos:

$PNT_j$  = produção nominal mensal de resíduos do fornecedor  $j$  em peso (t/mês);

$CM_j$  = custo mensal de abastecimento do resíduo do fornecedor  $j$  colocado na central (\$/mês);

$nd_j$  = intervalo entre coleta ao fornecedor  $j$  (dias).

Assume-se que toda a produção mensal  $PNT_j$  de cada fornecedor seja coletada. O custo mensal  $CM_j$  do fornecedor  $j$  é calculado com base na distância  $d_j$  até a usina, em valores de frete unitários praticados na região e na quantidade mensal a ser coletada. O ciclo de atendimento,  $nd_j$ , ou seja o período de tempo necessário para o fornecedor  $j$  atingir a capacidade do veículo é calculado com base na produção mensal e na capacidade de transporte do veículo em cada viagem.

A localização da central é conhecida e definida *a priori*. Ela tem por objetivo produzir continuamente vapor e energia ao longo de todo o ano com um mínimo de variações.

Seja  $Q_{min}$  a quantidade mínima de resíduo requerida, que corresponde à quantidade mensal mínima a ser coletada, expressa em toneladas por mês.

Seja  $T$  o período máximo admissível de tempo que o resíduo pode ficar armazenado nos fornecedores, tendo em vista a sua degradação. Conforme mencionado, segundo Forsberg (2000), esse período deve ser de, no máximo, 14 dias.

A formulação matemática do problema compreende as seguintes variáveis de decisão:

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{se o produtor } j \text{ foi selecionado} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

O problema de seleção de fornecedores pode ser formulado como segue:

$$[\min] \sum_{j=1}^M CM_j x_j \quad (1)$$

sujeito a:

$$\sum_{j=1}^M PNT_j x_j \geq Q_{min} \quad (2)$$

$$nd_j x_j \leq T \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

A função objetivo (1) garante que o custo mensal dos resíduos consumidos pela usina seja minimizado, enquanto a restrição (2) impõe a quantidade mínima total a ser fornecida e a restrição (3) limita o tempo em que o resíduo poderá ficar armazenado em cada fornecedor, em função da capacidade do veículo.

Esse problema apresenta uma estrutura similar à do problema da mochila binário (“zero-one knapsack problem”). O problema da mochila binário pode ser descrito genericamente da seguinte forma: dado um conjunto de objetos aos quais estão associados pesos e lucros, selecionar quais objetos devem ser colocados na mochila, visando maximizar o lucro proporcionado pelos objetos selecionados, e garantindo que o peso máximo dos objetos colocados na mochila não ultrapasse o limite de peso dela (Martello e Toth, 1988). A semelhança dá-se na quantidade mínima de resíduos demandada, ou seja, a quantidade mensal mínima a ser coletada,  $Q_{min}$ , que significaria a mochila aonde deveria ser inserida o maior número de geradoras que representem o menor custo possível.

## 4.2. Dimensionamento da Frota e Designação dos Veículos

Uma vez selecionados os fornecedores de resíduos que irão abastecer a usina de geração, o dimensionamento da frota, prevista como sendo homogênea, é obtido pela programação e designação de veículos às geradoras. Em outras palavras, deseja-se determinar qual veículo coletará resíduos de qual fornecedor e também a quantidade de veículos necessários, a fim de atender a demanda durante um predeterminado ciclo de dias para coleta.

Os fornecedores geram resíduos continuamente, armazenados em sistemas, cuja capacidade mínima é equivalente ao volume coletado, correspondente à capacidade de carga do veículo.

Uma frota homogênea de veículos deverá atender os fornecedores selecionados; os veículos farão as coletas tendo como origem a central, de onde sairão vazios para coletar os resíduos em único fornecedor em cada viagem, sempre com carga máxima, e retornando diretamente à usina. Caso o volume disponível no fornecedor seja maior que a capacidade do veículo, este será abastecido até o limite da sua capacidade; caso contrário, mesmo assim o veículo será carregado e retorna diretamente à usina, embora ainda exista a possibilidade de completar a carga com coleta em outro fornecedor.

O intervalo entre viagens consecutivas para um mesmo fornecedor é definido a partir da taxa de geração de resíduos, a fim de que a capacidade do veículo seja atingida num único carregamento. Assume-se que não seja necessária mais de uma viagem de coleta por dia para cada fornecedor.

Para o atendimento dos fornecedores selecionados deve-se dimensionar a frota necessária para a realização desses serviços, e a sua programação e designação; ou seja, pretende-se saber quantos veículos são necessários para coleta, diariamente, e qual dos veículos atenderá qual fornecedor. Observa-se que a ordem da coleta não é considerada no problema, pois ter-se-ão ciclos ponto a ponto, ou seja, de ida e volta estabelecendo, portanto roteiros de viagens, sempre, da central e a um único fornecedor.

