

JULIO EDUARDO ARCE

**UM SISTEMA DE PROGRAMAÇÃO DO TRANSPORTE
PRINCIPAL DE MULTIPRODUTOS FLORESTAIS
VISANDO A MINIMIZAÇÃO DE CUSTOS**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Ciências Florestais, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Celso Carnieri

CURITIBA
Novembro de 1997



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

P A R E C E R

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, reuniram-se para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado, apresentada pelo candidato **JULIO EDUARDO ARCE**, sob o título "UM SISTEMA DE PROGRAMAÇÃO DO TRANSPORTE PRINCIPAL DE MULTIPRODUTOS FLORESTAIS VISANDO A MINIMIZAÇÃO DE CUSTOS", para obtenção do grau de Mestre em Ciências Florestais, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, Área de Concentração **MANEJO FLORESTAL**.

Após haver analisado o referido trabalho e argüido o candidato são de parecer pela "APROVAÇÃO" da Dissertação, com média final:(40,0), correspondente ao conceito:(A).

Curitiba, 28 DE NOVEMBRO DE 1997

Maria Teresinha Arns Steiner

Prof. Dra. Maria Teresinha Arns Steiner

Primeira Examinadora

UFPR

Vitor Afonso Hoeflich

Prof. Dr. Vitor Afonso Hoeflich

Segundo Examinador

UFPR

Celso Carnieri

Prof. Dr. Celso Carnieri
Orientador e Presidente da Banca

UFPR



Aos meus pais, à minha esposa Verónica e ao nosso filho Rodrigo.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Celso Carnieri, não só pela orientação acadêmica e profissional senão também pela confiança, amizade, e irrestrito apoio ao longo de todo meu curso, apoio que começou com a aceitação de me orientar apesar de me conhecer somente por correspondência.

Aos meus co-orientadores, Professores Vítor Afonso Hoeflich e Carlos Roberto Sanquetta, pelos valiosos aportes e sugestões realizados.

Ao Programa PEC/PG-96, do CNPq, pela ajuda financeira materializada na Bolsa de Estudos que me foi concedida.

A todos os professores da área Conexa, Manejo e Economia que tive o prazer de conhecer nas disciplinas próprias do curso.

À Verónica, minha esposa, pelo constante estímulo e ajuda, e ao Rodrigo, nosso filho, por ter-me concedido uma razoável tranquilidade, necessária para a conclusão deste curso.

Aos meus tios, Jorge e Rita, pela incomensurável decisão de ter colocado a disposição o apartamento onde morei com minha família durante os dois anos de duração do curso.

Aos meus colegas, Jeferson, Henrique, Walquiria, Tânia, Neida, Fernando, Márcio, Zenóbio, Coutinho, Ruth, Angelise, Luiz Carlos, Rocha, Guilherme, Paulo Costa, Paulo de Tarso, Nirlene e Christoph, que de uma ou de outra maneira têm-me ajudado a concluir o curso.

Aos meus colegas da Argentina, em particular ao meu compadre, amigo e colega, o Engenheiro Florestal Ricardo Bratovich e à sua esposa Viviana, e em geral também aos Engenheiros Raúl Marlats, Jorge Marquina, Patricio Mac Donagh, Gerardo Denegri,

Guillermo Martinez Pastur, Cecília Fernández, Pablo Peri, Mario Pastorino, Ricardo Vukasovic, que acompanharam de perto o desenvolvimento de meu trabalho.

Aos secretários do Curso de Pós-Graduação, Eliane e Reinaldo, por terem-se mostrado sempre dispostos a esclarecer e proporcionar atenciosamente toda a documentação que rotineiramente me foi requerida durante o curso.

Às bibliotecárias e funcionários do setor de Ciências Agrárias, Liliana L. Pizzolato, Doroti Andrade, Evelyn Da Silva, Maria H. Carvalho, Vera L. Ditter, Jurema Deodato de Oliveira, Márcia Wellner e Agrinaldo Rodrigues de Lima, pela dedicação ao seu trabalho, sem o qual seria impossível concluir nenhum curso de Pós-Graduação.

À equipe da Gerência de Transportes da empresa PISA Florestal S.A, nas pessoas do Eng. Germano Basso Júnior e do Eng. Carlos Henrique Panek, por terem se mostrado sempre dispostos a aclarar os inúmeros detalhes que surgiram durante o planejamento e a programação do SPT.

Ao Eng. Jefferson Bueno Mendes e ao Eng. Renato M. Petla, da Silviconsult Engenharia Ltda., pelos valiosos aportes e sugestões realizadas durante o presente trabalho.

À Productique Informática, nas pessoas do Dr. Edgar Jamhour, Fernanda e De Paula, pela versão profissional da programação do SPT e pelas dicas para a elaboração da programação realizada para efetuar os testes do SPT.

Finalmente, e de maneira mais que especial, a todas as pessoas que contribuíram para tornar sumamente grata e confortável a estadia de minha família no Brasil.

BIOGRAFIA DO AUTOR

Julio Eduardo Arce, filho de Julio Enrique Arce e de Rosemaria Volkmer, nasceu em Bad Tölz, Baviera, Alemanha, a 30 de maio de 1968.

Iniciou seus estudos de primeiro grau em 1974 na Mittelpunktschule, Zeven, Niedersachsen, Alemanha. Prosseguiu os estudos na Escuela Provincial N° 7 “Tomás Falkner” de Junín de los Andes (NQN), na Esc. Prov. “Peralta Ramos” de Mar del Plata (Bs. As.), no Col. “Ceferino Namuncurá” de Junín de los Andes (NQN) e na Esc. Prov. N° 201 “Hipólito Irigoyen” de Neuquén (NQN), todas na República Argentina. Realizou o segundo grau técnico na Esc. Nac. de Educación Técnica N° 1 de Neuquén (NQN), Argentina, onde formou-se em 1986 como Técnico Mecânico Eletricista. Em 1987 iniciou seus estudos na Univ. Nac. de La Plata (Bs. As.), Argentina, onde graduou-se em outubro de 1993 como Engenheiro Florestal.

Em janeiro de 1994 foi contratado pela Corporação Florestal Neuquina (CORFONE) na Província de Neuquén, Argentina, onde exerceu sua profissão nas áreas de silvicultura e manejo florestal de plantações de *Pinus ponderosa* e de *P. contorta* var. *latifolia* até junho de 1995. Nesse período foi Representante Técnico da empresa CORFONE perante a Administração Nacional de Parques Nacionais da República Argentina.

Desde maio de 1995 integra, como ajudante diplomado *ad honorem*, o corpo docente da Cátedra de Silvicultura II da Universidad Nacional de La Plata (Bs. As.), Argentina.

Desde fevereiro de 1996 faz parte do Projeto Biometria e Produção Florestal da Estação Experimental Santa Cruz do Instituto Nacional de Tecnologia Agropecuária (INTA), na Província de Santa Cruz, Argentina.

Em 1996 iniciou seus estudos a nível de mestrado no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná na área de concentração Manejo Florestal, os quais são concluídos com a defesa desta dissertação.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	ix
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	5
2 REVISÃO DE LITERATURA	7
2.1 MODELOS DE PLANEJAMENTO FLORESTAL	7
2.2 PESQUISA OPERACIONAL	8
2.3 APLICAÇÕES DA PESQUISA OPERACIONAL AO TRANSPORTE	9
2.3.1 O problema do roteamento de veículos com janelas de tempo	9
2.3.2 O transporte através de uma frota de caminhões	12
2.3.3 Os modelos para o transporte de produtos agropecuários e florestais	14
2.3.4 O transporte de outros produtos e outras aplicações de transporte	18
3 MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1 DADOS UTILIZADOS	20
3.2 METODOLOGIA	21
3.2.1 Utilização de quadrantes para a determinação das distâncias	22
3.2.2 Unidade de transporte	24
3.2.3 Unidade de tempo e horizonte de planejamento	25
3.2.4 Nomenclatura e simbologia adotadas	30
3.2.5 A Programação Linear	31
3.2.5.1 Modelo genérico de Programação Linear	32
3.2.5.2 O Algoritmo Simplex (<i>Método Simplex</i>)	33

3.2.6	O Modelo de Transporte	34
3.2.7	Solução do Modelo de Transporte - Técnica de Transporte	38
3.2.7.1	Determinação da solução factível inicial – Regra do canto noroeste	39
3.2.7.2	Determinação da variável que entra - Método dos Multiplicadores.....	41
3.2.7.3	Determinação da variável que sai - Construção de um ciclo	43
3.2.8	Aplicação do Modelo de Transporte aos multiprodutos florestais.....	47
3.2.9	A Programação Dinâmica	49
3.2.9.1	O Princípio de Otimalidade.....	52
3.2.9.2	Procedimentos <i>forward</i> e <i>backward</i> (avanço e retrocesso)	53
3.2.9.3	Equação recursiva	54
3.2.10	Cálculo dos tempos de espera em filas	54
3.3	DESCRIÇÃO DOS DADOS UTILIZADOS PARA TESTAR O SISTEMA DE PROGRAMAÇÃO DO TRANSPORTE.....	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	64
4.1	SISTEMA DE PROGRAMAÇÃO DO TRANSPORTE PRINCIPAL DE MULTIPRODUTOS FLORESTAIS - SPT	65
4.1.1	O Algoritmo do Modelo de Transporte.....	68
4.1.1.1	Descrição do Algoritmo do Modelo de Transporte	69
4.1.1.2	Resultados da aplicação do Algoritmo do Modelo de Transporte.....	71
4.1.1.3	Discussão dos resultados do Algoritmo do Modelo de Transporte	72
4.1.2	O Algoritmo de Designação dos Caminhões	74
4.1.2.1	Descrição do Algoritmo de Designação dos Caminhões.....	75
4.1.2.2	Resultados da aplicação do Algoritmo de Designação dos Caminhões.....	85
4.1.2.3	Discussão dos resultados do Algoritmo de Designação dos Caminhões.....	87
4.2	DISCUSSÃO GERAL DOS RESULTADOS DO SISTEMA DE PROGRAMAÇÃO DO TRANSPORTE DE MULTIPRODUTOS FLORESTAIS.....	88

5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	91
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

LISTA DE FIGURAS

1	MODELO DE TRANSPORTE REPRESENTADO COMO UMA REDE COM m PONTOS DE PRODUÇÃO E n CLIENTES	36
2	REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA PROGRAMAÇÃO DINÂMICA APLICADA À DESIGNAÇÃO DOS CAMINHÕES	51
3	CÁLCULO DO TEMPO DE ESPERA EM FILAS COM JANELAS DE TEMPO.....	55
4	EXEMPLO DA UTILIZAÇÃO DE QUADRANTES PARA A DETERMINAÇÃO DAS DISTÂNCIAS ENTRE OS PONTOS DE PRODUÇÃO ($i - \square$) E OS CLIENTES ($j - \square$)	63
5	FLUXOGRAMA DO SISTEMA DE PROGRAMAÇÃO DO TRANSPORTE.....	67
6	FLUXOGRAMA DO ALGORITMO DO MODELO DE TRANSPORTE	70
7	FLUXOGRAMA DO ALGORITMO DE DESIGNAÇÃO DOS CAMINHÕES.....	76

LISTA DE TABELAS

1	FATORES DE CONVERSÃO ENTRE UNIDADES DE VOLUME E PESO	25
2	EXEMPLO DA GRADE HORÁRIA SEMANAL DE TRABALHO PARA ALGUMAS ENTIDADES DO SPT.....	27
3	VOLUMES DIÁRIOS QUE DEVERIAM SER ENTREGUES AO CLIENTE HIPOTÉTICO j CONSIDERANDO UMA QUANTIDADE DEMANDADA DE 960 m ³ , UM PRAZO DE ENTREGA DE 10 DIAS, E A GRADE HORÁRIA SEMANAL DE TRABALHO APRESENTADA NA Tabela 2.....	28
4	EXEMPLO DE UMA TABELA DE TRANSPORTE.....	38
5	SOLUÇÃO BÁSICA INICIAL OBTIDA COM A REGRA DO CANTO NOROESTE	41
6	CICLO COM A VARIÁVEL x_{31} QUE ENTRA NA SOLUÇÃO BÁSICA DA Tabela 5	44
7	TABELA DE TRANSPORTE APÓS A PRIMEIRA PERMUTA DE VARIÁVEIS.....	45

8	REVISÃO DA OTIMALIDADE APÓS A PRIMEIRA PERMUTA DE VARIÁVEIS.....	46
9	TABELA DE TRANSPORTE APÓS A SEGUNDA PERMUTA DE VARIÁVEIS.....	46
10	SOLUÇÃO ÓTIMA FINAL PARA A TABELA DE TRANSPORTE.....	47
11	CARACTERÍSTICAS DOS PRODUTOS FLORESTAIS (p) A SEREM TRANSPORTADOS.....	59
12	DESCRIÇÃO DOS PONTOS DE PRODUÇÃO (i) DA REGIÃO DE MOQUÉM.....	59
13	DESCRIÇÃO DOS CLIENTES (j) QUE UTILIZAM MADEIRA DA REGIÃO DE MOQUÉM.....	60
14	VELOCIDADES DE CIRCULAÇÃO DOS CAMINHÕES [km/h] CONSIDERANDO O TIPO DE ESTRADA E SE A VIAGEM É COM OU SEM CARGA.....	60
15	CARACTERÍSTICAS DAS CLASSES DE CAMINHÕES UTILIZADOS PARA O TRANSPORTE FLORESTAL.....	61
16	MATRIZ DE INTERVALOS DE DISTÂNCIA [km] ENTRE OS PONTOS DE PRODUÇÃO E OS CLIENTES.....	62
17	MATRIZ DE INTERVALOS DE TEMPO [h:mm] DAS VIAGENS ENTRE OS PONTOS DE PRODUÇÃO E OS CLIENTES.....	62
18	MATRIZ DE PREÇOS UNITÁRIOS PAGOS PELO TRANSPORTE [R\$/t] ENTRE OS PONTOS DE PRODUÇÃO E OS CLIENTES.....	62
19	QUANTIDADES ÓTIMAS MENSAIS A SEREM TRANSPORTADAS GERADAS PELO ALGORITMO DO MODELO DE TRANSPORTE - AMT.....	71
20	PROGRAMA DE TRANSPORTE ÓTIMO GERADO PELO ALGORITMO DE DESIGNAÇÃO DOS CAMINHÕES PARA UMA SEGUNDA-FEIRA.....	86

RESUMO

No presente trabalho foi desenvolvido um Sistema de Programação de Transporte (SPT) principal de multiprodutos florestais cujo objetivo principal foi a minimização dos custos de transporte pagos atualmente pelas empresas florestais. As entidades do SPT são os pontos de produção, os clientes e os caminhões. As localizações dos pontos de produção se caracterizam por serem mutáveis no tempo; as frentes de corte vão se deslocando para outros lugares dentro do mesmo projeto ou talhão, ocasionando variações nas distâncias a serem percorridas com os produtos florestais que nelas são produzidos. A maneira encontrada para simplificar estas mudanças nas distâncias foi a utilização de quadrantes determinados com algum critério. O quadrante pode ser definido como uma área perfeitamente localizada nos mapas e no terreno, homogênea no que se refere às condições de acesso, tráfego, caminhos, etc., de tal maneira que possa ser assumido que todos os pontos contidos no interior dele estão localizados à mesma distância (ou tempo de viagem) de qualquer um dos demais quadrantes. Desta maneira não precisa ser atualizada toda a matriz de distâncias e custos a cada vez que um ponto de produção se translada fisicamente no terreno. O SPT compõe-se de dois módulos, correspondendo a cada um deles uma rotina ou algoritmo específico. O primeiro módulo tem por finalidade a minimização global da soma dos custos de transporte principal correspondentes às viagens carregadas com madeira de todos os caminhões da frota terceirizada. Para a minimização é utilizada a técnica da Pesquisa Operacional conhecida como Método de Transporte, que é um caso especial do Método Simplex, e cuja solução constitui o Algoritmo do Modelo de Transporte (AMT). Este AMT, após executado separadamente para cada um dos produtos florestais, indica as quantidades ótimas de cada tipo de produto florestal que devem ser transportadas desde cada ponto de produção até cada cliente de maneira a minimizar a soma dos custos totais de transporte principal. O segundo módulo tem por finalidade a programação no tempo de todas as viagens de cada um dos caminhões da frota terceirizada. O Algoritmo de Designação dos Caminhões (ADC) utiliza a Programação Dinâmica e é executado separadamente para cada um dos caminhões da frota. Cada viagem de um caminhão constitui um estágio; os clientes passíveis de serem atendidos pelo caminhão em cada viagem constituem os estados; e as viagens propriamente ditas representam as decisões. O ADC utiliza como critério de otimização a minimização da soma dos tempos das viagens vazias e de espera em filas nos pontos de produção e/ou nos clientes. Devido ao fato de que o ADC é executado sucessivamente para um caminhão atrás do outro, a ordem em que os caminhões são designados é fundamental para os resultados globais do ADC. Para este ordenamento são previstas várias opções, sendo esta a única fase do SPT em que são empregadas regras heurísticas: 1) ordenar aleatoriamente; 2) ordenar pelos proprietários dos caminhões de maneira a não beneficiar nenhum deles com respeito aos outros, observando uma proporcionalidade com o número de caminhões que cada proprietário possui; 3) ordenar arbitrariamente os caminhões em função dos antecedentes de responsabilidade, pontualidade, e outros critérios que somente os planejadores do transporte principal das empresas florestais conhecem. Os benefícios do SPT para as empresas florestais podem ser divididos em dois grupos: 1) o AMT minimiza globalmente a soma dos custos totais pagos pelo transporte; e 2) o ADC, ao reduzir a ociosidade de cada um dos caminhões da frota, aumenta sua rentabilidade e constitui-se em uma importante ferramenta para uma renegociação dos preços pagos pelo transporte florestal, que oscilam, atualmente, entre R\$ 3,14 e 8,42 /t.

ABSTRACT

At present work, a Transportation Scheduling System (TSS) of forest multi-products was developed. The main objective of the TSS was the minimization of the transportation costs actually paid by the forest enterprises. The TSS entities are the production points, the customers and the trucks. The mutability in the time is a characteristic of the production points localization; the cutting sites were translated periodically to other places in the same stand, affecting all the distances that may be utilized to transport the forest products produced in the stand. A manner encountered to simplifying this distances changes were the utilization of quadrants determined with some criteria. The quadrant can be defined as an area that can be perfectly localized in maps and at terrain, homogeneous in its assessment conditions, traffic, roads, etc., so that it can be assumed that all the inner points of a quadrant are at the same distance (or travel time) of any other quadrant. This way the distance- and cost-matrix may not be actualized every time a production point changes his location at the terrain. The TSS is composed of two modules, each one with a specific routine or algorithm. The first module has as finality the global minimization of the sum of the transportation costs corresponding to the loaded trips of all contracted trucks of the fleet. For the minimization an Operations Research technique called Transportation Method was utilized. This method is a special case of the Simplex Method and its solution is encountered in the Transportation Method Algorithm (TMA). This TMA, after executed separately for each forest product, indicated the optimum quantities of each product that may be transported from each production point to each customer, so that the sum of the total transportation costs attains a minimum. The second module has as finality the entire trip scheduling for each contracted truck of the fleet. The Trucks Designation Algorithm (TDA) uses Dynamic Programming and is executed separately for each truck of the fleet. Each trip of a truck constitutes a stage; the customers that can be served by the truck in each trip constitute the states in a specified stage; and the trips represent the decisions. The TDA uses as optimization criterion the minimization of the sum of unloaded trips times and queuing times at the production points or/and at the customers. Due to the fact that the TDA is successively executed for each truck after the other, the order, which the trucks are designed, is fundamental for the global results of the TDA. For this ordering, some options were considered, and this is the only step where the TSS uses heuristic rules: 1) randomly ordering; 2) ordering by the truck owners so that no owner results benefited with respect to any other truck owner, considering the number of trucks that each truck owner posses; 3) arbitrary ordering considering the previous responsibility, punctuality, and other criteria that are only known by the transportation managers of the forest enterprises. The benefits of the TSS can be divided into two groups: 1) the TMA minimizes globally the sum of the total costs paid for the forest products transportation; and 2) the TDA, reducing the idleness of each truck and incrementing consequently its efficiency, offer an important negotiation tool to force a decreasing process in the prices paid for the forest transport, which today oscillate between R\$ 3,14 and 8,42 /t.

1 INTRODUÇÃO

O planejamento do uso do recurso de uma empresa florestal, de maneira a atender os objetivos do empresário, satisfazendo restrições biológicas, legais, sociais, éticas e de mercado, é um aspecto problemático a ser resolvido pelos administradores da produção. Depende principalmente do objetivo da empresa florestal, o que vai influenciar em todas as considerações econômicas e nas medidas técnicas como, por exemplo, a seleção das essências florestais, a densidade de plantação, os cuidados intermediários, os métodos de desbaste e a determinação da rotação. Este objetivo não é absoluto e definitivo ou resultado de pura lógica. É uma decisão subordinada às tendências humanas, influenciadas em diferente grau pelos sentimentos de obrigação ética, considerações políticas, oportunidades do mercado, dentre outros vários fatores. Com frequência se diz que não existe um único objetivo; há muitos objetivos combinando os vários elementos de decisão (SPEIDEL, 1966).