Seja  $i=1,2,\dots,N$  o conjunto de fornecedores de resíduos de biomassa selecionados para abastecimento da usina, conforme descrito no item 4.1. Para cada fornecedor  $i$  é conhecido o tempo do ciclo veicular ( $TC_i$ ) para coleta no fornecedor  $i$ , o qual engloba os tempos de percurso (ida e volta), o tempo de carga no fornecedor e o tempo de descarga na usina.

Seja  $v=1,2,\dots,N$  uma frota de veículos homogêneos que pode realizar as coletas de resíduos. Note-se que o número máximo de veículos potencialmente necessários é  $N$ , exatamente igual ao número de fornecedores, sendo, neste caso, cada veículo

alocado a um único fornecedor, uma vez que, conforme citado acima, nenhum fornecedor requer mais de uma viagem por dia. Os veículos coletarão os resíduos de acordo com a sua capacidade máxima de volume ou de peso, obedecendo uma duração máxima da jornada diária de trabalho  $H$ , expressa em h/dia.

O esquema de coleta de resíduos nas geradoras está representado esquematicamente na Figura 2, evidenciando os tempos de ciclos veiculares e a periodicidade de coleta -  $nv_i$  viagens a cada  $nd_i$  dias para o fornecedor  $i$ . Essa periodicidade é determinada em função do tempo de enchimento, calculado a partir da taxa de produção de resíduos de cada fornecedor e da capacidade dos veículos.

No problema em questão assume-se que não existem fornecedores que requerem mais de uma viagem por dia; assim,  $nv_i = 1$  e  $nd_i =$  intervalo entre coletas.

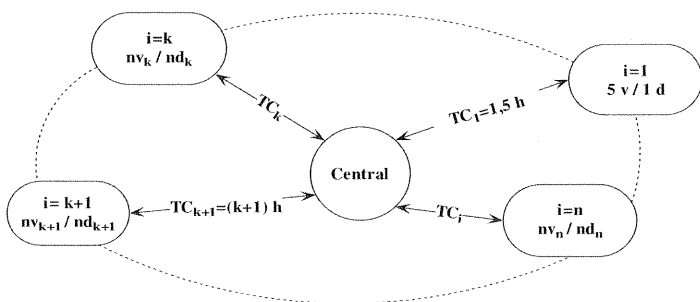


Figura 2- Esquema Simplificado de Coleta de Resíduos

Seja  $t=1,2,\dots,T$  cada um dos dias do período de programação, onde  $T$  é o período máximo admissível de tempo que o resíduo pode ficar armazenado nos produtores.

A partir do intervalo entre coletas  $nd_i$  e da duração do período de programação, é possível calcular, para cada fornecedor, o total de viagens ( $totv_i$ ) necessárias no período, dada pela expressão a seguir:

$$totv_i = \left\lceil \frac{T}{nd_i} \right\rceil \quad \text{onde } \lceil x \rceil = \text{menor inteiro maior ou igual a } x.$$

A expressão acima define um número inteiro de viagens no período. Entretanto esse arredondamento não tem impacto no tempo de ciclo  $TC_i$  de cada fornecedor  $i$ , mesmo que a quantidade coletada seja um pouco inferior à capacidade do veículo.

A formulação matemática do problema compreende as seguintes variáveis de decisão:

$$y_v = \begin{cases} 1, & \text{se o veículo } v \text{ foi utilizado} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$x'_{vi} = \begin{cases} 1, & \text{se o veículo } v \text{ efetua coleta no produtor } i \text{ no dia } t \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

O problema de dimensionamento da frota e designação dos veículos pode ser formulado como segue:

$$[\min] \sum_{v=1}^N y_v \quad (4)$$

sujeito a:

$$\sum_{i=1}^N TC_i x'_{vi} \leq Hy_v \quad v = 1, 2, \dots, N; t = 1, 2, \dots, T \quad (5)$$

$$\sum_{v=1}^N \sum_{t=1}^T x'_{vi} = totv_i \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

$$\sum_{v=1}^N \sum_{t=1}^{t+(nd_i-1)} x'_{vi} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, N; t = 1, 2, \dots, T - (nd_i + 1) \quad (7)$$