Os administradores de empresas se defrontam com o problema de combinar eficientemente os fatores da produção: trabalho, capital e recursos naturais. Na empresa florestal, esta combinação depende principalmente das decisões com respeito a onde, quando e quanto cortar na floresta para atingir os objetivos propostos (YOSHIMOTO *et al.*, 1994; WARE e CLUTTER, 1971; LOUCKS, 1964). Várias dificuldades tornam estas decisões particularmente complexas, dentre elas se destacam: 1) o longo prazo que caracteriza o planejamento do processo produtivo florestal e introduz um grau significativo de incerteza sobre as futuras condições econômicas e biológicas; e 2) o número essencialmente ilimitado de regimes de manejo possíveis.

O manejo florestal baseia-se em critérios inerentes à floresta, como densidade, incrementos corrente e médio, valor econômico, dentre outros, o que é extremamente correto se se pensa em maximizar a produção ou o valor econômico da floresta em pé, mas de nada serve ter uma floresta produtiva bem manejada longe dos centros de consumo ou com dificuldades consideráveis de acesso. O manejo florestal deste tipo de florestas produtivas não pode, nem deve, desconsiderar o ciclo completo que a matéria-prima florestal percorre: plantio, crescimento, podas e/ou desbastes, corte final, transporte e industrialização.

Nas empresas verticalizadas é comum o objetivo de minimizar os custos no setor de produção primária. Nessas empresas os lucros a serem maximizados são os provenientes da venda do produto industrializado e a madeira entra como matéria-prima representando custos no processo e fabricação (SANQUETTA *et al.*, 1997). O planejamento de todas as atividades neste tipo de empresas é fundamental. Por outro lado, nas empresas produtoras exclusivamente de matéria-prima com escasso valor agregado, geralmente são maximizados os benefícios econômicos da produção da madeira, o que igualmente implica, no curto prazo, uma minimização dos custos.

O transporte da madeira desde o local onde as árvores são abatidas até as indústrias florestais pode ser dividido em duas fases: 1) transporte primário ou baldeio, com máquinas especializadas, desde o local de corte das árvores até pátios intermediários situados nas margens das estradas trafegáveis por caminhões, e 2) transporte secundário ou principal, geralmente através de caminhões, desde estes últimos pátios até as indústrias. Neste contexto, o transporte principal da madeira representa a última etapa do processo produtivo da matéria-prima florestal. Dele dependem a chegada das toras às indústrias ou aos clientes e, conseqüentemente, o retorno econômico na forma de pagamento. Em uma relação produtor-

cliente, a quantidade, a qualidade, e principalmente o cumprimento dos prazos de entrega são fatores determinantes para a concretização da operação.

Dentre os custos da madeira como matéria-prima do setor florestal destaca-se o custo do transporte principal, definido como o transporte da madeira colocada na margem das estradas até os locais de aproveitamento comercial, e denominado também de transporte secundário quando referido em termos de seqüência de operações (SEIXAS, 1992).

O custo de transporte principal da madeira atinge até 44% do custo total de abastecimento das principais indústrias florestais do Chile (WEINTRAUB *et al.*, 1996). Nos Estados Unidos, o custo de transporte chega a atingir entre 50 e 60 % do custo total da madeira posto fábrica (SEIXAS, 1992). De maneira geral, as empresas florestais do Brasil não fogem desta situação. O custo do transporte de madeira de florestas implantadas varia entre 38 e 66 % do custo final de aquisição da madeira, posto fábrica, para distâncias médias variando entre 45 e 240 km, respectivamente (Champion¹, 1983; Duraflora², 1984; Salmeron³, 1984; citados por SEIXAS e WIDMER, 1993), superando em algumas ocasiões o próprio valor da madeira em pé. Para ilustrar esta última situação BALLONI (1997) destaca que do custo de produção do papel de imprensa no Paraná, 3,7 % correspondem à madeira em pé e 7,2 % às atividades de colheita e frete.

No transporte florestal principal as decisões a serem tomadas devem ser precisas e principalmente céleres. O planejamento de cada viagem, incluindo ponto de produção, cliente, tipo de produto a ser transportado, horários de partida e de chegada e rotas a serem utilizadas,

¹ CHAMPION PAPEL E CELULOSE S.A., 1993. **Encontro sobre abastecimento de madeira**. Mogi-Guaçu. 1v. (não publicado).

² DURAFLORA SILVICULTURA E COMÉRCIO Ltda., 1984. **Sistema de exploração na Duraflora**. Lençóis Paulista. 1v. (não publicado).

³ SALMERON, A. **Exploração e abastecimento de madeira na RIPASA S. A. Celulose e papel**. Americana, Ripasa Florestal, s.d. 30 p.

deve ser realizado respeitando as restrições impostas pelos tipos de caminhos e caminhões, os horários de trabalho nos pontos de produção e nos clientes, as paradas necessárias para refeição dos motoristas e levando em consideração principalmente as viagens dos outros caminhões de maneira a evitar filas nos pontos de produção e/ou nos clientes e congestionamentos nas rotas. O planejamento deve ser reformulado dia-a-dia. Quando ocorrem exceções, as decisões devem ser reformuladas e tomadas inclusive hora-a-hora.

Embora a experiência adquirida seja cada vez maior, não existe ainda um projeto integrador que articule convenientemente os plantios, os desbastes, os cortes finais e o transporte da madeira. O planejamento de cada uma das atividades baseia-se em critérios puramente técnicos, quando não intuitivos, e é praticamente independente do planejamento das outras atividades. O uso de critérios puramente técnicos, na maioria das vezes, não permite ao administrador florestal decidir sobre a alternativa mais apropriada de condução da floresta, já que a produção varia com o sítio e a espécie (SCHNEIDER *et al.*, 1991), e nem sempre são rentáveis alguns dos métodos de produção, embora sejam tecnicamente corretos.

Segundo BALLONI (1997), a trajetória do setor florestal nos últimos trinta anos pode ser resumida nas seguintes três fases:

- Fase 1: Geração de lucros com o ato de reflorestar, correspondente a época de incentivos fiscais para reflorestamentos a partir de meados da década de '60;
- Fase 2: Incremento da produtividade florestal a qualquer custo, sem levar em consideração a sustentabilidade do negócio, na década de '80; e,
- Fase 3: Gestão de negócio auto-sustentável. Esta etapa está em plena vigência atualmente e origina uma necessidade de incrementar a eficiência de todo o processo produtivo florestal, desde o plantio até o transporte florestal principal.

A quantidade de fatores que devem ser considerados no planejamento do transporte florestal principal possibilita a aplicação da Pesquisa Operacional quando se pensa em utilizar eficientemente os recursos que anualmente são destinados à atividade. É fácil compreender as enormes dificuldades que se apresentam aos administradores na hora de tomar decisões, levando-os de maneira não pouco freqüente a escolher alternativas questionáveis do ponto de vista técnico e econômico.

1.1 OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho foi desenvolver um Sistema de Programação do Transporte (SPT) principal de multiprodutos florestais que auxilie aos administradores dos recursos a tomarem decisões operacionais e estratégicas eficientes.

A eficiência pode ser obtida com uma redução nos custos de transporte principal ou um aumento da capacidade de transporte com a mesma frota de veículos. O SPT deverá permitir minimizar os custos pagos pelo transporte principal terceirizado em uma situação de diversas e mutáveis localizações dos pontos de produção da matéria-prima e dos clientes, atendendo as diferentes alternativas de rotas para o transporte principal e as restrições habituais impostas pelos tipos de veículos e estradas e pelos proprietários dos veículos de transporte.

Os objetivos complementares são:

- determinar o conjunto de regras heurísticas que caracterizem o transporte principal de multiprodutos florestais; e,

- identificar aspectos críticos do atual sistema de programação do transporte principal e formular pautas ou critérios alternativos visando reduzir seus efeitos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 MODELOS DE PLANEJAMENTO FLORESTAL

Segundo NEWNHAM (1975) podem ser reconhecidos quatro tipos de modelos de planejamento no manejo florestal:

1. modelos detalhados: utilizados para máquinas individuais ou grupos de máquinas;
2. modelos de manejo: destinados ao planejamento da ordem em que os povoamentos serão desbastados, cortados, e ao planejamento da construção de estradas;
3. modelos de operações: têm por objetivo a alocação de máquinas, equipamentos, capacidade de trabalho e recursos de madeira disponíveis de maneira que seja minimizado o custo de fornecimento (abastecimento) no menor tempo possível; e,
4. modelos econométricos: utilizados para projetar o suprimento e o consumo de produtos manufaturados.

O presente trabalho pode ser considerado como pertencente ao grupo dos modelos de operações, visto que o objetivo aqui proposto é desenvolver um Sistema de Programação que auxilie na tomada de decisões operacionais e estratégicas relativas ao transporte florestal principal .

2.2 PESQUISA OPERACIONAL

O planejamento do transporte florestal principal requer decisões racionais levando em consideração a disponibilidade de veículos, os produtos a serem transportados, as rotas a serem utilizadas, os horários de trabalho dos caminhões, pontos de produção e clientes, a existência de mais de um veículo nos pontos de produção ou clientes, dentre vários outros tópicos. Todas estas variáveis, e as relações existentes entre elas, constituem um sistema.

Os modelos, que são representações abstratas de situações reais (DYKSTRA, 1984), são úteis na administração florestal, quando bem construídos, validados e aplicados, para tomar decisões com conseqüências previsíveis. Com o auxílio dos modelos podem ser realizadas em laboratório experiências sobre situações quase impossíveis de obter na floresta real. Alguns dos primeiros modelos de sistemas, e os métodos para resolvê-los, surgiram durante a Segunda Guerra Mundial, para planejar operações militares (TAHA, 1994; BUONGIORNO e GILLESS, 1987). Apareceram assim uma série de ferramentas enquadradas na área de conhecimento de Pesquisa Operacional (PO).

Segundo TAHA (1994), a PO aspira determinar o melhor curso de ação (ótimo) de um problema de decisão com restrição de recursos limitados. O termo *Pesquisa Operacional* está associado em geral, e quase exclusivamente, com a aplicação de técnicas matemáticas a problemas de decisão, representados e analisados por meio de modelos. Embora os modelos matemáticos representem a base para a PO, o trabalho consiste mais em resolver um problema do que em construir e resolver modelos matemáticos. Os problemas de decisão incluem, com freqüência, fatores intangíveis para o planejador, tais como condições econômicas de mercado e variações ambientais. Para poder representar estes fatores em termos de modelos matemáticos se requer uma grande habilidade por parte do planejador.

2.3 APLICAÇÕES DA PESQUISA OPERACIONAL AO TRANSPORTE

2.3.1 O problema do roteamento de veículos com janelas de tempo

Segundo RONEN (1988), entende-se por programação (*scheduling*), o planejamento do tempo em que ocorrerão cada um dos eventos da rota de um determinado veículo, e por roteamento ou roteirização (*routing*), o planejamento da rota que será utilizada pelo veículo.

A literatura coincide em denominar certos tipos de problemas como problema de roteamento de veículos com janelas de tempo (PRVJT)⁴. Este tipo de problema pode ser formulado, segundo BRAMEL e SIMCHI-LEVI (1997), como: um conjunto de clientes dispersos em uma região geográfica que devem ser atendidos por uma frota de veículos inicialmente localizados em um depósito. Cada cliente requer uma quantidade de produto que deve ser atendida e é especificado um período de tempo, chamado de *janela de tempo*, no qual o abastecimento deve acontecer. O volume total transportado em cada veículo não pode superar sua capacidade de carga. O objetivo é determinar a série de rotas para os veículos, onde cada rota começa e termina no depósito, que satisfaz as quantidades demandadas dos clientes sem violar as capacidades de carga dos veículos nem as janelas de tempo dos clientes, minimizando o comprimento total das rotas.

⁴ Mais conhecido na literatura internacional como *Vehicle routing problem with time windows* (VRPTW).

Em função de que este tipo de problemas é *NP-hard*⁵ a maioria das pesquisas foram direcionadas ao estudo de heurísticas (WEINTRAUB *et al.*, 1994, BRAMEL e SIMCHILEVI, 1997; KOHL e MADSEN, 1997). Uma heurística é um conjunto de regras e métodos que visam à descoberta, à invenção ou à resolução de problemas.

Um resumo das técnicas já empregadas para solucionar PRVJT pode ser encontrado no trabalho de Solomon e Desrosiers⁶ (1988), citados por FISHER *et al.* (1997). As abordagens disponíveis na literatura referentes a este tipo de problemas, segundo FISHER *et al.* (1997), podem ser divididas em:

- (1) Abordagens baseadas na Programação Dinâmica. Esta linha de pesquisa foi seguida por Kolen *et al.*⁷ (1987), citados por FISHER *et al.* (1997), e pode ser considerada como uma extensão do método da relaxação estado-espço de CHRISTOFIDES *et al.* (1981) para problemas com janelas de tempo. Foram resolvidos problemas com até 15 clientes com otimalidade.
- (2) Abordagens baseadas na geração de colunas. Nesta classe, DESROCHERS *et al.* (1992) apresentam um método exato com capacidade para resolver problemas com algumas centenas de clientes. O algoritmo é baseado na combinação do relaxamento da Programação Linear com a geração de colunas. Atualmente esta é a melhor abordagem.

⁵ Denominação que significa *Non Polynomial-hard* e indica que a solução do problema não é atingida com um número polinômico de cálculos e conseqüentemente o requerimento de memória de computador cresce exponencialmente com o aumento do tamanho do problema

⁶ SOLOMON, M. M. e DESROSIERS, J., 1988. Time window constrained routing and scheduling problems. **Trans. Sci.** 22: 1-13.

⁷ KOLEN, A. W. J., RINOOY KAN, A. H. G. e TRIENEKENS, H. W. J. M., 1987. Vehicle routing with time windows. **Opns. Res.** 35: 266-273.

- (3) Métodos baseados na decomposição lagrangeana. Jörnsten *et al.*⁸ (1986), Madsen (1988⁹, 1990¹⁰) e Halse¹¹ (1992), citados por FISHER *et al.* (1997) aplicaram vários esquemas de decomposição lagrangeana ao PRVJT com a finalidade de produzir limites inferiores. Atualmente as soluções encontradas são capazes de resolver problemas com uma centena de clientes de maneira ótima utilizando uma combinação de decomposição lagrangeana e *branch-and-bound*.
- (4) Métodos K-tree. FISHER (1994), ampliou o método 1-tree para o K-tree para o clássico problema PRVJT. Não foram ainda reportados resultados computacionais de sua utilização.

Os métodos desenvolvidos para resolver os problemas de roteamento de veículos chegam inclusive a considerar variações estocásticas nas quantidades demandadas. Desta maneira BERTSIMAS (1992) obteve os limites inferior e superior para problemas de roteamento de veículos, e a estratégia de re-otimização, na qual é encontrada a rota ótima a cada momento.

⁸ JÖRNSTEN, K.; NÄSBERG, M. e SMEDS, P., 1985. **A new Lagrangean Approach to some mathematical programming models**. Report LITH-MAT-85-04, Dep. of Math., Linköping Inst. of Tech., Sweden.

⁹ MADSEN, O. G. B., 1988. **Variable splitting and vehicle routing problems with time windows**. Preprint IB/1988. IMSOR, The Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.

¹⁰ MADSEN, O. G. B., 1990. **Lagrangean relaxation and vehicle routing**. Working paper. IMSOR, The Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.

¹¹ HALSE, K., 1992. **Modeling and solving complex vehicle routing problems**. Ph.D. Dissertation. IMSOR, The Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.

2.3.2 O transporte através de uma frota de caminhões

Segundo RONEN (1988), a roteirização e a programação de caminhões é diferenciada da roteirização e a programação de outros tipos de veículos. Nesse contexto podem ser diferenciados: 1) o transporte de passageiros (ônibus, táxis, etc.), 2) as operações de reparações e serviços (auxílio mecânico, coleta de lixo, etc.), e 3) a roteirização e programação de caminhões.

A grande variedade de problemas de roteirização e programação de caminhões requer um esquema para classificá-los em diferentes categorias. A seguir é apresentado um esquema proposto por RONEN (1988) direcionado aos problemas de roteirização e programação de caminhões (é assumido que as capacidades de carga dos caminhões possuem restrições por peso e por volume):

- (1) Tamanho da frota.
 - (a) Um caminhão;
 - (b) Mais que um caminhão.
- (2) Características físicas da frota.
 - (a) Caminhões idênticos;
 - (b) Diferentes tipos de caminhões.
- (3) Estrutura de custos da frota.
 - (a) Custos idênticos para todos os caminhões;
 - (b) Custos diferentes (mas com a mesma estrutura);
 - (c) Estruturas diferentes de custos.
- (4) Componentes do custo.
 - (a) Custo estabelecido por rota;
 - (b) Custo estabelecido pelo proprietário;
- (5) Número de depósitos (garagens) para os caminhões.
 - (a) Um depósito;
 - (b) Mais de um depósito.

- (6) Natureza das quantidades demandadas.
- (a) Determinística;
 - (b) Quantidade demandada de tamanho estocástico;
 - (c) Quantidade demandada de ocorrência estocástica;
 - (d) É permitida a satisfação parcial de certas quantidades demandadas.
- (7) Tipo de operação.
- (a) Somente descarga;
 - (b) Somente carga;
 - (c) Carga e descarga sequenciais (descarregar antes de carregar, ou vice-versa);
 - (d) Carga e descarga misturadas.
- (8) Número de viagens por caminhão para o período de planejamento.
- (a) Uma viagem;
 - (b) Mais de uma viagem;
 - (c) Uma viagem é mais extensa do que o período de planejamento.
- (9) Tempo por rota dos caminhões.
- (a) Limitado (mesmo limite para todos os caminhões);
 - (b) Limitado (limites diferentes para cada caminhão);
 - (c) Ilimitado.
- (10) Rede viária.
- (a) Direcionada;
 - (b) Não direcionada;
 - (c) Mista.
- (11) Distâncias e tempos.
- (a) Medidos (tabelados);
 - (b) Estimados;
 - (c) Medidos + estimados;
 - (d) Estocásticos.
- (12) Objetivo.
- (a) Minimização de custos;
 - (b) Minimização de distâncias ou tempos;
 - (c) Minimização do número de caminhões utilizados;
 - (d) Maximização do lucro (ou da renda bruta);
 - (e) Equilibrar o trabalho dos caminhões;
 - (f) Minimização da utilização dos caminhões terceirizados;
 - (g) Minimização do risco.

As categorias mencionadas acima não são nem exaustivas nem mutuamente exclusivas.

Cada situação específica poderá ter algumas características particulares adicionais, como:

- (1) Janelas de tempo para as descargas;
- (2) Diferentes fontes para um pedido;
- (3) Custos do produto diferentes por fonte;
- (4) Múltiplos tipos de produtos;
- (5) Caminhões com compartimentos separados para transportar produtos diferentes;
- (6) Tempos de carga e descarga como função das carregadeiras e do tamanho do caminhão;
- (7) Origens sem caminhões;
- (8) Divisão de ordens de transporte entre caminhões;
- (9) Divisão de ordens de transporte entre origens;
- (10) Falta de produto em determinadas origens;
- (11) Congestionamento das rotas em certos horários;
- (12) Velocidades dos caminhões dependendo do tipo de estrada;
- (13) Estradas com diferentes limites de peso por eixo;
- (14) Transbordo de carga entre caminhões (pontos satélite de distribuição);
- (15) Sequência forçada de viagens e/ou caminhões;
- (16) Caminhões que não retornam à sua origem;
- (17) Providenciar trabalho suficiente para os caminhões terceirizados;
- (18) Condições especiais de trabalho para os caminhões terceirizados;
- (19) Compatibilidade entre o caminhão e a ordem de transporte;
- (20) Compatibilidade entre o caminhão e a origem e/ou o destino;
- (21) Motoristas com função de caixas;
- (22) Rotas coordenadas;
- (23) Utilização tipo *tudo* ou *nada* dos caminhões;
- (24) Entregas programadas.

Esta lista de características particulares adicionais é completamente abrangente e cobre a maioria dos problemas práticos da roteirização de caminhões (RONEN, 1988).

2.3.3 Os modelos para o transporte de produtos agropecuários e florestais

CARNIERI *et al.* (1983) desenvolveram um Programa Integrado para o transporte de soja para uma central de cooperativas do estado do Paraná, Brasil. O programa computacional utiliza uma matriz de vendas, uma matriz de custos, o Método Simplex para Transportes e um algoritmo confeccionado para o caso. Entende-se por algoritmo um procedimento de cálculo

expresso por símbolos ou regras. Na área da informática um algoritmo é um conjunto de instruções para realizar um cálculo ou operação.

Os resultados obtidos foram relevantes: até 15 % de redução nos custos totais como consequência da aplicação do programa. O Programa também sugere a maneira como os benefícios resultantes podem ser divididos entre as cooperativas participantes, em função do volume de vendas de cada uma.

JONES *et al.* (1986) comparam quatro procedimentos analíticos genéricos para integrar o manejo da terra e o planejamento do transporte em áreas florestais nos estados de Montana e Idaho, nos EUA. Os procedimentos analisados variaram no que se refere à possibilidade de construção de caminhos, acessos às áreas florestais e colheita de produtos florestais. Um dos procedimentos considerados foi a otimização através da seleção simultânea das áreas a serem cortadas e dos caminhos a serem construídos. Esta opção gerou benefícios bastante consideráveis.

Para uma indústria florestal no sul do Chile, foi desenvolvido, no ano 1982 por BARROS e WEINTRAUB, um modelo que considera aspectos tecnológicos, geográficos, silviculturais e econômicos do planejamento e fornece linhas orientadoras para a administração das florestas, o abastecimento de madeira para uma planta de celulose e uma serraria, e as necessidades de compra ou venda de madeira. Os critérios utilizados na determinação dos povoamentos homogêneos, necessários para a prescrição dos tratamentos silviculturais, foram baseados principalmente na idade das plantações, na localização dos sítios e na qualidade dos mesmos.

Analisando a alocação ótima de recursos para o combate de incêndios florestais, KOURTZ (1988) desenvolveu dois algoritmos de PD que resolvem, respectivamente, a alocação dos aviões hidrantes e das equipes de bombeiros florestais transportadas com

helicópteros. O algoritmo de alocação dos aviões hidrantes foi formulado como um “problema da mochila” e o algoritmo de alocação das equipes de bombeiros possui uma formulação mais genérica.

O “problema da mochila” (*knapsack problem*), conhecido também como o “problema do carregamento” (TAHA, 1994), pode ser resumido como segue: deseja-se carregar uma mochila (veículo) de capacidade limitada com N artigos, sendo que cada unidade do artigo i possui um peso p_i e um valor v_i ($i = 1, 2, \dots, N$); requer-se determinar a carga mais valiosa que possa carregar a mochila (veículo) sem exceder sua capacidade de peso.

Segundo KOURTZ (1988) o mesmo problema já havia sido estudado através de outras técnicas, dentre as quais podem ser citadas um modelo altamente teórico desenvolvido por Parks¹² em 1964, as modificações realizadas a este modelo por McMasters¹³ em 1966 e PARLAR e VICKSON em 1982, e um sistema desenvolvido por Tolin¹⁴ *et al.* em 1969 que utiliza uma rede com arcos e nós representando estradas, interseção de estradas e depósitos de equipamentos e víveres.

Em 1990 foi desenvolvido no Departamento de Engenharia Industrial da Universidade do Chile o programa ASICAM (ASIgnador de CAMiones - designador de caminhões) e a eficiência operacional de sua implementação nas principais empresas florestais do sul do Chile foi de 10 a 30 % medida na redução do custo de transporte principal ou no aumento da capacidade de carga com a mesma frota (WEINTRAUB *et al.*, 1990, 1996; SCHILKRUT e WURMANN, 1993). O programa, que na verdade é um modelo de simulação, se baseia em

¹² PARKS, G. M., 1964. Development and application of a model for suppression of forest fires. **Manage. Sci.** **10**: 760-766.

¹³ McMASTERS, A. W., 1966. **Wildland fire control with limited suppression forces**. Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley.

¹⁴ TOLIN, E. T.; DAVIS, J. B. e MANDT, C., 1969. Automated forest fire dispatching: a progress report. **Fire Technol.** **5(2)**: 122-129.

regras heurísticas de designação para garantir a regularidade nas entregas e estabelecer as prioridades de abastecimento dos clientes segundo critérios de estoque crítico e penalizações por congestionamentos nas origens e nas rotas de transporte. Adicionalmente o sistema contempla a equidade das rendas dos proprietários dos caminhões na hora de designar cada um deles.

SCHILKRUT e WURMANN em 1993, analisando o mesmo problema de transporte principal de multiprodutos florestais no Chile, utilizaram métodos matemáticos de otimização contribuindo com novas ferramentas para aumentar a competitividade e a produtividade das empresas do setor florestal. O problema principal foi dividido em dois subproblemas. O primeiro foi a determinação das viagens necessárias para transportar os diferentes produtos de maneira de satisfazer as quantidades demandadas. Este subproblema foi tratado como uma multiredes de transporte. O segundo subproblema consistiu na programação dos veículos para realizar todas as viagens determinadas no primeiro subproblema ao menor custo possível. A aplicação deste tipo de método matemático gerou, para um caso de 41 origens, 12 destinos, 15 tipos de produtos e 3 classes de caminhões, mais de 37.500 variáveis e 8.000 restrições.

SEIXAS e WIDMER (1993) apresentaram um método que permite, em uma situação de diversas origens e um único destino, análises quanto às diferentes opções de veículos, desempenhos, tempos terminais de carga e descarga, comprimento de vias, etc. Os resultados mostram a adequação econômica de veículos pesados tipo “treminhão” e “rodotrem” desde que a rede viária esteja em condições adequadas, e também que variações de 2% nas velocidades causaram a substituição de veículos em alguns trechos.

As soluções para o problema de transporte florestal principal atingem inclusive modelos que funcionam em tempo real, próprios dos serviços de emergência como ambulâncias e bombeiros. RÖNNQVIST e RYAN (1997) desenvolveram na Nova Zelândia

um modelo que garante respostas em tempo real e ao mesmo tempo é capaz de gerar grades horárias de trabalho de alta qualidade. O modelo combina a Programação Linear Inteira com algumas técnicas heurísticas de otimização.

2.3.4 O transporte de outros produtos e outras aplicações de transporte

A otimização do transporte vem sendo amplamente estudada e aplicada ao transporte de uma variedade muito grande de produtos, dentre os quais merecem destaque o petróleo e seus derivados (BAUSCH *et al.*, 1995; RUSSEL e CHALLINOR, 1988), jornais e periódicos (GOLDEN *et al.*, 1977), e substâncias perigosas (BEROGGI e WALLACE, 1995), minérios (Soumis *et al.*¹⁵, 1989; Weintraub *et al.*¹⁶ 1987; citados por WEINTRAUB *et al.*, 1996).

Além do transporte específico de produtos, as técnicas de otimização de transporte foram empregadas no setor de serviços, merecendo destaque o controle do tráfego aéreo (TERRAB e ODONI, 1993) e urbano (BIELLI *et al.*, 1991; BULLOK *et al.*, 1993), o transporte escolar (BOWERMAN *et al.*, 1995; ZAMBONI, 1997), e a roteirização dos carteiros (BERTHOLDI COSTA, 1997).

Segundo WATERS e BRODIE (1987), ao descrever os algoritmos dos problemas de roteirização é usualmente enfatizado o tamanho do problema que pode ser resolvido, sem mencionar muitas vezes o tempo de processamento e o tipo de computador utilizado. Para

¹⁵ SOUMIS, F.; ETHIER, J. e ELBROND, J., 1989. Evaluation of the new truck dispatching procedure in the Mount Wright mine. **Transactions of APCOM XXII, International Symposia on Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industries**, Society of Mining Engineers, 674-682.

¹⁶ WEINTRAUB, A.; BARROS, L.; MAGENDZO, A.; IBARRA, F. e ORTIZ, C., 1987. A truck dispatching system for a large open pit mine. **Operational Research '87**, Ed. Graham Rand, North Holland, New York: 650-662.

alguns problemas complexos os métodos de otimização não geram soluções eficientes quando o volume de dados é muito grande (ROBUSTÉ *et al.*, 1990). Os grandes problemas deste tipo (denominados *NP-hard* na literatura de otimização) são tipicamente resolvidos com heurísticas, as quais garantem uma solução boa, mas não ótima. Uma determinação heurística de ponderações para modelos de colheita florestal, nos quais foram empregados algoritmos de Programação de Objetivos (*Goal Programming*), foi utilizada por HOTVEDT *et al.* em 1982. As vantagens mencionadas por estes autores são a simplicidade de compreensão do procedimento e o requerimento mínimo de capacitação técnica e de tempo por parte dos administradores na tomada de decisões.

Uma heurística precisa ser testada, e conseqüentemente sua eficiência não pode ser estabelecida sem gastar muito tempo e recursos de pesquisa (ROBUSTÉ *et al.*, 1990). Além disso, quanto maior for o tamanho do problema, maior é a dificuldade de encontrar heurísticas apropriadas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 DADOS UTILIZADOS

Os dados utilizados para o desenvolvimento do Sistema de Programação do Transporte (SPT) são os gerados pela rede de transporte da empresa Pisa Florestal S.A. A rede compõe-se de aproximadamente 50 origens (pontos de produção), 80 clientes e 70 caminhões terceirizados, distribuídos em áreas distantes no máximo 200 km em torno da planta industrial principal da empresa em Jaguariaíva-PR.

Os dados necessários à determinação das condições que caracterizam o transporte de multiprodutos florestais são os seguintes:

- tipos de produtos florestais: dimensões; restrições de transporte por classe de caminhão;
- pontos de produção: horários inicial e final diários das atividades; produção diária (m^3 /dia) e quantidade estocada (m^3) de cada tipo de produto florestal discriminada pelo tempo de armazenagem (dias); capacidade horária de carga da(s) carregadeira(s); condições de acesso;
- clientes: horários de início e finalização diários das atividades; quantidade demandada diária (m^3 /dia) e quantidade estocada (m^3 ; dias) de cada tipo de produto florestal; quantidades demandadas excepcionais fora da programação habitual; capacidade horária de descarga da(s) carregadeira(s); condições de acesso;

- caminhões: tipo de caminhão; capacidade de carga; tipos de caminhos pelos quais o caminhão pode transitar; horários de início e finalização diários das atividades; lugar de pernoite (garagem); restrições eventuais a respeito de áreas ou regiões impostas pelos proprietários;
- distâncias: devem ser conhecidas todas as distâncias reais entre os pontos de produção, os clientes e as garagens dos caminhões; e,
- tempos: os tempos necessários para percorrer as distâncias indicadas acima deverão considerar tanto o caminhão carregado quanto vazio, a estrada de asfalto e de terra, com e sem chuva e as condições de trafegabilidade.

Os tópicos pontos de produção, clientes e caminhões, serão considerados como as entidades do SPT, uma vez que são os pontos de produção que abastecem os clientes, e são os caminhões os responsáveis pelo abastecimento.

3.2 METODOLOGIA

Atualmente o custo pago pela empresa florestal aos proprietários dos veículos de transporte da frota terceirizada é aquele correspondente às viagens carregadas com madeira. O valor pago por unidade de volume depende das distâncias do percurso nos trechos de terra e de asfalto, das dificuldades da rota (serra, cascalho, tráfego, etc.), e de considerações subjetivas visando equilibrar a renda mensal recebida pelos proprietários dos caminhões. Surge, então, a necessidade de minimizar a soma destes custos de transporte principal pagos pela empresa. A maneira como são obtidos atualmente os valores dos custos unitários de

transporte principal não será discutida neste trabalho por se considerar que é responsabilidade da empresa florestal.

3.2.1 Utilização de quadrantes para a determinação das distâncias

O Sistema de Programação do Transporte (SPT) principal de multiprodutos florestais desenvolvido no presente trabalho contém uma série numerosa de entidades de localização física fixa tais como pontos de produção, clientes, entrepostos e garagens dos caminhões. As distâncias entre todas estas entidades tomadas duas a duas devem ser conhecidas, com exceção, é claro, das distâncias entre um cliente e outro, e entre um ponto de produção e outro, já que os caminhões nunca dividirão a carga entre dois ou mais pontos de produção e/ou clientes. Como os pontos de produção variam de localização física no tempo, (as frentes de corte de cada talhão vão se deslocando em função da existência do produto requerido, das quantidades destes requerimentos, das condições de acesso, dentre várias outras razões), o número de pontos de produção potenciais em cada talhão é elevado, e se for considerado o conjunto dos talhões este número de pontos de produção potenciais cresce de maneira significativa. Torna-se necessário, então, adotar um sistema ágil e eficiente para evitar ter que calcular, para cada ponto de produção potencial, todas as distâncias reais aos clientes e às garagens dos caminhões.

A opção de utilizar as distâncias euclidianas¹⁷ em vez das reais não se adapta a este tipo de problema, onde qualquer acidente geológico, topográfico ou hidrográfico pode duplicar, triplicar, ou incrementar até mais ainda a distância real com relação à distância euclidiana.

O quadrante pode ser definido como uma área perfeitamente localizada nos mapas e no terreno, homogênea no que se refere às condições de acesso, tráfego, caminhos, etc., de tal maneira que possa ser assumido que todos os pontos contidos no interior dele estão localizados à mesma distância (ou tempo de viagem) de qualquer um dos demais quadrantes. Não há necessidade de que os quadrantes tenham forma regular. É altamente conveniente que a delimitação dos quadrantes respeite, por exemplo, aspectos topográficos, divisões distritais e municipais, etc., além de levar em consideração aspectos práticos que somente são conhecidos por aqueles que no seu dia-a-dia percorrem a área de trabalho. No SPT os quadrantes serão tratados como variáveis qualitativas que permitirão associar cada entidade do sistema a um determinado quadrante. A determinação da rede de quadrantes será realizada pela Gerência de Transportes da empresa florestal para a qual foi desenvolvido o SPT com a finalidade de simplificar o cálculo das distâncias entre as entidades do SPT.

¹⁷ Distância em linha reta entre dois pontos. A distância euclidiana foi utilizada por BERTHOLDI (1997) e por ZAMBONI (1997) em aplicações urbanas, como os correios e o transporte escolar, respectivamente.

3.2.2 Unidade de transporte

Se a frota de caminhões fosse homogênea no que se refere às classes dos caminhões, ou seja, se todos os caminhões tivessem as mesmas capacidades de carga, seria factível a utilização dessa capacidade de carga como unidade de transporte. Esta abordagem apresenta vantagens para a implementação computacional do sistema. SCHILKRUT e WURMANN (1993) utilizam esta unidade de transporte e a denominam como a carga volumétrica que um caminhão pode transportar.

Para o caso de uma frota heterogênea de caminhões torna-se necessária a utilização de outro tipo de unidade de transporte. O inconveniente imediato que surge, então, é a seleção da unidade de transporte mais apropriada dentre todas as unidades de medida utilizadas no setor florestal. Para ilustrar este inconveniente basta mencionar que:

- (1) o volume da floresta em pé é expresso em metros cúbicos sólidos com casca (m^3);
- (2) nos pontos de produção o volume das toras cortadas é expresso em metros cúbicos estéreos (st), ou seja a madeira empilhada que couber em um cubo de 1 metro de lado;
- (3) a capacidade de carga dos caminhões é expressa geralmente em toneladas (t) ou em metros cúbicos estéreos (st); e
- (4) nos clientes o controle das entregas é feito utilizando uma balança, ou seja que as quantidades são medidas em unidades de peso, e geralmente é empregada a tonelada (t).

Para evitar disparidades foi incluído no SPT um Módulo de Conversão de Unidades (MCU) com a única finalidade de converter todas as unidades. Os fatores de conversão considerados foram fornecidos pela empresa florestal para a qual foi desenvolvido o SPT. Estes fatores de conversão são apresentados na Tabela 1.

TABELA 1: FATORES DE CONVERSÃO ENTRE UNIDADES DE VOLUME E PESO

Classe de DAP [cm]	Fatores de conversão (<i>Pinus spp.</i>)						
	m ³ / t	m ³ / st	t / st	t / m ³	st / m ³	st / t	m ³ / m ³ pf
18 – 24	0,93	0,64	0,69	1,08	1,56	1,45	1,04
25 – 34	0,91	0,65	0,72	1,10	1,54	1,39	1,07
35 – 44	0,92	0,72	0,78	1,09	1,39	1,28	1,08
> 45	0,92	0,77	0,84	1,09	1,30	1,19	1,10

Fonte: PISA Florestal (1997)

Referências: DAP: diâmetro transversal medido no fuste a 1,30 m desde o solo
 m³: metro cúbico
 t: tonelada
 m³pf: metro cúbico na ponta mais fina
 st: metro cúbico estéreo

Com o MCU cada entidade do SPT informará suas quantidades na maneira como é habitualmente feito e o SPT fará internamente a conversão das unidades. Desta maneira os pontos de produção atualizarão seus estoques em metros cúbicos estéreos, os clientes farão seus pedidos em toneladas ou em m³pf, e os caminhões transportarão toneladas.

3.2.3 Unidade de tempo e horizonte de planejamento

São poucos os clientes que realizam seus pedidos mensalmente com volumes e produtos indicados com uma adequada antecedência. A maior parte dos pedidos implica em produtos, volumes e principalmente prazos de entrega diferentes. Este fato ocasiona uma dificuldade considerável para estabelecer uma unidade de tempo e um horizonte de planejamento únicos para o Sistema de Programação do Transporte (SPT) principal de multiprodutos florestais.

Por isto, inicialmente se pensou em utilizar uma unidade de tempo semanal, quinzenal ou até mensal, com a finalidade de dimensionar a frota necessária de veículos, mas surgiu um dos clássicos inconvenientes das atividades florestais executadas na intempérie: a variabilidade

climática. A programação das viagens de cada um dos caminhões depende, dentre outros fatores, da velocidade do caminhão em cada trecho, das suas rotas e conseqüentemente das condições de tráfego dessas rotas, ou seja se o trecho é asfaltado ou é de terra; se o piso está seco ou molhado; se há outros caminhões bloqueando algum trecho em particular. As velocidades dos caminhões são um claro exemplo de como um dia de trabalho sem chuva pode ser completamente diferente do dia anterior ou do dia seguinte com chuva. Um planejamento semanal não pode supor quais serão as condições de tráfego ao longo da semana. Muito menos ainda um planejamento quinzenal ou mensal.

Surge, então, a necessidade de se utilizar o dia como unidade de tempo. Desta maneira a programação do transporte poderia ser planejada e realizada dia a dia, ou seja que o SPT rodaria diariamente para determinar a combinação ótima de viagens que cada caminhão deveria realizar em função das quantidades demandadas dos clientes, das quantidades ofertadas de cada tipo de produto florestal nos pontos de produção, das condições climáticas das diferentes sub-regiões e de eventuais imprevistos que viriam a ocorrer de um dia para outro. Aqueles imprevistos que ocorrerem no mesmo dia deverão ser resolvidos manualmente para evitar uma realocação de toda a frota de transporte principal, o que é operacionalmente impossível de ser implementado.

O inconveniente de se utilizar uma unidade diária de tempo se caracteriza pelo fato de que, durante a semana, os dias vão mudando no que se refere aos horários de trabalho. Os horários de funcionamento e operações são próprios de cada entidade do SPT (cliente, caminhão e ponto de produção), e devem obviamente ser considerados na programação das viagens que realizarão os caminhões. Por exemplo, há entidades que trabalham só durante o dia enquanto que outras já trabalham 24 hs em certos dias da semana, como é ilustrado na Tabela 2.

TABELA 2: EXEMPLO DA GRADE HORÁRIA SEMANAL DE TRABALHO PARA ALGUMAS ENTIDADES DO SPT.

	2ª feira	3ª feira	4ª feira	5ª feira	6ª feira	Sábado	Domingo
Hora de início	6:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	-
Hora de finalização	24:00	24:00	24:00	24:00	24:00	12:00	-
Horas de trabalho	18:00	24:00	24:00	24:00	24:00	12:00	-

Persiste, contudo, o inconveniente decorrente do fato de que nem todas as entidades do SPT utilizam uma mesma grade horária semanal de trabalho, o qual se resolve da seguinte maneira: mantendo o dia como unidade de tempo para a programação do SPT é utilizada a hora como base comum para realizar todos os cálculos. O volume remanescente de cada um dos pedidos será dividido pelo número de horas restantes para o término do prazo de entrega. Por exemplo, se faltasse entregar ao cliente j , 960 m^3 e o prazo restante para realizar essa entrega fosse de 10 dias, deveria ser calculado o número de horas úteis, isto é descontando os domingos e feriados, passível de ser destinado para a recepção da madeira. Se o cliente hipotético j que está sendo considerado possui, por exemplo, um regime de trabalho como o descrito na Tabela 2, então o número total de horas úteis por semana é de 126 hs, ou seja, os 10 dias restantes para o término do prazo de entrega significariam, supondo que o primeiro dia considerado fosse uma segunda feira e não existirem feriados no meio, $(126 + 18 + 24 + 24) = 192$ hs. Desta maneira as entregas deveriam ser realizadas na razão de $5 \text{ m}^3/\text{hora}$ ($960 \text{ m}^3 / 192$ hs). Esta razão é teórica. Na prática somente serão realizadas entregas que representem um volume compatível com a capacidade de carga do caminhão. Poderá haver uma pequena tolerância nos volumes transportados, mas é desejável não sub-utilizar os caminhões.

O passo imediato é a realização dos cálculos das entregas levando em consideração o dia da semana para o qual está sendo realizada a programação. Se o dia for uma segunda feira, por exemplo, a entrega horária de madeira deverá ser multiplicada por 18 (Tabela 2) para obter

o volume diário a ser entregue. Estes volumes diários que deveriam ser entregues ao cliente j durante os 10 dias programados são mostrados na Tabela 3.