A função objetivo (4) visa assegurar a minimização da frota total necessária para a realização de todas as coletas no período  $T$ . Deve-se notar que já estão definidos o número total de viagens a ser realizada no período, dado pela somatória de  $totv_i$  para todos os fornecedores  $i$ , assim como a quilometragem total a ser percorrida, dado que todas as coletas são viagens redondas entre um fornecedor e a usina. A maior ou menor necessidade de frota é determinada pelos dias de coleta em cada fornecedor e pelas viagens alocadas a cada veículo, de forma a respeitar a restrição de duração máxima da jornada de trabalho do veículo, definida pela expressão (5), que corresponde à somatória dos tempos de ciclo de todos os fornecedores atendidos por cada um dos veículos em cada um dos dias do período  $T$ . As restrições (6) asseguram que sejam realizadas, para cada fornecedor, todas as viagens de coletas necessárias para o período. Já as restrições (7) garantem que as viagens programadas sejam realizadas de acordo com o intervalo  $nd_i$  de cada fornecedor; desta forma, impede-se que o modelo programe, por exemplo, mais de uma viagem no mesmo dia, ou viagens em dias consecutivos, quando os resíduos não estão disponíveis para a coleta, por não terem sido produzidos. Esse intervalo é sempre maior ou igual a um.

Duas observações são importantes em relação a este modelo matemático. A primeira delas diz respeito à viabilidade do problema. Da forma como foi formulado, o problema sempre admite uma solução viável, desde que  $TC_i \leq H$ , uma vez que potencialmente podem ser utilizados até  $N$  dos veículos disponíveis, um para cada fornecedor. A outra observação tem a ver com o tamanho do problema. Embora a formulação matemática aparente ser simples, o número de variáveis de decisão é proporcional ao produto do quadrado do número de fornecedores ( $N$ ) com a duração do período ( $T$ ).

## 5. APLICAÇÃO DO MODELO

Os dois modelos matemáticos propostos foram implantados em ambiente de planilha eletrônica Microsoft Excel, seguindo uma tendência mais recente de utilização de planilhas eletrônicas para a modelagem matemática de problemas de otimização, conforme pode ser verificado nos trabalhos de Ragsdale (1998), Winston e Albright (1997) e Grossman Jr. (1999).

Os modelos foram aplicados ao problema real mencionado no início do trabalho, que envolve implantação de uma planta para o refino de açúcar na região sul do Brasil, com geração de vapor e energia elétrica a partir de uma usina própria, alimentada por resíduos de madeira.

Pesquisas de campo realizadas resultaram num universo de 177 empresas candidatas para fornecer resíduos de madeira, considerando-se as peculiaridades de acesso ao local pretendido para a instalação da planta. Foram coletados todos os dados necessários à modelagem do problema, conforme descrito no item anterior.

Tendo em vista o porte do problema, inicialmente selecionou-se a versão denominada *Large-Scale LP Solver Engine Version 4.0* para Microsoft Excel capaz de resolver instâncias com até 16 mil variáveis de decisão, incluindo variáveis inteiras e binárias. (Frontline Systems Inc, 2000a). Essa é uma versão profissional do sistema Solver, cuja versão básica, para pequenos problemas está disponível, gratuitamente, com o Microsoft Excel (Winston e Albright, 1997).

O problema de seleção dos fornecedores foi resolvido até a otimalidade sem nenhuma dificuldade, utilizando o *Large-Scale LP Solver Engine*. Conforme esperado, o tempo de processamento foi bem reduzido, tendo em vista a dimensão do problema (apenas 177 variáveis binárias). Como resultado da otimização, foram selecionados 60 fornecedores, que atendem as necessidades de abastecimento da usina ao mínimo custo.

Partiu-se, então, para a resolução do problema de dimensionamento da frota e designação dos veículos. A solução

desse problema consiste na definição dos dias de coleta para cada fornecedor, de acordo com o intervalo entre coletas  $nd_i$ , e na programação de cada veículo em cada dia, ou seja, nos fornecedores designados a cada veículo, atendendo as restrições de duração das jornadas de trabalho.

Conforme discutido no item anterior, este problema apresenta maior complexidade, tendo em vista o número elevado de variáveis de decisão binárias e também de restrições. Para fins de avaliação do *software* de otimização, foi inicialmente preparado um problema menor, com cerca de 20 fornecedores, o que representa cerca de 4.000 variáveis de decisão. O tempo de processamento do *Large-Scale LP Solver Engine* até atingir a solução ótima foi elevado, superior a 2 horas. Para o problema real, com os 60 fornecedores e um ciclo de coleta de 8 dias, o que resultava em 10.820 variáveis de decisão, o tempo de processamento tornou-se proibitivo, superando 48 horas numa máquina com processador Intel Pentium-II e 128Mb de memórias RAM. A solução obtida garantiu um bom aproveitamento dos veículos e uma boa distribuição dos dias de coletas, resultando numa frota de 18 veículos.