TABELA 3: VOLUMES DIÁRIOS QUE DEVERIAM SER ENTREGUES AO CLIENTE HIPOTÉTICO j CONSIDERANDO UMA QUANTIDADE DEMANDADA DE 960 m³, UM PRAZO DE ENTREGA DE 10 DIAS, E A GRADE HORÁRIA SEMANAL DE TRABALHO APRESENTADA NA TABELA 2

2ª feira	3ª feira	4ª feira	5ª feira	6ª feira	Sábado	Domingo	2ª feira	3ª feira	4ª feira
90 m ³	120 m ³	120 m ³	120 m ³	120 m ³	60 m ³	-	90 m ³	120 m ³	120 m ³

Na Tabela 3, o volume de 90 m³ correspondente à segunda feira, por exemplo, poderá ter origem em um ou mais pontos de produção. O processo de otimização para a definição de quem abastece a quem é realizado pelo Algoritmo do Modelo de Transporte, visto em detalhe na seção 4.1.1.1 - Descrição do Algoritmo do Modelo de Transporte.

Após estimar as quantidades demandadas por hora para os pedidos vigentes da totalidade dos clientes em função do volume remanescente e dos dias restantes para o término do prazo de entrega, devem ser realizados os cálculos para determinar a quantidade total demandada por tipo de produto para o dia que está sendo programado o transporte principal. O fato de que estejam sendo considerados períodos de tempo maiores do que um dia para o cálculo das quantidades demandadas não implica que a programação seja realizada para esses períodos. O objetivo é apenas garantir a periodicidade das entregas, evitando que as quantidades demandadas de certos clientes sejam satisfeitas logo no início da semana em detrimento das quantidades demandadas dos outros clientes.

Um procedimento de cálculo análogo deverá ser utilizado para obter as quantidades diárias que serão ofertadas para cada tipo de produto florestal em cada ponto de produção.

Diante da eventualidade de não serem completadas as entregas programadas para um certo dia, simplesmente será considerada, para o cálculo das entregas do dia seguinte, exatamente o volume remanescente de cada um dos pedidos vigentes. É claro que as entregas diárias aumentarão para todos os dias seguintes se alguma entrega anterior não foi realizada ou foi realizada parcialmente.

Os modelos de operações, descritos no item 2.1 - Modelos de planejamento florestal, se caracterizam por considerar horizontes de planejamento relativamente reduzidos. Neste caso particular, como estão sendo avaliados simultaneamente todos os pedidos com prazos de entrega diferentes entre si, pode-se dizer que o horizonte de planejamento é flutuante e independente para cada pedido de matéria-prima. Este horizonte de planejamento pode variar, conforme o caso, desde um dia até um mês ou mais, se o pedido assim o indicar.

A unidade de tempo considerada para a programação do SPT é o dia. Todas os relatórios gerados pelo SPT referentes aos pontos de produção, produtos, volumes, clientes, caminhões, horários de saída e chegada e filas serão concernentes somente ao dia que está sendo programado. Eventualmente poderão ser realizadas simulações para períodos maiores do que um dia, mas o sistema deverá assumir neste caso que as condições climáticas permanecerão constantes, que as entregas do dia anterior foram todas elas efetivamente realizadas, que os caminhões e carregadeiras disponíveis serão os mesmos, ou seja, como se costuma resumir na ciência econômica, *ceteris paribus*.

3.2.4 Nomenclatura e simbologia adotadas

A seguir é apresentada uma lista com a nomenclatura e a simbologia que serão utilizadas repetidamente ao longo da parte restante do texto. Os nomes e símbolos, que seguem uma ordem alfabética, tentam quando possível caracterizar *per-se* as variáveis. Todas as variáveis que se referem a volumes, sejam eles ofertados, demandados ou transportados, estão expressas para um período de tempo de um dia, a menos que exista indicação contrária. As siglas AMT e ADC indicam, respectivamente, o Algoritmo do Modelo de Transporte e o Algoritmo de Designação dos Caminhões, explicados mais adiante no texto.

Δcc_l	: tolerância para a capacidade de carga do caminhão l
Δhf_l	: tolerância na hora de finalização das atividades de l
a_{pi}	: quantidade ofertada do produto p pelo ponto de produção i
b_{pj}	: quantidade demandada do produto p pelo cliente j
cc_i	: capacidade horária de carga do ponto de produção i
cc_l	: capacidade de carga do caminhão l
cd_j	: capacidade horária de descarga do cliente j
c_{ij}	: custo unitário de transporte desde o ponto de produção i até o cliente j
\bar{c}_{ij}	: ganho ou a perda relativa da variável não-básica x_{ij} na solução ótima (AMT)
D_{ij}	: quantidade demandada do cliente j por qualquer produto do ponto de produção i
D_{pij}	: quantidade demandada do cliente j pelo produto p do ponto de produção i
$EsqT$: variável que controla as esquinas na construção de um ciclo (ADC)
F	: variável temporária utilizada para registrar o menor tempo vazio acumulado
Gr_l	: garagem do caminhão l
hc	: hora de chegada do caminhão a alguma entidade do SPT (h_{ci} , h_{cj} , h_{cg})
hf	: hora de finalização das atividades de i , j ou l (hf_i , hf_j ou hf_l)
hi	: hora de início das atividades de i , j ou l (hi_i , hi_j ou hi_l)
hs	: hora de saída do caminhão desde alguma entidade do SPT (h_{si} , h_{sj} , h_{sg})
i	: ponto de produção
$i^{(k)}$: ponto de produção i no estágio k
i_{entra}	: variável binária que registra a linha i da variável que entrará na base (AMT)
j	: cliente
$j^{(k)}$: cliente j no estágio k
j_{util}	: variável binária que determina se existe algum cliente j potencial para ser designado
j_{entra}	: variável binária que registra a coluna j da variável que entrará na base (AMT)
k	: número de ordem na qual o cliente j é atendido (estágio)
l	: caminhão
L	: variável temporária utilizada para registrar o tempo total acumulado

N_{ij}	: número total de pontos de produção i da solução ótima que abastecem ao cliente j
N_{jl}	: número total de clientes j aos que o caminhão l pode levar madeira (ADC)
N_l	: número total de caminhões l disponíveis (ADC)
N_{pi}	: número total de pontos de produção i que produzem o produto j
N_{pij}	: número total de produtos p que o ponto de produção i fornece ao cliente j
N_{pj}	: número total de clientes j que requerem o produto p
Oc	: ociosidade (capacidade de carga insatisfeita)
p	: tipo de produto florestal
q	: quadrante de i, j ou da garagem de l (q_i, q_j ou q_{Grl})
tch_{ij}	: tempo de viagem cheio desde o ponto de produção i até o cliente j (ADC)
tc_{li}	: tempo de carga para o caminhão l no ponto de produção i (ADC)
td_{lj}	: tempo de descarga do caminhão l no cliente j (ADC)
tf_i	: tempo de espera em filas no ponto de produção i (ADC)
tf_j	: tempo de espera em filas no cliente j (ADC)
$ttac_{j(k)}$: tempo total acumulado até o cliente j no estágio k (ADC)
tv_{Grl_i}	: tempo de viagem vazio desde a garagem do caminhão l até o ponto de produção i
$tv_{j(k)Grl}$: tempo de viagem vazio desde o cliente j do estágio k até a garagem do caminhão l
$tv_{j(k-1)i(k)}$: tempo de viagem vazio desde o último cliente ($j_{(k-1)}$) até o ponto de produção $i_{(k)}$
tv_{jl}	: tempo de viagem vazio desde o cliente j até a garagem do caminhão l (ADC)
$tvmin_{j(k)}$: menor tempo vazio total acumulado até o cliente j no estágio k (ADC)
tv_{aux}	: variável temporária utilizada durante a procura do menor tempo vazio (ADC)
u_i	: variável utilizada para as restrições de disponibilidade do produto (AMT)
v_j	: variável utilizada para as restrições das quantidades demandadas (AMT)
Vt	: volume efetivamente transportado
x_{pij}	: quantidade de produto p que o ponto de produção i produz para o cliente j (AMT)
xb_{ij}	: variável binária $\{0, 1\}$ que indica se a variável x_{pij} é básica ou não (AMT)
X_{pij}	: quantidade acumulada do produto p do ponto de produção i entregue ao cliente j

3.2.5 A Programação Linear

O êxito de uma técnica da PO pode ser medido pela difusão de sua utilização como ferramenta para a tomada de decisões. A Programação Linear (PL) é, desde sua aparição no final da década de 1940, um dos métodos mais amplamente empregados na PO. Seu êxito contundente se deve principalmente à sua flexibilidade para descrever uma grande quantidade de situações reais nas seguintes áreas: militar, industrial, agrícola, florestal, de transporte, economia, de sistemas de saúde, e inclusive nas ciências sociais e do comportamento humano.

Um fator importante na ampla difusão desta técnica é a disponibilidade de programas de computador muito eficientes para resolver problemas extensos e complexos. A PL pode ser considerada como uma base para o desenvolvimento de outras técnicas da Pesquisa Operacional, incluídas a Programação Inteira, a Estocástica, a do Fluxo de Redes, a Quadrática, a Não-Linear, etc.

3.2.5.1 Modelo genérico de Programação Linear

Para desenvolver um método geral de solução, o problema de PL deve ser expresso em um modelo genérico, comum. As propriedades deste modelo genérico de PL são as seguintes, segundo TAHA (1994):

- (1) todas as restrições são equações com os segundos membros não-negativos;
- (2) todas as variáveis são não-negativas; e,
- (3) o objetivo pode ser a maximização ou a minimização; e,
- (4) todas as equações e a função objetivo são lineares.

Resta mostrar agora como qualquer problema de PL pode ser transformado no modelo genérico de PL. Para isso serão tratadas na seqüência as **restrições**, as **variáveis**, e a **função objetivo**.

As restrições: Uma restrição do tipo \leq ou \geq pode ser convertida em uma equação mediante a soma de uma variável de folga (ou a subtração de uma variável de excesso) ao primeiro

membro da restrição. O segundo membro da equação sempre pode ser tornado não-negativo multiplicando ambos os lados por -1 .

As variáveis: Uma variável irrestrita em sinal (ou não restringida) y_i pode ser expressa em termos de duas variáveis não negativas através da substituição

$$y_i = y_i' - y_i'' \quad y_i', y_i'' \geq 0$$

A substituição deve ser realizada em todas as restrições e na função objetivo, onde aparecer y_i .

O problema de PL normalmente é resolvido em termos de y_i' e y_i'' , a partir dos quais se determina y_i por substituição inversa. Uma propriedade interessante de y_i' e y_i'' é que na solução ótima (simplex) de PL, somente uma das duas variáveis pode tomar um valor positivo, mas nunca ambas.

A função objetivo: Embora o modelo genérico de PL possa ser utilizado para resolver problemas de maximização ou de minimização, em algumas ocasiões é melhor converter uma forma na outra. A maximização de uma função é equivalente à minimização do negativo da mesma função.

3.2.5.2 O Algoritmo Simplex (*Método Simplex*)

O método simplex é uma técnica que foi especificamente desenvolvida para resolver problemas de PL. Sua utilização está amplamente difundida atualmente e explicações

detalhadas a respeito de sua implementação podem ser encontradas em MURTY (1985), e em TAHA (1994).

Devido ao fato de que o método simplex não será utilizado diretamente no presente trabalho, qualquer explicação específica a seu respeito mais do que aclarar conceitos estaria embaçando a seqüência com que a metodologia empregada para o SPT está sendo apresentada. Basta simplesmente mencionar que o método simplex é, indiretamente, o fundamento para o Modelo de Transporte.

3.2.6 O Modelo de Transporte

Será estudada a aplicação da técnica clássica de resolução da PO denominada “*modelo de transporte*” (MURTY, 1985; TAHA, 1994). Em um sentido óbvio, o Modelo de Transporte (MT) tem a ver com a elaboração de um plano de custo mínimo para transportar uma determinada mercadoria desde várias fontes (pontos de produção) a vários destinos (clientes). Para o caso do transporte florestal principal o MT tentará determinar o volume total ótimo de madeira, para cada tipo de produto florestal, que deverá ser transportado entre os pontos de produção que o produzem e os clientes que o demandam, de maneira a minimizar o custo total de transporte. A finalidade de estudar a aplicação desta técnica baseia-se no fato de que ela está suficientemente bem detalhada na literatura, possui algoritmos específicos para sua resolução e produz resultados satisfatórios para o problema.

O MT é basicamente um programa linear que pode ser resolvido através do método simplex regular. Porém, sua estrutura particular, como será visto adiante, torna possível o desenvolvimento de um procedimento de solução, conhecido como Técnica de Transporte, que

é mais eficiente em termos de cálculo (TAHA, 1994). Normalmente esta técnica é apresentada na forma elementar, de maneira que pareça totalmente separada do método simplex, mas deve ser destacado que ela segue essencialmente os passos exatos deste método.

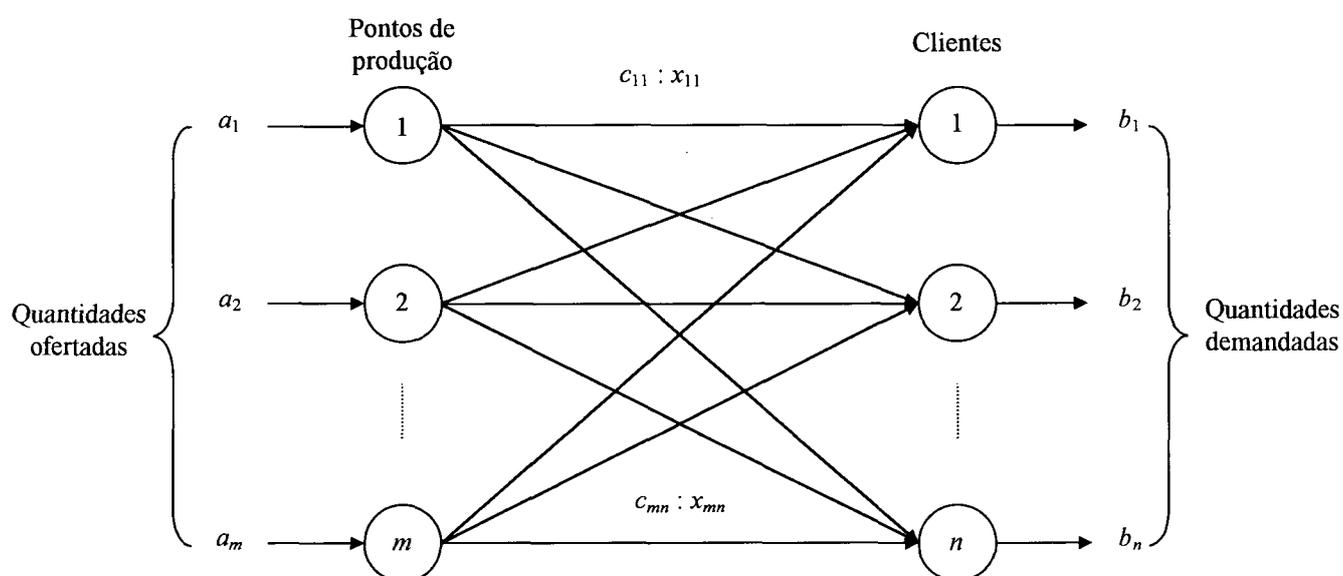
Os dados necessários à aplicação da Técnica de Transporte são: 1) a quantidade a_{pi} de produto p produzida em cada ponto de produção i ; 2) a quantidade b_{pj} de produto p requerida para cada cliente j ; e 3) o custo c_{ij} de transporte unitário desde cada ponto de produção i a cada cliente j .

Como é considerado somente um tipo de produto p por vez, um cliente j pode receber sua quantidade demandada de um ou mais pontos de produção i . O objetivo do modelo é determinar a quantidade ótima que será enviada desde cada ponto de produção i a cada cliente j , de maneira que o custo total de transporte seja minimizado.

A suposição básica do MT é que o custo de transporte em uma rota é diretamente proporcional ao número de unidades transportadas. A definição de unidade de transporte varia com o tipo de mercadoria que se transporta, mas no caso do transporte de multiprodutos florestais a unidade geralmente empregada é o metro cúbico estéreo (st).

A Figura 1 apresenta o MT como uma rede com m pontos de produção e n clientes. Um ponto de produção ou um cliente está representado por um **nó**. O **arco** que une um ponto de produção e um cliente representa a rota pela qual se transporta o produto. A quantidade de produto ofertado no ponto de produção i é a_i e a quantidade demandada do mesmo produto no cliente j é b_j . O custo do transporte unitário entre o ponto de produção i e o cliente j é c_{ij} .

FIGURA 1: MODELO DE TRANSPORTE REPRESENTADO COMO UMA REDE COM m PONTOS DE PRODUÇÃO E n CLIENTES



Se x_{ij} representa a quantidade de produto transportada desde o ponto de produção i até o cliente j , então o modelo geral de PL que representa o modelo de transporte é:

$$\text{minimizar } z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq a_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \geq b_j, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad \forall i, \forall j$$

O conjunto de restrições (2) estabelece que a soma dos envios desde um ponto de produção não pode ser maior que sua quantidade ofertada; de maneira análoga, o conjunto de restrições (3) estabelece que a soma dos envios a um cliente não pode ser maior que sua quantidade demandada.

O modelo, assim como foi descrito, implica que a quantidade ofertada total $\sum a_i$ deve ser pelo menos igual à quantidade demandada total $\sum b_j$. Quando a quantidade ofertada total é igual à quantidade demandada total ($\sum a_i = \sum b_j$), a formulação resultante recebe o nome de modelo de transporte equilibrado. Este modelo difere do anterior somente pelo fato de que todas as restrições são agora equações, ou seja:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

No mundo real não é necessariamente certo que as quantidades ofertadas sejam iguais ou maiores do que as quantidades demandadas. A própria Ciência Econômica, denominada por alguns autores *Ciência da Escassez*, baseia-se no fato de que a quantidade ofertada muitas vezes é inferior à demandada e que existe um ponto de equilíbrio ao qual os mercados tendem livremente, pelo menos em teoria. Da mesma maneira, o MT sempre pode ser equilibrado. O equilíbrio, além de sua utilidade na representação de determinadas situações práticas, é importante para o desenvolvimento de um método de resolução que explore completamente a estrutura especial do MT. O equilíbrio, na prática, se consegue adicionando ao modelo um ponto de produção fictício se a quantidade demandada for maior do que a quantidade ofertada, ou um cliente fictício, caso contrário.

3.2.7 Solução do Modelo de Transporte - Técnica de Transporte

O método apresentado a seguir, denominado Técnica de Transporte (*Simplex Transportation Method*), aplica os passos do método simplex na forma dual e difere somente nos detalhes da implementação das condições de otimalidade e factibilidade.

Os passos básicos da Técnica de Transporte são:

Passo 1: determinar uma solução factível inicial

Passo 2: se todas as variáveis satisfazem a condição de otimalidade, parar; caso contrário seguir ao *Passo 3*

Passo 3: determinar a variável que entra, que é escolhida dentre as variáveis não básicas

Passo 4: determinar a variável que sai dentre as variáveis da solução básica atual; depois obter a nova solução básica e retornar ao *Passo 2*.

Estes passos serão considerados exhaustivamente. A Tabela 4 representa as informações relevantes para a análise. O custo de transporte unitário c_{ij} contido nos retângulos pequenos é expresso em unidades monetárias, e as quantidades ofertadas e demandadas estão dadas em número de unidades do produto.

TABELA 4: EXEMPLO DE UMA TABELA DE TRANSPORTE.

		Cliente								Quantidade ofertada	
		1		2		3		4			
Ponto de produção	1	x_{11}	10	x_{12}	0	x_{13}	20	x_{14}	11	15	
	2	x_{21}	12	x_{22}	7	x_{23}	9	x_{24}	20		25
	3	x_{31}	0	x_{32}	14	x_{33}	16	x_{34}	18		
Quantidade demandada		5		15		15		10			

3.2.7.1 Determinação da solução factível inicial – Regra do canto noroeste

A definição geral do modelo de transporte vista na seção 3.2.6 requer que a quantidade ofertada total seja igual à quantidade demandada total ($\sum a_i = \sum b_j$). Este requisito dá origem a uma equação dependente, o que significa que o modelo de transporte tem somente $m + n - 1$ equações independentes. Portanto, diferentemente do que ocorre no método simplex, uma solução factível básica inicial deverá incluir $m + n - 1$ variáveis básicas.

Normalmente se se utiliza o modelo de transporte formulado como um problema de PL para aplicar o método simplex, seria necessário utilizar variáveis artificiais para garantir uma solução básica inicial. Porém, quando se utiliza a tabela de transporte, uma solução factível básica inicial pode ser obtida de uma maneira fácil e direta. Na seqüência é apresentado para este fim um procedimento denominado *regra do canto noroeste*. Outros procedimentos podem ser encontrados em TAHA (1994)¹⁸.

A regra do canto noroeste começa designando a máxima quantidade possível à variável x_{11} de maneira a satisfazer totalmente a quantidade demandada (coluna) ou exaurir a quantidade ofertada (linha). Como no primeiro caso se satisfaz a quantidade demandada, retira-se a coluna correspondente a esta quantidade demandada e, no segundo caso, como o que se exaure é a quantidade ofertada, retira-se a linha correspondente a esta quantidade ofertada, indicando que as outras variáveis são iguais a zero. Quando são satisfeitas simultaneamente uma linha e uma coluna só se retira uma delas, a linha ou a coluna, garantindo a localização automática de variáveis básicas nulas, caso elas existam.

¹⁸ O Método do Custo Mínimo e o Método de Aproximação de Vogel, às vezes, podem produzir soluções iniciais melhores; porém, a regra do canto noroeste é mais fácil de ser programada em computador.

Depois de ajustar as quantidades ofertadas e demandadas de todas as linhas e colunas não retiradas, a quantidade factível máxima se designa ao primeiro elemento da nova linha, se a quantidade ofertada da linha for menor que a quantidade demandada da coluna, ou da nova coluna, se for o caso contrário. O processo termina quando é deixada sem retirar exatamente uma linha ou uma coluna.

O procedimento descrito é aplicado agora às informações contidas na Tabela 4.

- (1) $x_{11} = 5$, como se satisfaz a quantidade demandada se retira a coluna 1. A quantidade ofertada remanescente é de 10 unidades na linha 1.
- (2) $x_{12} = 10$, como se exaure a quantidade ofertada se retira a linha 1. Falta satisfazer uma quantidade demandada de 5 unidades da coluna 2.
- (3) $x_{22} = 5$, como se satisfaz a quantidade demandada se retira a coluna 2. A quantidade ofertada remanescente é de 20 unidades na linha 2.
- (4) $x_{23} = 15$, como se satisfaz a quantidade demandada se retira a coluna 3. A quantidade ofertada remanescente é de 5 unidades na linha 2.
- (5) $x_{24} = 5$, como se exaure a quantidade ofertada se retira a linha 2. Falta satisfazer uma quantidade demandada de 5 unidades na coluna 4.
- (6) $x_{34} = 5$, como simultaneamente se satisfaz a quantidade demandada e se exaure a quantidade ofertada, só se retira a linha 3 ou a coluna 4. Assim, só um dos dois fica sem retirar e o processo termina.

A solução básica inicial resultante é apresentada na Tabela 5. As variáveis básicas são $x_{11} = 5$; $x_{12} = 10$; $x_{22} = 5$; $x_{23} = 15$; $x_{24} = 5$ e $x_{34} = 5$. As variáveis restantes são não-básicas no nível 0. O custo de transporte associado é $(5 \times 10 + 10 \times 0 + 5 \times 7 + 15 \times 9 + 5 \times 20 + 5 \times 18) = \text{R\$ } 410$.

TABELA 5: SOLUÇÃO BÁSICA INICIAL OBTIDA COM A REGRA DO CANTO NOROESTE

	1	2	3	4			
1	5	10	0	20	11	15	
2	12	5	7	15	9	20	25
3	0	14	16	5	18	5	
	5	15	15	10			

3.2.7.2 Determinação da variável que entra - Método dos Multiplicadores

A variável que deve entrar na base é determinada mediante a condição de otimalidade do método simplex. Neste método são associados os multiplicadores u_i e v_j com a linha i e a coluna j da tabela de transporte (Tabela 4). Para cada variável básica x_{ij} da solução atual, os multiplicadores u_i e v_j devem satisfazer a equação que segue:

$$u_i + v_j = c_{ij}, \text{ para cada variável básica } x_{ij}$$

Estas equações produzem $m + n - 1$ equações (porque somente existem $m + n - 1$ variáveis básicas) com $m + n$ incógnitas. Os valores dos multiplicadores podem ser determinados a partir destas equações estabelecendo um valor arbitrário para qualquer um dos multiplicadores (em geral, u_1 se torna igual a zero) e resolvendo as $m + n - 1$ equações dos $m + n - 1$ multiplicadores desconhecidos restantes. Após calculados os u_i e os v_j , os custos de oportunidade das variáveis não básicas x_{pq} são calculados como segue:

$$\bar{c}_{pq} = u_p + v_q - c_{pq}, \text{ para cada variável não-básica } x_{pq}$$

(estes valores serão os mesmos sem importar a seleção arbitrária do valor de u_1).

A variável \bar{c}_{pq} pode ser considerada como o custo relativo ou custo de oportunidade da variável não básica. Depois se seleciona a variável que entra como a variável não-básica com o custo de oportunidade \bar{c}_{pq} mais positivo.

Se este procedimento for aplicado às variáveis não-básicas da Tabela 5 (solução atual), as equações associadas com as variáveis básicas estão dadas como:

$$x_{11}: u_1 + v_1 = c_{11} = 10$$

$$x_{12}: u_1 + v_2 = c_{12} = 0$$

$$x_{22}: u_2 + v_2 = c_{22} = 7$$

$$x_{23}: u_2 + v_3 = c_{23} = 9$$

$$x_{24}: u_2 + v_4 = c_{24} = 20$$

$$x_{34}: u_3 + v_4 = c_{34} = 18$$

Fazendo $u_1 = 0$, os valores dos multiplicadores se determinam sucessivamente como $v_1 = 10$, $v_2 = 0$, $u_2 = 7$, $v_3 = 2$, $v_4 = 13$ e $u_3 = 5$. Os valores das variáveis não-básicas estão dados da seguinte maneira:

$$x_{13}: \bar{c}_{13} = u_1 + v_3 - c_{13} = 0 + 2 - 20 = -18$$

$$x_{14}: \bar{c}_{14} = u_1 + v_4 - c_{14} = 0 + 13 - 11 = 2$$

$$x_{21}: \bar{c}_{21} = u_2 + v_1 - c_{21} = 7 + 10 - 12 = 5$$

$$x_{31}: \bar{c}_{31} = u_3 + v_1 - c_{31} = 5 + 10 - 0 = \boxed{15}$$

$$x_{32}: \bar{c}_{32} = u_3 + v_2 - c_{32} = 5 + 0 - 14 = -9$$

$$x_{33}: \bar{c}_{33} = u_3 + v_3 - c_{33} = 5 + 2 - 16 = -9$$

Como x_{31} tem o custo de oportunidade \bar{c}_{pq} mais positivo, ela é selecionada como a variável que entra.

As equações $u_i + v_j = c_{ij}$, que foram utilizadas para determinar os multiplicadores, têm uma estrutura tão simples que na realidade é desnecessário escrevê-las na forma explícita. De modo geral resulta muito mais fácil determinar os multiplicadores diretamente a partir da tabela de transporte (Tabela 4), observando que u_i da linha i e v_j da coluna j se somam a c_{ij} quando a linha i e a coluna j se intersectam em uma célula que contém uma variável básica x_{ij} . Quando se determinam os multiplicadores u_i e v_j , pode-se calcular o custo de oportunidade \bar{c}_{pq} para toda variável x_{pq} não-básica, somando u_p da linha p e v_q da coluna q e depois subtraindo c_{pq} da célula na interseção da linha p com a coluna q .

3.2.7.3 Determinação da variável que sai - Construção de um ciclo

Este passo, também denominado Percurso de Avaliação, é equivalente a aplicar a condição de factibilidade do método simplex. Porém, como todos os coeficientes das restrições do modelo original de transporte são zero ou um, as razões da condição de factibilidade terão sempre seu denominador igual a um. Portanto, os valores das variáveis básicas produzirão diretamente as razões associadas.

Com a finalidade de determinar a razão mínima constrói-se um ciclo fechado para a variável atual que entra (x_{31} na iteração atual). O ciclo começa e termina na variável não-básica designada. Este ciclo consta de segmentos sucessivos horizontais e verticais (conectados) cujos pontos extremos devem ser variáveis básicas, à exceção dos pontos extremos associados com a variável que entra. Isto significa que todo elemento de “esquina” do ciclo deve ser uma célula que contenha uma variável básica. A Tabela 6 ilustra um ciclo para a variável que entra

x_{31} dada na solução básica da Tabela 5. Este ciclo pode ser definido em termos das variáveis básicas como $x_{31} \rightarrow x_{11} \rightarrow x_{12} \rightarrow x_{22} \rightarrow x_{24} \rightarrow x_{34} \rightarrow x_{31}$. É irrelevante se o ciclo é construído no sentido horário ou anti-horário. Pode ser observado que para uma solução básica dada pode ser construído somente um ciclo único para cada variável não-básica.

TABELA 6: CICLO COM A VARIÁVEL x_{31} QUE ENTRA NA SOLUÇÃO BÁSICA DA TABELA 5

	1	2	3	4	
1	5	10	20	11	15
2	12	7	9	20	25
3	0	14	16	18	5
	5	15	15	10	

Diagrama de ciclo para a variável não-básica x_{31} (célula sombreada). O ciclo é formado pelas células: (1,1) → (1,2) → (2,2) → (2,3) → (3,3) → (3,1) → (1,1). Os valores de fluxo são: 5 unidades entre (1,1) e (1,2); 10 unidades entre (1,2) e (2,2); 5 unidades entre (2,2) e (2,3); 15 unidades entre (2,3) e (3,3); 5 unidades entre (3,3) e (3,1); e 5 unidades entre (3,1) e (1,1). Os sinais de mudança nas variáveis básicas de "esquina" são: (-) em (1,1), (+) em (1,2), (-) em (2,2), (+) em (2,3), (-) em (3,3) e (+) em (3,1).

Pode-se apreciar na Tabela 6 que se x_{31} (a variável que entra) é incrementada em uma unidade, então, para manter a factibilidade da solução, as variáveis básicas de “esquina” do ciclo x_{31} devem ser ajustadas como segue: x_{11} deve diminuir em uma unidade, x_{12} deve aumentar em uma unidade, x_{22} deve diminuir em uma unidade, x_{24} deve aumentar em uma unidade e x_{34} deve diminuir em uma unidade. Este processo se resume através dos sinais + e - das “esquinas” sudeste da Tabela 6. A mudança satisfará as restrições.

A variável que sai é selecionada dentre as variáveis de “esquina” do ciclo que diminuirão quando a variável que entra x_{31} aumente acima do nível zero. Estas situações estão indicadas na Tabela 6 através das variáveis contidas nas células rotuladas com o sinal (-). Da Tabela 6, x_{11} , x_{22} e x_{34} são as variáveis básicas que diminuirão quando x_{31} aumentar. Depois se seleciona a variável que sai como aquela que possui o menor valor, já que será a primeira a

chegar ao valor zero e qualquer diminuição adicional a tornaria negativa. Neste exemplo as três variáveis - x_{11} , x_{22} e x_{34} - têm o mesmo valor ($= 5$) e neste caso pode-se selecionar qualquer uma delas como sendo a variável que sai. Supondo que x_{34} seja considerada como a variável que sai, depois se incrementa a 5 o valor de x_{31} e os valores das variáveis de esquina (básicas) se ajustam segundo este incremento (isto é, cada uma se incrementa ou diminui em 5 unidades, dependendo de se tem o sinal + ou - associado). A nova solução é apresentada na Tabela 7. Seu novo custo de transporte é $0 \times 10 + 15 \times 0 + 0 \times 7 + 15 \times 9 + 10 \times 20 + 5 \times 0 = \text{R}\335 . Este custo difere daquele associado com a solução inicial da Tabela 5 em $\text{R}\$ 410 - \text{R}\$ 335 = \text{R}\$ 75$, que é o número de unidades designadas a x_{31} ($= 5$) multiplicado por \bar{c}_{31} ($= \text{R}\$ 15$).

TABELA 7: TABELA DE TRANSPORTE APÓS A PRIMEIRA PERMUTA DE VARIÁVEIS.

	1	2	3	4	
1	0	15			15
2		0	15	10	25
3	5				5
	5	15	15	10	

A solução básica da Tabela 7 é degenerada, já que as variáveis básicas x_{11} e x_{22} são nulas. Porém, a degeneração não requer precauções especiais e as variáveis básicas nulas se consideram como qualquer outra variável básica positiva.

Agora se revisa a otimalidade da nova solução da Tabela 7, calculando-se os novos multiplicadores como é indicado na Tabela 8. Os valores dos custos de oportunidade \bar{c}_{pq} são dados pelos números do canto sudoeste de cada célula não-básica. A variável não-básica x_{21}

com o maior custo de oportunidade \bar{c}_{pq} positivo entra na solução. O ciclo fechado associado com x_{21} mostra que x_{11} ou x_{22} podem ser a variável que sai. Será arbitrariamente selecionada x_{11} como sendo a variável que sai da solução.

TABELA 8: REVISÃO DA OTIMALIDADE APÓS A PRIMEIRA PERMUTA DE VARIÁVEIS

	$v_1 = 10$	$v_2 = 0$	$v_3 = 2$	$v_4 = 13$	
$u_1 = 0$	10	0	20	11	15
	0	10	-18	+2	
$u_2 = 7$	12	7	9	20	25
	x_{21}	0	15	10	
	+5	+	-		
$u_3 = -10$	5	14	16	18	5
	5	-24	-24	-15	
	5	15	15	10	

A Tabela 9 mostra a nova solução básica que segue da Tabela 8 (x_{21} entra e x_{11} sai). Os valores de u_i , v_j e \bar{c}_{pq} são calculados novamente e a variável que entra e a que sai são x_{14} e x_{24} , respectivamente. Ao efetuar esta troca na Tabela 9 obtém-se a nova solução da Tabela 10, na qual todos os custos relativos \bar{c}_{pq} são não-positivos. Chegou-se, portanto, à solução ótima.

TABELA 9: TABELA DE TRANSPORTE APÓS A SEGUNDA PERMUTA DE VARIÁVEIS

	$v_1 = 5$	$v_2 = 0$	$v_3 = 2$	$v_4 = 13$	
$u_1 = 0$	10	0	20	11	15
	-5	15	-18	+2	
$u_2 = 7$	12	7	9	20	25
	0	0	15	10	
		+	-		
$u_3 = -5$	5	14	16	18	5
	5	-19	-19	-10	
	5	15	15	10	

TABELA 10: SOLUÇÃO ÓTIMA FINAL PARA A TABELA DE TRANSPORTE

	$v_1 = 5$	$v_2 = 0$	$v_3 = 2$	$v_4 = 11$	
$u_1 = 0$	10	0	20	11	15
	-5	5	-18	10	
$u_2 = 7$	12	7	9	20	25
	0	10	15	-2	
$u_3 = -5$	0	14	16	18	5
	5	-19	-19	-10	
	5	15	15	10	

A solução ótima se resume como segue. De 1 (o ponto de produção) a 2 (o cliente) devem ser enviadas 5 unidades a um custo de $5 \times 0 = \text{R}\$0$; de 1 a 4, 10 unidades a um custo de $10 \times 11 = \text{R}\$110$; de 2 a 2, 10 unidades a um custo de $10 \times 7 = \text{R}\$70$; de 2 a 3, 15 unidades a um custo de $15 \times 9 = \text{R}\$135$; e de 3 a 1, 5 unidades a um custo de $5 \times 0 = \text{R}\$0$. O custo total de transporte é de $\text{R}\$315$.

3.2.8 Aplicação do Modelo de Transporte aos multiprodutos florestais

A Técnica de Transporte utilizada para resolver o Modelo de Transporte, vista de maneira exaustiva nos itens anteriores, é perfeitamente aplicável ao transporte de multiprodutos florestais. Porém, devem ser consideradas algumas características particulares:

- a técnica de transporte deve ser aplicada separadamente para cada um dos produtos florestais a serem transportados. Embora esta consideração pareça óbvia, pois de nada importa, por exemplo, a produção de toras para processo na utilização de toras para serraria, deve ser feita para melhor entender a maneira como trabalhará o sistema de programação do transporte de multiprodutos florestais;

- existem lugares que se comportam simultaneamente como clientes e como pontos de produção. Tal é o caso dos denominados *entrepósitos*, que têm por finalidade concentrar e redistribuir a madeira para os últimos clientes. Neste caso ambas as funções, a de cliente e a de ponto de produção, devem ser tratadas separadamente, ou seja, que os entrepostos na verdade representam simultaneamente um cliente e um ponto de produção; e,
- os custos unitários necessários à aplicação do método de transporte deverão ser os custos efetivamente pagos pela empresa florestal aos empreiteiros proprietários da frota de caminhões terceirizada. Pode ocorrer que a otimização atingida após a aplicação do método do transporte e das técnicas de roteamento torne necessária uma nova negociação dos valores pagos atualmente pelo transporte dos multiprodutos florestais. Nesse caso serão utilizados os novos valores.

Após a aplicação do método de transporte aos multiprodutos florestais tem-se a informação dos volumes totais de cada tipo de produto florestal p que deverão ser transportados a um custo unitário c_{ij} de cada ponto de produção i até cada cliente j . A designação definitiva dos caminhões pode ser feita a partir desta informação de maneira conjunta. Na hora de designar um caminhão podem ser considerados potencialmente todos os produtos para os quais o método de transporte minimizou os custos totais de transporte. É claro que poderão haver restrições específicas em função do tipo de produto florestal e da classe do caminhão.

3.2.9 A Programação Dinâmica

A Programação Dinâmica (PD) ou de etapas múltiplas é outro procedimento matemático, desenhado principalmente para melhorar a eficiência de cálculo de certos tipos de problemas de programação matemática, dividindo-os em subproblemas de menor tamanho e, conseqüentemente, mais fáceis de calcular. O nome de *Programação Dinâmica* provavelmente evoluiu devido à sua aplicação em problemas onde intervém a tomada de decisões relacionadas com o tempo, como os problemas de estoques (TAHA, 1994).

No caso do transporte de multiprodutos florestais que está sendo considerado existem várias decisões interdependentes que devem ser tomadas seqüencialmente no tempo. Cada uma das viagens de cada caminhão, por exemplo, compõe-se de: 1) viagem vazia desde a garagem ou desde o último cliente até o ponto de produção; 2) carga; 3) viagem cheia até o cliente; e, 4) descarga. Ao longo do dia as viagens dos caminhões se sucedem umas às outras, e é neste ponto que a PD pode ser utilizada.

A PD se adapta perfeitamente a situações onde **estágios** vão se sucedendo seqüencialmente uns aos outros. Em cada estágio existem os **estados** factíveis e **decisões** que vinculam estes estados aos estados do estágio seguinte. No caso do transporte de multiprodutos florestais os estados representam os clientes passíveis de serem atendidos em cada estágio; os estágios constituem a ordem em que serão atendidos os clientes durante o dia; e as decisões são, precisamente, as viagens transportando madeira a serem realizadas.

Como é indispensável em qualquer processo de otimização resta definir ainda a variável ou o critério de otimização. Em PD esta variável, que deve ser minimizada, ou maximizada segundo o caso, recebe o nome de **label**. Para o caso do transporte de multiprodutos florestais onde já foram previamente otimizados os custos das viagens carregadas através do Modelo de

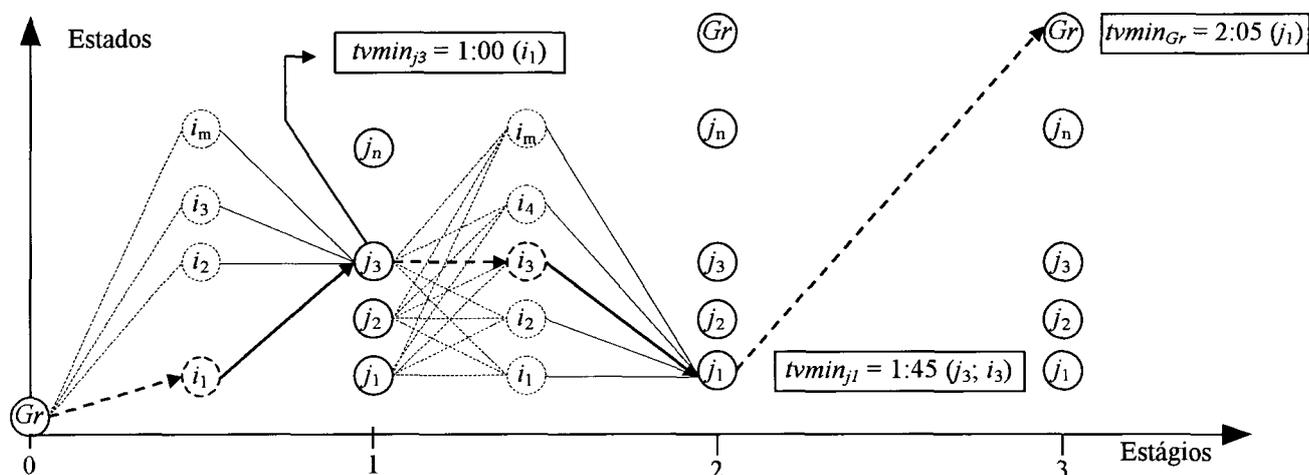
Transporte, nada melhor do que escolher como critério de otimização o tempo de viagem vazio que cada caminhão deverá realizar para procurar a madeira nos pontos de produção. Os tempos de carga e descarga não podem ser considerados como critério de otimização, pois eles são função exclusivamente da capacidade horária de carga e descarga e do tamanho do caminhão.

Outro critério de minimização poderia ser o custo por quilômetro das viagens vazias e o custo horário de espera em filas. O inconveniente ao se trabalhar com uma frota de caminhões totalmente terceirizada é que não são conhecidos de maneira confiável todos os componentes do custo de funcionamento de cada um dos caminhões. De qualquer maneira, a minimização da soma dos tempos das viagens vazias para cada caminhão é uma forma de minimizar, simultaneamente, o custo dessas viagens vazias.