Tais resultados já eram previstos, mesmo para o problema de dimensões relativamente reduzidas, uma vez que o *Large-Scale LP Solver Engine* não se destina a resolver problemas de programação linear inteira, em particular com variáveis binárias.

Optou-se então por utilizar a versão mais avançada do conjunto de pacotes oferecidos pela Frontline Systems Inc., o *XPRESS Solver Engine Version 3.5* para Microsoft Excel que, segundo o fabricante, destina-se a problemas de programação linear inteira e permite tratar até 200.000 variáveis de decisão (Frontline Systems Inc, 2000b).

Entretanto, mesmo com essa nova versão, o tempo de processamento continuou muito elevado, superando 12 horas para o problema com 10.820 variáveis de decisão, número este ainda muito inferior à capacidade nominal do otimizador. A fim de validar os testes, versões do problema com menor número de fornecedores foram testadas e resolvidas em tempo de processamento satisfatório.

Esses resultados sugerem que o problema de dimensionamento da frota e designação dos veículos pode ser do tipo *NP-difícil*, ou seja, possui ordem de complexidade exponencial. Em outras palavras, o esforço computacional para a sua resolução cresce exponencialmente com o tamanho do problema.

Em termos práticos, isto significa que não é possível resolver até a otimalidade problemas de porte encontrados em situações reais do tipo *NP-difícil*. Conseqüentemente, para o problema em questão pode ser necessário lançar mão de alguma estratégia de solução heurística eficiente que, embora não possa assegurar a obtenção da solução ótima, permite obter soluções de boa qualidade em tempos de processamento adequados, para instâncias encontradas no mundo real.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho tratou do problema de coleta de resíduos de biomassa de madeira para a geração de energia e vapor. Mais especificamente, a questão tratada estava relacionada à geração de vapor para uma nova planta de refino de açúcar de alta qualidade, em que o custo de geração é muito elevado, podendo atingir até cerca de 50% do custo final do produto.

A tecnologia da utilização de resíduos de biomassa de madeira como combustível para geração de vapor e energia, pela conversão térmica, é bastante conhecida e, conforme foi visto, também apresenta vantagens do ponto de vista ambiental.

As características e a complexidade do abastecimento de uma usina a partir de resíduos de madeira, dada pelo número de produtores e sua dispersão geográfica, requerem um sistema eficiente de coleta e transporte desses resíduos, para assegurar o abastecimento ao mínimo custo.

Não se encontrou na literatura nenhuma referência bibliográfica que considerasse esse problema ou algum semelhante, apesar da relevância e da existência de inúmeros casos reais similares ao ora tratado o que confirma a observação feita por Weintraub *et al.* (1996) de que os problemas de alocação e seqüência de coleta com veículos que atendam viagens, ponto a ponto, têm sido menos discutidos na literatura se comparados aos modelos de programação de veículos que fazem coleta em diversos produtores até que atinjam a respectiva capacidade máxima de carga.

O problema em questão foi decomposto em dois problemas: o problema de seleção dos produtores de madeira que ofereçam menor custo de resíduos e transporte e o problema de dimensionamento da frota quanto ao número de veículos e a determinação da seqüência diária de coleta, para minimizar o custo total de abastecimento.

O intuito básico, com a decomposição do problema, seria o de permitir, facilitar e estimular o uso de planilhas eletrônicas, que são tão populares nos dias atuais, e quase que da mesma forma os pacotes comerciais para solução de modelagem matemática.

Foram apresentados os modelos matemáticos desenvolvidos para cada um dos dois problemas. A estratégia de solução proposta visou explorar a sua solução em ambiente de planilha eletrônica, mais especificamente, o Microsoft Excel, em conjunto com pacotes de otimização disponíveis para esse ambiente, desenvolvidos pela Frontline Systems Inc.

Os modelos foram testados para um problema real que envolve a construção de uma planta de refino de açúcar e alta qualidade, com geração de vapor a partir de resíduos de biomassa de madeira, localizada na região sul do Brasil.

O problema da seleção dos produtores de madeira foi solucionado de maneira satisfatória utilizando os pacotes comerciais de otimização selecionados. Já para o problema de dimensionamento da frota e designação dos veículos foram observados tempos de processamento muito elevados, mesmo utilizando o pacote mais avançado disponível, o que pode inviabilizar a utilização de pacotes para esse problema.