Uma grande vantagem da utilização da PD no roteamento dos caminhões é que ela permite, como será visto mais adiante, um controle minucioso das filas que o caminhão eventualmente terá de fazer nos pontos de produção e/ou nos clientes. Ao estimar, para cada caminhão, os tempos de viagem vazios e cheios e os tempos de carga e descarga, são conhecidos os horários aos quais o caminhão chegaria no ponto de produção, carregaria, sairia do ponto de produção, chegaria no cliente e descarregaria. Conhecendo esses horários é fácil verificar a presença de outros caminhões no ponto de produção e/ou no cliente. Caso haja algum caminhão carregando no mesmo ponto de produção e/ou descarregando no mesmo cliente que estão sendo considerados, é fácil estimar o tempo de espera em filas e incluir este tempo no tempo de viagem vazio, que é a variável que será minimizada. Desta maneira, a opção que está sendo considerada se tornaria menos atraente do ponto de vista da otimização, e em definitivo se estaria minimizando simultaneamente os tempos de viagem vazia e os tempos de espera em filas dos caminhões.

Uma representação esquemática dos conceitos próprios da PD expostos até este ponto pode ser visualizada na Figura 2.

FIGURA 2: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA PROGRAMAÇÃO DINÂMICA APLICADA À DESIGNAÇÃO DOS CAMINHÕES



Na Figura 2, os números do eixo horizontal indicam os estágios, ou seja a ordem na qual estão sendo considerados os clientes aos que o caminhão poderá levar madeira. As linhas tracejadas denotam as possíveis viagens vazias e as linhas cheias as possíveis viagens carregadas. As linhas de maior espessura, tanto tracejadas quanto cheias, indicam o roteamento ótimo para o caminhão que está sendo otimizado, que neste caso pode ser resumido como segue: sair da garagem (Estágio 0) até o ponto de produção i_1 , carregar, levar a madeira até o cliente j_3 (Estágio 1). A segunda viagem começa no cliente j_3 para ir até o ponto de produção i_3 , carregar madeira no ponto de produção i_3 e levá-la até o cliente j_1 (Estágio 2). Finalmente, desde o último cliente j_1 , o caminhão volta vazio para sua garagem (Estágio 3). A variável $tvmin_j$ é ilustrativa do menor tempo vazio acumulado até o caminhão terminar de descarregar no cliente j .

Em cada estágio precisa ser registrada somente a informação do menor tempo vazio acumulado $tvmin_j$ e a dupla “ponto de produção i - último cliente j ” que originaram esse $tvmin_j$. Adicionalmente deve ser controlada a quantidade potencialmente entregue aos clientes para o caso de repetir, para o mesmo caminhão, duas ou mais vezes o mesmo cliente ao longo do dia.

3.2.9.1 O Princípio de Otimalidade

O Princípio de Otimalidade constitui a base da validade dos cálculos de PD. Como pode ser apreciado na Figura 2, os cálculos ótimos de um determinado estágio dependem dos valores ótimos (*labels*) encontrados para o estágio imediatamente anterior, os quais, por sua vez, resumem toda a seqüência de decisões que deveriam ser tomadas para atingir esse valor ótimo. Desta maneira, as decisões futuras são selecionadas de forma ótima sem recorrer a todas as decisões tomadas anteriormente, ou seja os cálculos do estágio k_2 dependem dos do estágio k_1 , os do estágio k_3 dos do estágio k_2 , e assim por diante. Esta propriedade especial da PD constitui o Princípio de Otimalidade.

Segundo BELLMAN e DREYFUS (1962) o Princípio de Otimalidade pode ser enunciado como “...*uma política ótima possui a propriedade de que para qualquer estado e decisão iniciais, as decisões remanescentes devem constituir políticas ótimas a respeito do estado resultante da primeira decisão...*”

Em função deste princípio de otimalidade surge o conceito da equação recursiva de avanço ou retrocesso da PD, tratada nos itens seguintes.

3.2.9.2 Procedimentos *forward* e *backward* (avanço e retrocesso)

A análise seqüencial dos estágios pode ser realizada começando pelo primeiro estágio e a partir dele passando aos outros até o último, ou começando pelo último estágio e passando pelos estágios anteriores até chegar ao primeiro estágio. A literatura coincide em denominar estes procedimentos, respectivamente, como procedimento *forward* e procedimento *backward*.

Segundo TAHA (1994), foi aparentemente a experiência nos cálculos de PD que demonstrou que as formulações *backward* seriam mais eficientes e, por isso, a maioria das obras sobre PD são apresentadas em termos de procedimento *backward*, sem importar se o procedimento contribui ou não na eficiência dos cálculos. Não pode ser generalizado de que um ou outro procedimento seja mais apropriado para qualquer situação. Cada problema deve ser analisado objetivamente para decidir qual o procedimento mais conveniente de ser empregado.

Nos problemas onde intervêm a tomada de decisões ao longo do tempo, como é o caso dos problemas de planejamento da produção e dos estoques, é altamente conveniente designar as etapas (estágios) em ordem cronológica.

Na programação do transporte florestal, onde sempre será mais segura a hora de início das atividades dos motoristas dos caminhões do que a hora de finalização, o procedimento *forward* se constitui como o mais apropriado. Porém, a hora de finalização não pode ser deixada totalmente flutuante. Será utilizado para tal fim o conceito de tolerância na hora de finalização das atividades do caminhão $l(\Delta hf_i)$.

3.2.9.3 Equação recursiva

A equação recursiva descreve a relação existente entre um estado $j_{(k)}$ pertencente a um determinado estágio k , a decisão então aplicada e o novo estado $j_{(k+1)}$ resultante. Em outras palavras, para o SPT que está sendo estudado, a equação recursiva relaciona o menor tempo vazio acumulado da viagem até um determinado cliente $j_{(k-1)}$ no estágio $k-1$, a viagem para o próximo cliente $j_{(k)}$, e o menor tempo vazio acumulado resultante $tvmin_{j_{(k)}}$. As expressões da equação recursiva são as seguintes, para o primeiro e para os demais estágios respectivamente:

$$tvmin_{j_{(1)}} = \text{Mín} \{tv_{i_1} + tf_i + tf_j\} \quad (6)$$

$$tvmin_{j_{(k)}} = \text{Mín} \{tvmin_{j_{(k-1)}} + (tv_{j_{(k-1)}i} + tf_i + tf_j)\} \quad k = 2, 3, \dots, n \quad (7)$$

A variável $tvmin_{j_{(k)}}$ é uma variável que vai crescendo ao passar de um estágio k para o próximo estágio $k + 1$. Isto é lógico porque para realizar qualquer viagem transportando madeira deve haver um trajeto em que o caminhão deve rodar vazio, sem carga. Observa-se também nas equações acima que os tempos de espera em filas tanto nos pontos de produção (tf_i) quanto nos clientes (tf_j) são considerados para a minimização. Desta maneira estão sendo minimizados simultaneamente os tempos de viagens vazias e os tempos de espera em filas dos caminhões.

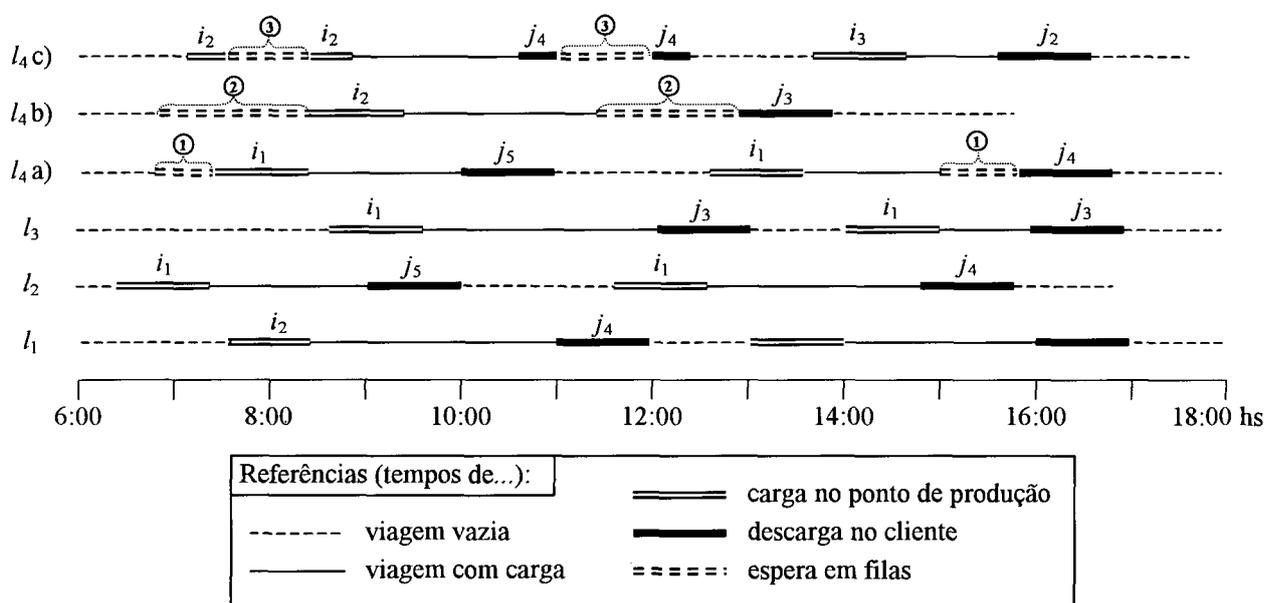
3.2.10 Cálculo dos tempos de espera em filas

O controle dos tempos de espera em filas leva em consideração todos os caminhões que foram alocados anteriormente. É claro que o primeiro caminhão a ser designado não terá

de fazer nenhum tipo de fila nos pontos de produção e/ou nos clientes. Já para o segundo e os demais caminhões, ao calcular os tempos de viagem vazios até um ponto de produção, surge de imediato a hora à qual esse caminhão chegaria no ponto de produção e, conseqüentemente, se ele terá de esperar ou não algum tempo na fila. O cálculo do tempo de espera em filas é feito considerando o intervalo ou janela de tempo que os caminhões anteriormente designados eventualmente estarão ocupando no ponto de produção e/ou no cliente que estão sendo considerados para o caminhão atual. Visto desta maneira poderão ocorrer algumas situações particulares, as quais são ilustradas na Figura 3.

Na Figura 3 é considerada uma situação hipotética onde já foram designados os três primeiros caminhões (l_1 , l_2 e l_3) e está sendo considerada a designação do quarto caminhão (l_4). Se observa que na designação dos caminhões l_1 , l_2 e l_3 não houve necessidade de levar em consideração os tempos de espera em filas porque não existiram superposições de horários. Porém na designação do caminhão l_4 começa a aparecer alguma superposição. Estas superposições podem ser categorizadas em três tipos descritos a seguir:

FIGURA 3: CÁLCULO DO TEMPO DE ESPERA EM FILAS COM JANELAS DE TEMPO



- (1) fila clássica: este tipo de fila é identificado na linha l_4 a) da Figura 3 com o número ①. O caminhão l_4 chega ao ponto de produção i_1 durante a carga do caminhão l_2 previamente designado, ou chega ao cliente j_4 durante a descarga do caminhão l_2 . Os tempos de espera em filas tf_i e tf_j são calculados, respectivamente, como o intervalo de tempo desde a chegada do caminhão l_4 ao ponto de produção i_1 e a saída do caminhão l_2 que está sendo carregado, ou desde a chegada do caminhão l_4 ao cliente j_4 e a saída do caminhão l_2 que está sendo descarregado.
- (2) fila hipotética: este tipo de fila é identificado na linha l_4 b) da Figura 3 com o número ②. O caminhão l_4 chega ao ponto de produção i_2 e não há nenhum caminhão carregando nesse momento. Porém, existe a previsão de que o caminhão l_1 , designado previamente, chegue ao ponto de produção antes que a carga do caminhão l_4 tenha sido completada. Uma situação análoga ocorre no cliente j_3 , onde existe a previsão de que o caminhão l_3 chegue antes de completar a descarga do caminhão l_4 . O critério adotado neste caso para o cálculo dos tempos de espera em filas tf_i e tf_j é conservador. O caminhão l_4 deverá aguardar no ponto de produção i_2 sem ser carregado (tf_i) até que o caminhão l_1 chegue, carregue e saia. Só então o caminhão l_4 poderá ser carregado. Analogamente, o caminhão l_4 deverá aguardar no cliente j_3 sem ser descarregado (tf_j) até que o caminhão l_3 chegue, descarregue e saia. Só então o caminhão l_4 poderá ser descarregado.
- (3) fila hipotética (variante): este tipo de filas é identificado na linha l_4 c) da Figura 3 com o número ③. A situação é similar à descrita no item anterior, com a diferença de que a carga do caminhão l_4 no ponto de produção i_2 é iniciada antes da chegada do caminhão l_1 . Depois da chegada do caminhão l_1 a carga de l_4 é interrompida e prossegue somente após o caminhão l_1 haver completado sua carga. Analogamente, a descarga do caminhão l_4 no

cliente j_4 é iniciada antes da chegada do caminhão l_1 , logo ela é interrompida e prossegue após o caminhão l_1 haver completado sua descarga. Pode-se visualizar na Figura 3 que o tempo de espera em filas total da linha l_4 c) é menor do que o da linha l_4 b), permitindo inclusive ao caminhão l_4 realizar mais uma viagem transportando madeira.

De maneira geral a terceira opção descrita pode ser considerada como inviável do ponto de vista prático. No SPT os tempos de espera em filas tf_i e tf_j serão calculados segundo as opções (1) e (2), conforme o caso, mas deve ser destacado neste ponto que o cálculo dos tempos de espera em filas tf_i e tf_j é efetuado somente durante a execução do Algoritmo de Designação dos Caminhões, tornando as opções que consideram estes tempos tf_i e tf_j menos atraentes do que se não houvessem superposições com outros caminhões. Deve ser destacado neste ponto que na prática as filas imprevistas que vierem a ocorrer serão consideradas de uma maneira diferente às descritas. Quem chegar primeiro vai carregar (ou descarregar) primeiro.

Uma vez que todos os caminhões são designados, a solução ótima informará se devem ser considerados ou não tempos de espera em filas. Pode até ocorrer que um determinado caminhão deva permanecer aguardando em algum ponto de produção ou cliente uma espera programada.

No programa ASICAM, que utiliza heurísticas para a designação dos caminhões, WEINTRAUB *et al.* (1996) consideram os atrasos imprevistos de uma maneira severa. Se um caminhão qualquer chegar ao ponto de produção quando o caminhão seguinte já estiver sendo carregado, então o caminhão atrasado passa para o final de todos os caminhões que serão carregados no dia. É claro que considerações deste tipo exigem uma disciplina extraordinária por parte dos motoristas dos caminhões e muito critério por parte dos planejadores. No SPT as filas são consideradas já durante a otimização, na fase da Programação Dinâmica (ADC). Se

por ventura surgirem atrasos imprevistos durante o dia, eles terão que ser considerados de forma manual. O modelo desenvolvido por RÖNNQVIST e RYAN em 1997, que combina a Programação Linear Inteira com algumas técnicas heurísticas de otimização, trabalha em tempo real e pode realizar modificações na programação ao longo do dia. No SPT é desaconselhável realizar execuções durante o dia, pois o Programa de Transporte pode resultar completamente modificado, e isso na realidade representaria um caos no transporte florestal.

3.3 DESCRIÇÃO DOS DADOS UTILIZADOS PARA TESTAR O SISTEMA DE PROGRAMAÇÃO DO TRANSPORTE

Para a fase de testes será considerado um subproblema de tamanho menor do que o real, abrangendo somente uma das regiões nas quais a empresa florestal produz madeira. A região considerada, denominada Moquém e localizada em um município vizinho ao de Jaguariaíva, possui características geográficas tais que permitem considerá-la como se fosse o problema real, só que reduzido no tamanho. Atualmente estão sendo produzidos 9 tipos de produtos florestais em 8 pontos de produção para o abastecimento de 5 clientes. O transporte é realizado com 12 diferentes classes de caminhões.

As características dos produtos florestais estão detalhadas na Tabela 11. A descrição dos pontos de produção é apresentada na Tabela 12. O detalhe dos clientes é apresentado na Tabela 13. A descrição das diferentes velocidades, para o caminhão carregado ou vazio, em estrada de terra ou de asfalto, é ilustrada na Tabela 14, e a descrição das classes de caminhões utilizados para o transporte pode ser visualizada na Tabela 15.

TABELA 11: CARACTERÍSTICAS DOS PRODUTOS FLORESTAIS (p) A SEREM TRANSPORTADOS

Produto (p)	Utilização (Sortimento)	Dimensões das toras		
		Comprimento [m]	Diâmetro mínimo [cm]	Diâmetro máximo [cm]
1	Processo	-	8	24
2	Serraria	1,90	18	24
3	Serraria	2,50	18	24
4	Serraria	2,40	25	34
5	Serraria	2,50	25	34
6	Serraria	2,60	25	34
7	Serraria	3,10	25	34
8	Laminação	2,60	35	44
9	Laminação	3,00	35	44

TABELA 12: DESCRIÇÃO DOS PONTOS DE PRODUÇÃO (i) DA REGIÃO DE MOQUÉM

(i)	Nome	Quadrante	Produto (p)	Produção mensal (m ³ cc)	Regime de trabalho		
					2° - 6°	Sáb	Dom
1	Empreiteira Irmãos Alves	Oesp 70	2	1.750	6:00-18:00	6:00-16:00	-
			4	600			
			6	975			
			8	200			
			9	525			
2	Preserve Agroflorestal	Oesp 72 – III	1	6.500	0:00-24:00	0:00-16:00	-
			6	5.508			
			8	700			
3	J. P. de Itararé	Cobrasma 69	2	1.750	6:00-20:00	-	-
			5	1.080			
			7	1.100			
			9	525			
4	V. L. Logging	Canastrão 01	1	3.900	0:00-24:00	0:00-16:00	-
			6	650			
5	Trizote	Oesp 70	1	650	18:00-6:00	-	-
			6	1.200			
			7	800			
			8	300			
6	Pedro Martins da Costa	Cobrasma 70	9	400	7:00-17:00	7:00-14:00	-
			1	975			
			6	300			
7	Cláudio Masqueto	Oesp 71	1	1.950	7:30-18:00	7:30-16:00	-
			6	2.145			
8	Soares	Oesp 71	1	1.105	7:30-18:00	7:30-16:00	-
			2	350			
			3	420			
			6	3705			

TABELA 13: DESCRIÇÃO DOS CLIENTES (*j*) QUE UTILIZAM MADEIRA DA REGIÃO DE MOQUÉM

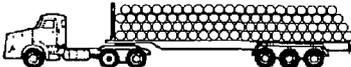
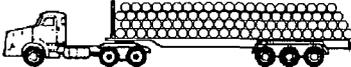
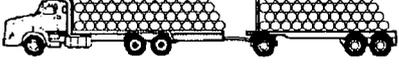
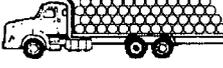
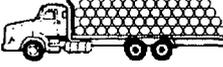
<i>(j)</i>	Nome	Quadrante	Produto (<i>p</i>)	Pedidos mensais (m^3cc)	Regime de trabalho		
					2° - 6°	Sáb	Dom
1	Entrepósito Jaguariaíva	EntJ	4	600	0:00-24:00	0:00-17:00	-
			5	1.080			
			6	3.100			
			7	1.900			
			9	1.450			
2	Entrepósito Pinhalzinho	EntP	3	420	0:00-24:00	0:00-17:00	-
			6	975			
			8	1.200			
3	Jerse (Ouro Verde)	O.V.	2	3.850	7:00-19:00	7:00-19:00	-
4	Línea	Línea	6	9.755	7:00-18:00	7:00-18:00	-
5	Pisa	PPSA	1	15.080	7:00-18:00	7:00-18:00	-

TABELA 14: VELOCIDADES DE CIRCULAÇÃO DOS CAMINHÕES [km/h] CONSIDERANDO O TIPO DE ESTRADA E SE A VIAGEM É COM OU SEM CARGA

	Estrada de terra	Estrada de asfalto
Caminhão carregado	17	37
Caminhão vazio	35	60

Na Tabela 16 é apresentada a matriz de distâncias entre os quadrantes correspondentes aos pontos de produção e aos clientes. No corpo da tabela aparecem dois valores separados por uma barra (/). O primeiro valor indica a distância em [km] do trecho de estrada de asfalto; o segundo a distância em [km] correspondente à estrada de terra. Os tempos de viagem necessários para percorrer estas distâncias, considerando o caminhão carregado ou vazio, são apresentados na Tabela 17. Na Tabela 18 são apresentados os custos unitários pagos atualmente pelo transporte de produtos florestais entre os diferentes pontos de produção *i* e os clientes *j*. Os valores estão expressos em [R\$/t].

TABELA 15: CARACTERÍSTICAS DAS CLASSES DE CAMINHÕES UTILIZADOS PARA O TRANSPORTE FLORESTAL

Classe	Descrição da classe*	Ilustração**	Capacidade de carga (t)	Quantidade N° caminhões	
1	+	Carreta 3 eixos simples 6 x 2 + SR 3E		35	2
2	++	Carreta 3 eixos simples 6 x 2 + SR 3E		35	6
3	+++	Carreta 3 eixos simples 6 x 2 + SR 3E		35	2
4	+	Carreta 3 eixos traçada 6 x 4 + SR 3E		45	3
5	++	Carreta 3 eixos traçada 6 x 4 + SR 3E		45	4
6	+	Plataforma semireboque 6 x 4 + R 1 + 2E		45	4
7	++	Plataforma semireboque 6 x 4 + R 1 + 2E		45	8
8	+	Truck simples 6 x 2		16	4
9	++	Truck simples 6 x 2		16	7
10	+	Truck traçado 6 x 4		22	1
11	++	Truck traçado 6 x 4		22	7
12	++	Toco 4 x 2		12	5

* Referências:

- + Os caminhões destas classes podem levar qualquer tipo de produto florestal.
- ++ Os caminhões destas classes podem levar somente toras de comprimento inferior a 2,60 m.
- +++ Os caminhões destas classes podem levar somente toras de comprimento superior a 3,00 m.

** Ilustrações adaptadas de RODA (1996).

TABELA 16: MATRIZ DE INTERVALOS DE DISTÂNCIA [km] ENTRE OS PONTOS DE PRODUÇÃO E OS CLIENTES.

Quadrantes dos pontos de produção	Quadrantes dos clientes				
	PPSA	ENTJ	ENTP	LÍNEA	O.V.
Oesp 71	45 + 50*	45 + 50	0 + 25	15 + 50	0 + 7
Oesp 70	3 + 60	3 + 60	0 + 25	15 + 60	0 + 5
Oesp 72 – III	3 + 60	3 + 60	0 + 25	15 + 60	0 + 5
Cobrasma 69	3 + 58	3 + 58	0 + 30	15 + 65	0 + 9
Cobrasma 70	3 + 58	3 + 58	0 + 30	15 + 65	0 + 9
Canastrão	3 + 45	3 + 45	0 + 35	36 + 45	0 + 14

* Cada rota é formada por um trecho de estrada asfaltada e outro de terra, e as distâncias correspondentes estão, respectivamente, separadas por um sinal (+)

TABELA 17: MATRIZ DE INTERVALOS DE TEMPO [h:mm] DAS VIAGENS ENTRE OS PONTOS DE PRODUÇÃO E OS CLIENTES.

Quadrantes dos pontos de produção	Quadrantes dos clientes				
	PPSA	ENTJ	ENTP	LÍNEA	O.V.
Oesp 71	4:10 / 2:10*	4:10 / 2:10	1:29 / 0:43	3:21 / 1:43	0:25 / 0:12
Oesp 70	3:37 / 1:46	3:37 / 1:46	1:29 / 0:43	3:57 / 1:58	0:18 / 0:09
Oesp 72 – III	3:37 / 1:46	3:37 / 1:46	1:29 / 0:43	3:57 / 1:58	0:18 / 0:09
Cobrasma 69	3:30 / 1:43	3:30 / 1:43	1:46 / 0:52	4:14 / 2:07	0:32 / 0:16
Cobrasma 70	3:30 / 1:43	3:30 / 1:43	1:46 / 0:52	4:14 / 2:07	0:32 / 0:16
Canastrão	2:44 / 1:21	2:44 / 1:21	2:04 / 1:00	3:38 / 1:54	0:50 / 0:24

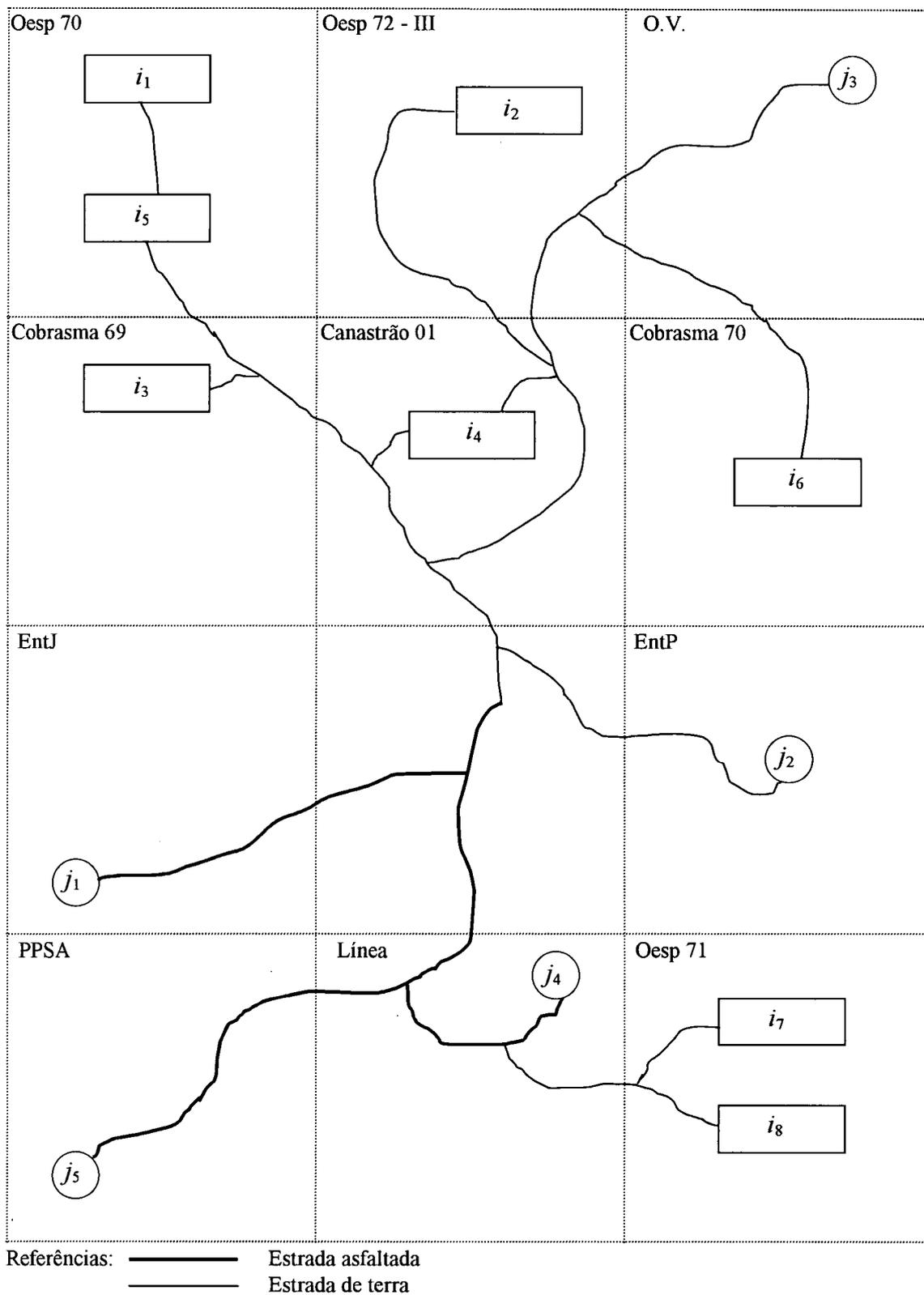
* Os tempos das viagens carregadas e vazias estão separados por uma barra (/)

TABELA 18: MATRIZ DE PREÇOS UNITÁRIOS PAGOS PELO TRANSPORTE [R\$/t] ENTRE OS PONTOS DE PRODUÇÃO E OS CLIENTES.

Quadrantes dos pontos de produção	Quadrantes dos clientes				
	PPSA	ENTJ	ENTP	LÍNEA	O.V.
Oesp 71	8,42	8,42	3,50	6,34	3,14
Oesp 70	7,65	7,65	3,50	6,34	3,14
Oesp 72 – III	7,65	7,65	3,50	6,34	3,14
Cobrasma 69	6,72	6,72	3,87	6,34	3,14
Cobrasma 70	6,72	6,72	3,87	6,34	3,14
Canastrão	5,94	5,94	4,43	7,14	3,14

Na Figura 4 é ilustrada a utilização de quadrantes para a determinação das distâncias.

FIGURA 4: EXEMPLO DA UTILIZAÇÃO DE QUADRANTES PARA A DETERMINAÇÃO DAS DISTÂNCIAS ENTRE OS PONTOS DE PRODUÇÃO (i - □) E OS CLIENTES (j - ○)



4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma simples análise do problema de programação do transporte principal de multiprodutos florestais permite visualizar três aspectos sumamente críticos:

- (1) a inspeção total das diferentes possibilidades de vincular entre si os diversos pontos de produção, clientes, tipos de produtos, caminhões, rotas, horários de saída e chegada, dentre outros, conduz a muitas combinações;
- (2) muitas das variáveis consideradas neste tipo de problemas são inteiras, como por exemplo a carga de cada caminhão, a decisão de fazer ou não uma viagem, o número de viagens por dia, dentre outras, o que conduz à necessidade de aplicação de algoritmos especiais próprios da Programação Linear inteira do tipo *branch-and-bound*, que são mais lentos do que os algoritmos para Programação Linear clássica; e,
- (3) os algoritmos para resolver este tipo de problemas, se não forem convenientemente restringidos, orientados e simplificados, podem transformar-se em um problema *NP-hard*. Isto torna os problemas praticamente impossíveis de serem resolvidos em tempo hábil.

4.1 SISTEMA DE PROGRAMAÇÃO DO TRANSPORTE PRINCIPAL DE MULTIPRODUTOS FLORESTAIS - SPT

O SPT compõe-se de duas etapas caracterizadas, cada uma delas, por um algoritmo específico. Os números indicados entre parênteses (n) referem-se aos componentes numerados do fluxograma da Figura 5. As duas etapas são as seguintes:

Algoritmo 1. Inicialmente é otimizado, para cada tipo p de produto florestal (I), o fluxo total de madeira que deverá ser transportado desde cada um dos pontos de produção i que o oferece até cada um dos clientes j que o demanda. Para a otimização é utilizado o Algoritmo do Modelo de Transporte (AMT) descrito detalhadamente na seção 4.1.1 (2). Com o uso do AMT se estará garantindo a minimização dos custos totais do transporte florestal principal, uma vez que a empresa florestal atualmente paga, aos proprietários dos caminhões, somente as viagens carregadas com madeira. Os resultados do algoritmo 1 são armazenados para serem considerados posteriormente pelo algoritmo 2 (3).

Algoritmo 2. Após a otimização das viagens carregadas resta ainda programar as viagens vazias e as atividades de carga e descarga de maneira a minimizar, para cada caminhão l , a soma dos tempos de espera em filas nos pontos de produção e/ou clientes e dos tempos de viagem vazios, desde a garagem até o primeiro ponto de produção, desde um cliente j_k até o ponto de produção do cliente seguinte i_{k+1} , e o retorno desde o último cliente até a garagem (4). Nesta etapa é utilizado

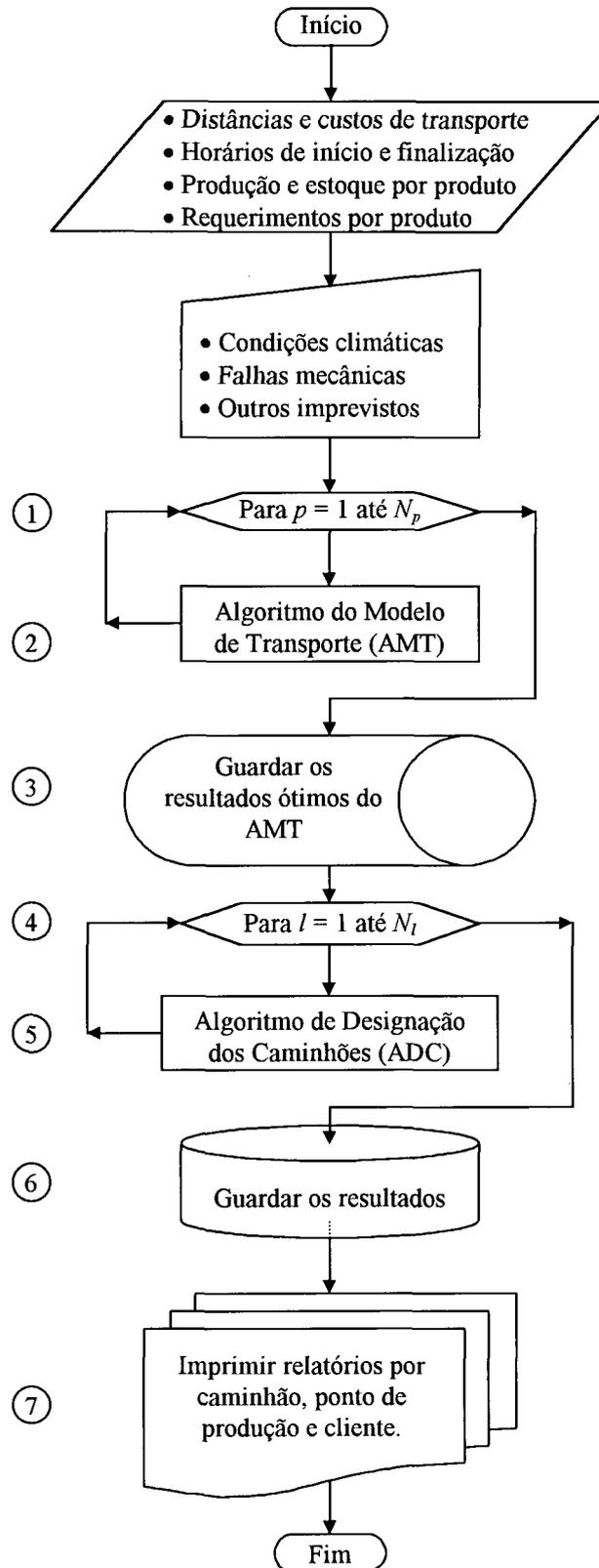
o Algoritmo de Designação dos Caminhões (ADC) descrito exhaustivamente na seção 4.1.2, que essencialmente utiliza a Programação Dinâmica (5).

Finalmente, são armazenados os resultados de todas as viagens alocadas para cada um dos caminhões (6) e são impressos os relatórios por caminhão l , por ponto de produção i , por cliente j e por tipo de produto florestal p (7). Na Figura 5 é apresentado o fluxograma geral do Sistema de Programação do Transporte principal de multiprodutos florestais.

Uma vantagem do SPT é a escassa ou nula utilização de heurísticas. A única fase em que o SPT depende de alguma regra de designação é no momento de estabelecer a ordem em que serão alocados os caminhões. As heurísticas não são indesejáveis; muito pelo contrário, elas são freqüentemente empregadas neste tipo de problemas de programação do transporte principal (ROBUSTÉ *et al.*, 1990; WEINTRAUB *et al.*, 1996; RÖNNQVIST e RYAN, 1997).

Uma característica especial dos procedimentos heurísticos é que eles exigem cuidados especiais e precisam ser rigorosamente testados. Conseqüentemente, sua efetividade não pode ser estabelecida sem gastar muito tempo e recursos de pesquisa (ROBUSTÉ *et al.*, 1990). Além disso, quanto maior for o tamanho do problema, maior é a dificuldade de encontrar um heurístico apropriado.

FIGURA 5: FLUXOGRAMA DO SISTEMA DE PROGRAMAÇÃO DO TRANSPORTE



Segundo o esquema proposto por RONEN (1988), apresentado na seção 2.3.2 - O transporte através de uma frota de caminhões, o SPT se caracteriza da seguinte maneira:

- frota com mais de um caminhão (1a);
- tipos diferentes de caminhões (2b);
- estrutura de custos idênticos para todos os caminhões (3a);
- custos estabelecidos por rota (4a);
- vários depósitos (5b);
- quantidade demandada determinística (6a);
- operações de carga e descarga seqüenciais (7c);
- número indeterminado de viagens por caminhão para o período de planejamento (8a, 8b 8c);
- tempo limitado por rota com o mesmo limite para todos os caminhões (9a);
- rede viária não direcionada (10b);
- distâncias e tempos medidos + estimados (11c);
- objetivos de minimização dos custos através do AMT (12a) e minimização das distâncias ou tempos com o ADC (12b).

Dentre as outras características mencionadas por RONEN (1988) podem ser consideradas as janelas de tempo para as cargas e as descargas (1), diferentes fontes para um pedido (2), múltiplos tipos de produtos (4), tempos de carga e descarga como função das carregadeiras e do tamanho do caminhão (6), velocidades dos caminhões dependendo do tipo de estradas (12), seqüência forçada de viagens e/ou caminhões (15), caminhões que não retornam à sua origem (16), utilização tipo *tudo* ou *nada* dos caminhões (23) e entregas programadas (24).

4.1.1 O Algoritmo do Modelo de Transporte

O Algoritmo de Modelo de Transporte (AMT) segue os passos descritos na seção 3.2.7 - Solução do Modelo de Transporte - Técnica de Transporte. A programação do AMT foi realizada modificando uma rotina escrita em Basic (PRACTICAL Basic Programs, 1983).

4.1.1.1 Descrição do Algoritmo do Modelo de Transporte

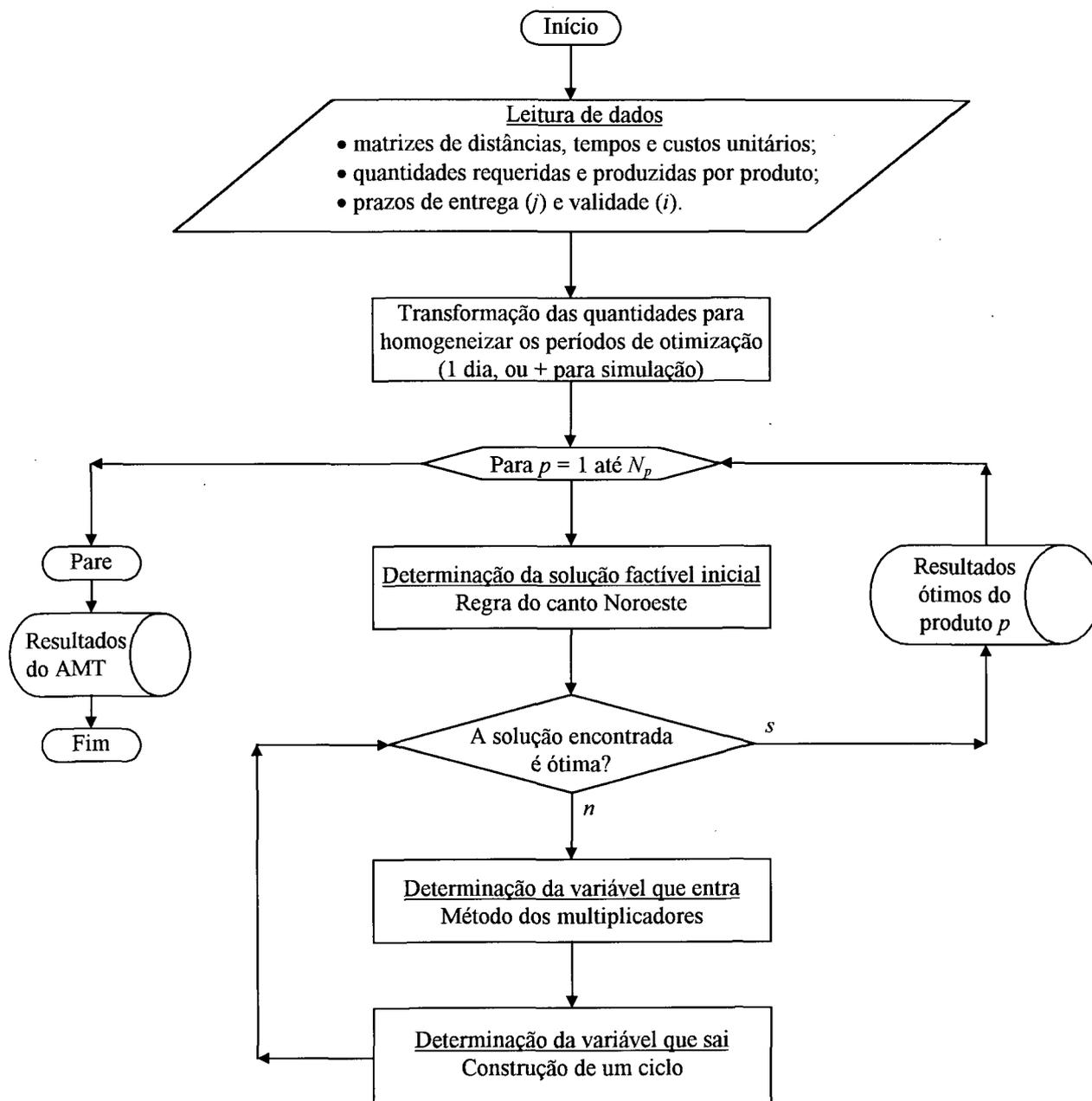
Os dados necessários para o funcionamento do AMT são as quantidades ofertadas de cada tipo de produto florestal p em cada ponto de produção i e as quantidades demandadas para o mesmo tipo de produto florestal p para cada cliente j . As quantidades aludidas variarão em função da unidade de tempo considerada para o planejamento. Como já foi descrito na seção 3.2.3 - Unidade de tempo e horizonte de planejamento, a unidade de tempo para o planejamento é um dia, e neste caso deverá ser considerado o dia para o qual está sendo programado o transporte principal (geralmente o dia seguinte à execução do SPT).

Pode ocorrer que os pedidos de madeira de determinados clientes sejam realizados mensalmente. Neste caso o AMT poderá ser executado considerando as quantidades mensais, e depois subdividindo estas quantidades segundo o dia para o qual é programado transporte principal. O importante é que exista uma base de tempo comum a todos os pedidos. Neste sentido o dia pode ser considerado como um mínimo divisor comum de qualquer pedido de madeira.