Deve-se destacar que não se pretendeu neste trabalho avaliar os diferentes pacotes de otimização para uso com planilhas eletrônicas. Partiu-se do sistema Solver, cuja versão básica, para pequenos problemas está disponível, gratuitamente, com o Microsoft Excel. As versões mais poderosas desse pacote foram utilizadas em decorrência das dimensões do problema. Note-se que outros fabricantes também possuem plataforma que aderem ao ambiente de planilhas, mas, segundo entendimento dos autores deste artigo, iria demandar algum tipo de ajuste, adaptação ou mesmo de interpretação, que poderia vir a perturbar o intento inicial.

Finalmente, recomenda-se a investigação de métodos heurísticos para a solução do problema proposto. Uma nova estratégia de solução, com a utilização de alguma metaheurística, possivelmente algoritmos genéticos, está sendo considerada. Recomenda-se ainda investigar a existência de algum outro pacote que possa ser aplicado ao problema em questão.

## Referências bibliográficas

- Bodin, L.D.; B. Golden; A. Assad e M. Ball (1983) Routing and scheduling of vehicles and crews: The state of the art. *Computers and Operations Research*, vol.10, n.2.
- Cunha, C. B. (1997) *Uma contribuição para o problema de roteirização de veículos com restrições operacionais*. São Paulo: EPUSP, Departamento de Engenharia de Transportes. 222p. (Tese de Doutorado).
- Equi, L.; G. Gallo; S. Marziale, Silva e A. Weintraub (1997). A combined transportation and scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, v. 97, p.94-104.



- Forsberg, G. (2000). Biomass energy transport. Analysis of bioenergy transport chains using life cycle inventory method. *Biomass and Bioenergy*, v.19, p.17- 30.
- Frontline Systems Inc. (2000a). *Large-Scale LP Solver Engine Version 4.0 for Microsoft Excel*. Disponível em <http://www.solver.com> . Acesso em 15 dez. 2001.
- Frontline Systems Inc. (2000b). *XPRESS LP/MIP Solver for Microsoft Excel*. Disponível em <http://www.solver.com> . Acesso em 15 dez. 2001.
- Grossman Jr., T. (1999). Teachers Forum: Spreadsheet Modeling and Simulation Improves Understanding of Queues. *Interfaces*, v.29, n.3, p. 88-103.
- Martello, S.; P. Toth (1988) A new algorithm for the 0-1 knapsack problem. *Management Science*, 34(5): 633-644.
- Ragsdale, C.T. (1998). *Spreadsheet modeling and decision analysis*. 2<sup>nd</sup> ed. South Western College Publishing: Cincinnati, Ohio.
- Silva, G.P. (2001). *Um algoritmo de geração de arcos para o problema de programação de veículos* 188 p. Tese de Doutorado– EPUSP, Departamento de Engenharia de Transportes.
- Souza, E. C. (1999). *Modelagem e Resolução de um Problema de Transporte do Tipo: “Carga Única-Coleta e Entrega” com Janelas de Tempo*. São Paulo, 89p. Dissertação de Mestrado – EPUSP, Departamento de Engenharia Naval e Oceânica.
- Teixeira, R.G. (2001) Heurísticas para o Problema de Dimensionamento e Roteirização de uma Frota Heterogênea utilizando o Algoritmo Out-of-kilter. 118p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- Van Vliet, A.; C. G. Boender e A. H. G. Rinnooy Kan (1992). Interactive Optimization of Bulk Sugar Deliveries. *Interfaces*, v.22, n.3, p.4-14
- Weintraub, A.; R. Epstein; R. Morales; J. Seron e P. Traverso (1996). A Truck Scheduling System Improves Efficiency in the Forest Industries. *Interfaces*, v26, n.4, p.1-12.
- Winston, W.L. e S.C. Albright (1997). *Practical Management Science: Spreadsheet Modeling and Applications*. Duxbury Press: Belmont, California.
- Yan J.; P. Alvfors; L. Eidensten e G. Svedberg (1997). *A future for biomass*. The American Society of Mechanical Engineers.
- Znamensky, A. (2000). *Um modelo para a roteirização e programação do transporte de deficientes*. São Paulo: EPUSP, Departamento de Engenharia de Transportes. 144p. Dissertação (Mestrado).

## CONTATOS

<sup>1</sup> Flávio de Almeida Galvão Jr.

E-mail: flavio.galvaojr@terra.com.br  
Fones: (11) 3083-0502 / (11) 9986-2122  
Fax: (11) 3083-2239

<sup>2</sup> Claudio Barbieri da Cunha

E-mail: cbcunha@usp.br  
Fones: (11) 3091-5732  
Fax: (11) 3091-5716