Os custos utilizados pelo AMT na otimização foram os custos unitários de transporte, expressos em R\$/t, pagos atualmente pela empresa florestal aos proprietários da frota de caminhões para cada rota.

Na Figura 6 é apresentado o fluxograma do Algoritmo do Modelo de Transporte.

FIGURA 6: FLUXOGRAMA DO ALGORITMO DO MODELO DE TRANSPORTE



4.1.1.2 Resultados da aplicação do Algoritmo do Modelo de Transporte

O AMT, após ter sido executado separadamente para cada um dos 9 tipos de produtos florestais, indicou as quantidades ótimas a serem transportadas entre cada ponto de produção e cada cliente. Os resultados obtidos constam da Tabela 19.

TABELA 19: QUANTIDADES ÓTIMAS MENSAIS A SEREM TRANSPORTADAS GERADAS PELO ALGORITMO DO MODELO DE TRANSPORTE - AMT

Produto (<i>p</i>)	Ponto de produção (<i>i</i>)	Cliente (<i>j</i>)	Custo unitário [R\$/t]	Quantidade [t]	Custo Total mensal [R\$]
1	2	5	7,65	6.500	49.725,00
1	4	5	5,94	3.900	23.166,00
1	5	5	7,65	650	4.972,50
1	6	5	6,72	975	6.552,00
1	7	5	8,42	1.950	16.419,00
1	8	5	8,42	1.105	9.304,10
2	1	3	3,14	1.750	5.495,00
2	3	3	3,14	1.750	5.495,00
2	8	3	3,14	350	1.099,00
3	8	2	3,50	420	1.470,00
4	1	1	7,65	600	4.590,00
5	3	1	6,72	1.080	7.257,60
6	2	1	7,65	2.800	21.420,00
6	6	1	6,72	300	2.016,00
6	1	2	3,50	975	3.412,50
6	2	4	6,34	2.708	17.168,72
6	5	4	6,34	1.200	7.608,00
6	7	4	6,34	2.145	13.599,30
6	8	4	6,34	3.705	23.489,70
7	3	1	6,72	1.100	7.392,00
7	5	1	7,65	800	6.120,00
8	1	2	3,50	200	700,00
8	2	2	3,50	700	2.450,00
8	5	2	3,50	300	1.050,00
9	1	1	7,65	525	4.016,25
9	3	1	6,72	525	3.528,00
9	5	1	7,65	400	3.060,00
TOTAL				39.413	252.575,67

Fonte: Pesquisa

4.1.1.3 Discussão dos resultados do Algoritmo do Modelo de Transporte

Na Tabela 19 pode-se observar que apenas o produto 6 é requerido por mais de um cliente (clientes 1, 2 e 4). Somente neste caso faz sentido a aplicação do AMT para a otimização. Para cada um dos demais produtos, todos os pontos de produção que o produzem devem abastecer ao único cliente que o solicita. Esta particularidade pode ser explicada pelo fato de que muitos dos clientes demandam um tipo de produto florestal diferenciado dos produtos requeridos pelos demais clientes. A situação descrita poderá eventualmente mudar ao considerar o problema em escala real, mas uma das características da comercialização de multiprodutos florestais é a escassa padronização existente nos mesmos com a conseqüente subdivisão excessiva de tipos de produtos florestais.

Na Tabela 11 pode-se observar que os produtos 4, 5, 6 e 7, com o mesmo diâmetro mínimo de 25 cm e máximo de 34 cm, diferem entre si somente nos comprimentos, os quais são, respectivamente, 2,40 m, 2,50 m, 2,60 m e 3,10 m. A diferença entre os comprimentos é de apenas 10 cm entre os produtos 4, 5, e 6. Se fosse hipoteticamente considerado o caso extremo onde cada cliente solicitasse um produto florestal diferente do requerido pelos demais clientes, o AMT não teria praticamente razão de ser executado dentro do SPT, e deveria ser utilizada alguma técnica de otimização que levasse em consideração as árvores em pé e a melhor maneira de obter delas os multiprodutos florestais requeridos. Esta última consideração gera a proposta de algumas modificações na prática atual de sortimentos e, adicionalmente, abre um leque de possibilidades de aplicação de técnicas de otimização, próprias da Pesquisa Operacional, ao manejo florestal. Neste contexto podem ser mencionados os seguintes itens:

- Flexibilizar ligeiramente o comprimento das toras dos produtos florestais 4, 5 e 6 de maneira a evitar que cada um deles seja requerido por somente um cliente e, após a modificação, utilizar o AMT tal como está descrito no presente trabalho. É claro que esta opção deveria ser cuidadosamente estudada para minimizar o desperdício de matéria-prima nas indústrias florestais que utilizam estes produtos. Deveriam ser atentamente analisadas também as variações nos comprimentos das toras que são atualmente obtidas nas frentes de corte para estabelecer, se resulta justificada ou não, a obtenção de três tipos de produtos florestais cuja única diferença é um intervalo de 10 cm no comprimento das toras;
- Sistemas de Otimização conjunta do manejo florestal de médio e longo prazos associados ao transporte principal de multiprodutos florestais. O manejo dos plantios florestais poderia, desta maneira, ser convenientemente orientado para fornecer os sortimentos conforme às necessidades dos principais clientes, que são relativamente previsíveis no médio e longo prazos, levando em consideração, além dos aspectos clássicos concernentes ao manejo florestal - sítio, espaçamento inicial, densidade, crescimento, podas e/ou desbastes -, as distâncias entre os pontos de produção e os clientes e os correspondentes custos de transporte principal.

Na Tabela 19, as quantidades a serem transportadas na solução ótima do AMT para cada tipo de produto florestal p , entre cada ponto de produção i e cada cliente j , correspondem às quantidades mensais solicitadas deste último. Considerando, por exemplo, o mês de novembro de 1997, que possui um sábado (1/11/97) mais quatro semanas completas de segunda a sábado, ou seja 29 dias úteis de trabalho, e considerando ainda que o número de horas úteis por semana é de 126 hs, (ver Tabela 2), então todas as quantidades ótimas da Tabela 19 deverão ser divididas por 516 hs ($4 \times 126 \text{ hs} + 12 \text{ hs}$) e multiplicadas pelo número

de horas úteis do dia para o qual está sendo programado o transporte principal. Caso este dia seja uma segunda-feira então as quantidades ótimas, após serem divididas por 516 hs, deverão multiplicadas por 18 hs. Estas novas quantidades ótimas constituem parte dos dados de entrada para o Algoritmo de Designação dos Caminhões.

Pode-se observar na Tabela 19 que o custo total de transporte principal para o mês considerado supera os R\$ 250.000. Se este valor for ampliado para um ano o custo anual de transporte principal supera os R\$ 3.000.000, mesmo considerando somente uma das regiões de produção florestal da empresa.

4.1.2 O Algoritmo de Designação dos Caminhões

Na Programação Dinâmica (PD) não existe, assim como ocorre com o método Simplex em PL, um algoritmo geral que resolva todos os problemas. Cada problema tem suas características próprias e requer um programa especial para resolvê-lo. Porém, a elaboração do algoritmo para resolver um determinado problema é bastante fácil uma vez que se descobre que o problema é passível de ser resolvido por PD e são identificados todos seus elementos (estágios, estados, decisões, *labels*, etc.). As duas principais dificuldades da PD são: 1) identificar um dado problema como sendo de PD e 2) formulá-lo em termos de PD (ARDUINO, 1972).

4.1.2.1 Descrição do Algoritmo de Designação dos Caminhões

Os dados necessários para o funcionamento do Algoritmo de Designação dos Caminhões (ADC) são os resultados ótimos achados pelo Algoritmo do Modelo de Transporte (AMT) após executado separadamente para cada um dos produtos florestais, isto é, todas as viagens ótimas encontradas, incluindo todos os produtos, origens e clientes. Adicionalmente o ADC precisa de informações sobre horários e dias de trabalho dos caminhões, dos pontos de produção e dos clientes, e tolerâncias para mais dos horários de finalização; da possibilidade do caminhão pernoitar no ponto de produção e/ou no cliente; das capacidades de carga dos caminhões e suas tolerâncias para menos; dos tempos de carga e descarga, por caminhão, nos pontos de produção e nos clientes, respectivamente; das restrições de acesso por classe de caminhão, região, e levando em consideração as condições de trafegabilidade decorrentes da eventual ocorrência de precipitações hídricas; das velocidades dos caminhões cheios e vazios em estradas de terra e de asfalto, com e sem chuva; e dos horários de todos os caminhões já alocados para considerar as filas nos pontos de produção e nos clientes ao alocar o caminhão seguinte.

Uma vez feitos todos os esclarecimentos pertinentes à interpretação do ADC passa-se à descrição propriamente dita. A descrição é acompanhada do fluxograma da Figura 7, no qual, com a finalidade de facilitar a compreensão do leitor, foram identificados os passos mais relevantes do algoritmo com números inseridos em círculos ①, ②, etc. que no texto aparecem indicados entre parênteses com letra itálica (*1*), (*2*), etc..

FIGURA 7: FLUXOGRAMA DO ALGORITMO DE DESIGNAÇÃO DOS CAMINHÕES

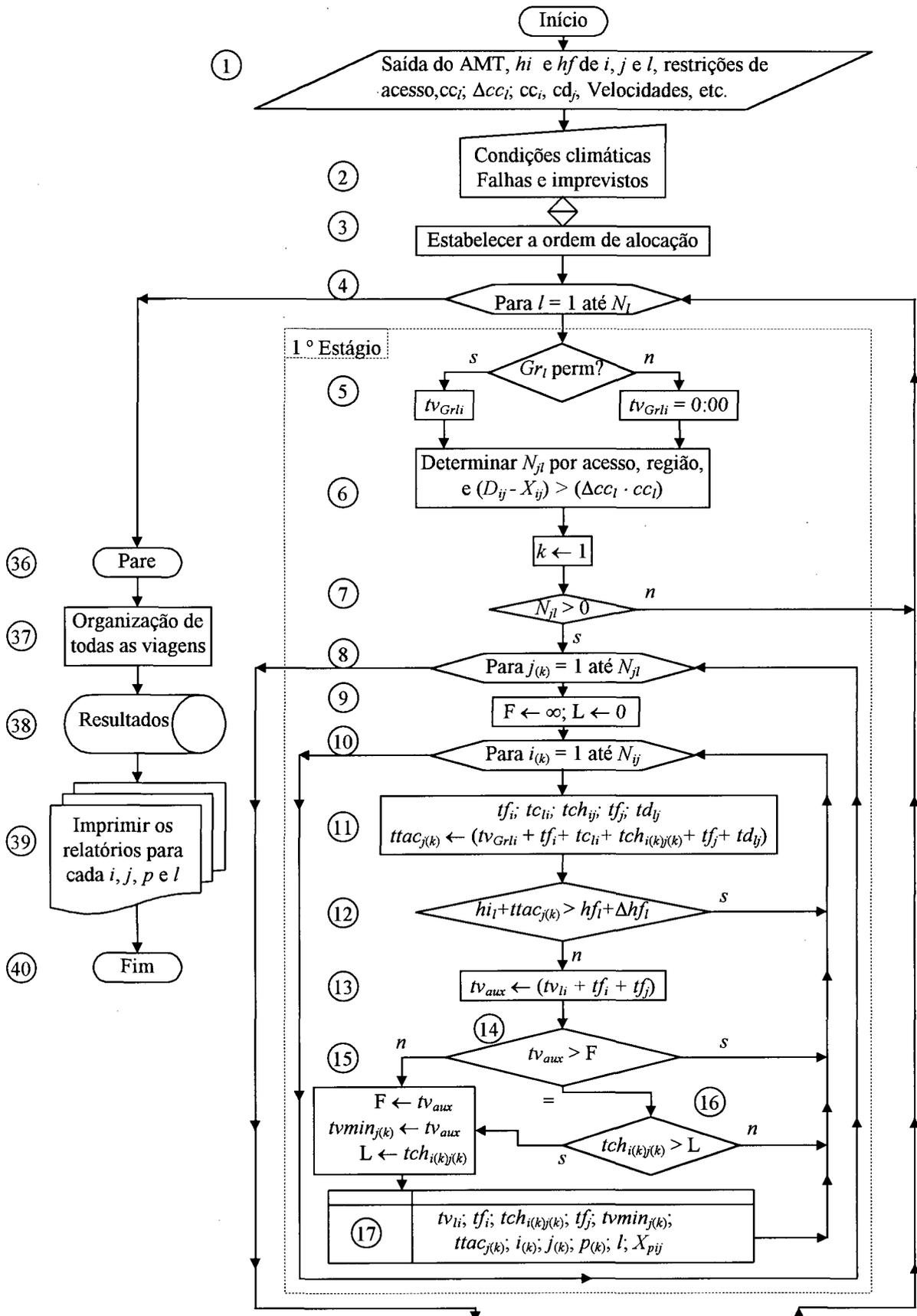
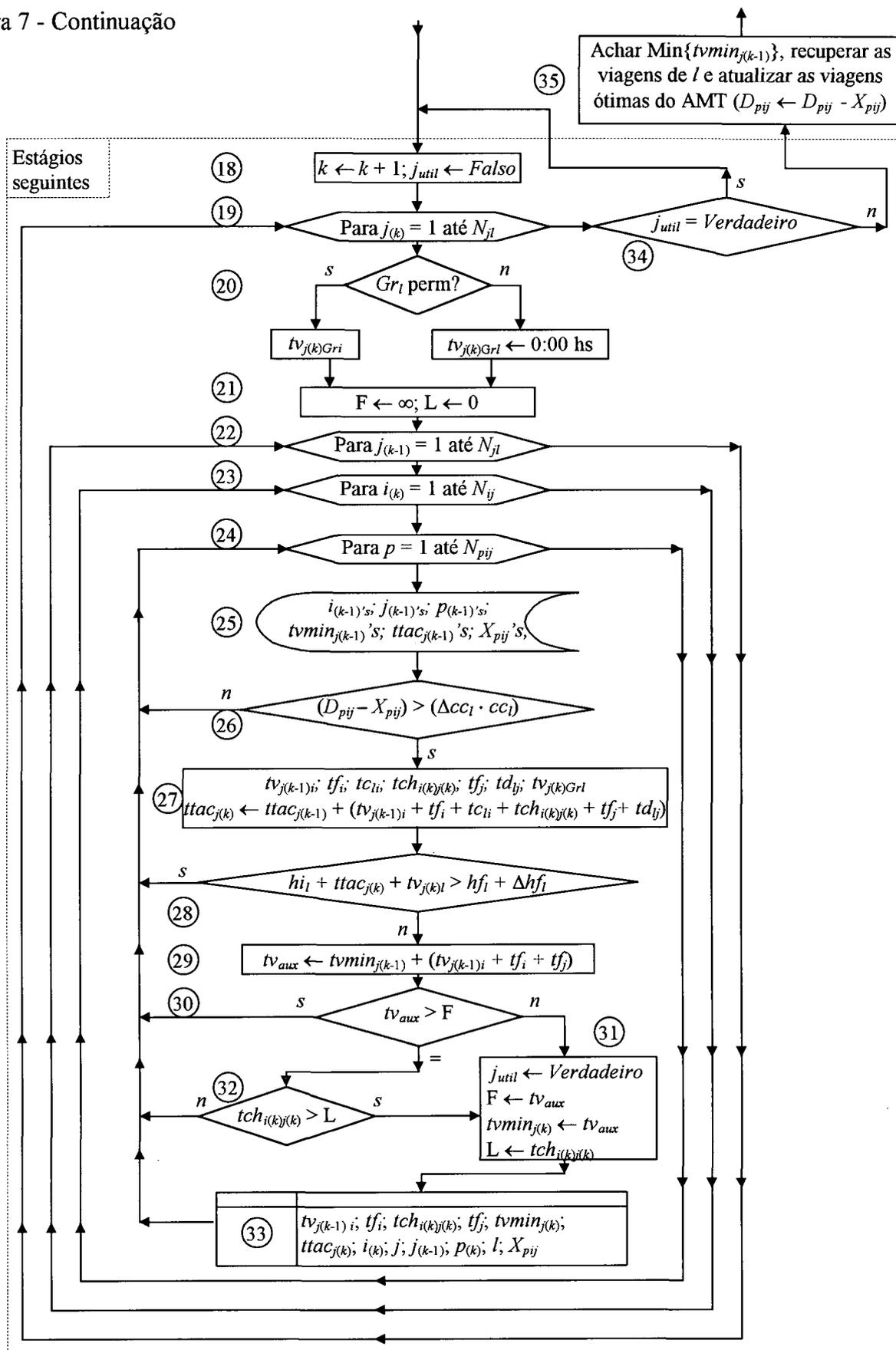


Figura 7 - Continuação



O ADC começa recuperando a informação das viagens carregadas ótimas resultantes do AMT e os dados complementares de horários, capacidades de carga e outros já descritos nos parágrafos anteriores (1). Adicionalmente, deverão ser informadas as condições climáticas do dia e outros imprevistos, isto é regiões com chuva, rotas em mal estado, eventuais falhas mecânicas de caminhões e/ou carregadeiras, etc., para redirecionar as viagens e obter estimativas corretas dos tempos de viagem dos caminhões (2).

A alocação será feita caminhão por caminhão, de modo que é preciso estabelecer a ordem em que eles serão alocados (3). As opções para este ordenamento são: ordenar pelo número do caminhão (ou pelo código); ordenar pela distância à viagem mais longa dentre todas as viagens ótimas; ordenar aleatoriamente, permitindo realizar mais de uma iteração; e ordenar seletivamente (forçar premeditadamente a ordem de alocação). A própria empresa florestal pode decidir qual será a ordem em função dos antecedentes de responsabilidade e pontualidade próprios de cada caminhão.

Como será visto mais adiante, a ordem de alocação é fundamental para os proprietários dos caminhões, já que caminhões são alocados completamente um após o outro (4). Isto conduz a um processo de alocação tipo *greedy*¹⁹. Depois que um caminhão é alocado diminuem as opções de viagens com madeira para os caminhões restantes. Se ocorrer que para um determinado caminhão não existirem viagens possíveis de serem feitas, esse caminhão provavelmente ficará ocioso, ou seja que é prescindível.

Levando em consideração que a variável que está sendo minimizada é o tempo vazio acumulado até o cliente j no estágio k ($tvmin_{j(k)}$) para cada caminhão l ao longo do dia, é

¹⁹ O termo *greedy* (ávido) é utilizado nas heurísticas para caracterizar os processos de alocação ou designação nos quais as opções diminuem na medida que as alocações vão sendo realizadas.

importante conhecer se esse caminhão possui ou não a restrição de ter que sair no início do dia e voltar no final do dia para uma garagem (Gr_l) permanente (5).

Em função dessa restrição, o tempo de viagem vazio desde a garagem Gr_l até o ponto de produção i será considerado nulo se Gr_l não for permanente, isto é o caminhão pode pernoitar no ponto de produção e começar seu dia de trabalho já carregando madeira, ou, se Gr_l for permanente, será calculado em função da distância entre quadrantes e da velocidade através de seguinte fórmula²⁰:

$$tv_{Gr_l} = \frac{\text{distância } (q_{Gr_l} \rightarrow q_i)}{\text{velocidade de } l \text{ vazio}} = \frac{[km]}{[km/h]} = [h] \quad (8)$$

Para o caminhão l que está sendo considerado deve ser determinado o conjunto N_{jl} de clientes j , extraído de todas as viagens ótimas, que podem ser atendidos em função da região, das condições de acesso e do volume que deve ser transportado (6). Este número N_{jl} representa os **estados** possíveis para o caminhão l no seu primeiro **estágio**, ou seja, o primeiro cliente j do caminhão l poderá ser qualquer um dos contidos em N_{jl} . Se o número de clientes N_{jl} for nulo o algoritmo passa para o seguinte caminhão l (7).

O algoritmo deve na seqüência procurar, para cada um dos clientes j contidos em N_{jl} (8), todas as origens i que forneçam algum produto florestal para ele (10). Previamente é estabelecido um valor arbitrariamente elevado para a variável F que controla o menor tempo vazio $tvmin_{j(k)}$, e o valor zero para a variável L que controla o tempo total acumulado $ttac_{j(k)}$ (9).

²⁰ Para todos os casos em que a distância entre dois quadrantes estiver composta por um trecho de estrada de terra e outro de estrada asfaltada (situação muito comum no transporte florestal), os tempos de viagem deverão ser calculados separadamente para a terra e para o asfalto, em função de suas velocidades respectivas, e depois somados para obter o tempo total da viagem considerada.

Uma vez conhecido o tempo de viagem vazio que o caminhão l precisaria para ir desde sua garagem (Gr_i) até o ponto de produção i (tv_{Gr_i}), pode ser obtida a hora na qual o caminhão chegaria no ponto de produção i , isto é, $hi_l + tv_{li}$, e conseqüentemente o tempo de espera em filas (tf_i) caso houver outro caminhão já alocado carregando no ponto de produção i nesse intervalo de tempo (II). Logo na seqüência são estimados o tempo de carga do caminhão l no ponto de produção i (tc_{li}) através da fórmula

$$tc_{li} = \frac{cc_l}{cc_i} = \frac{\left[\frac{m^3}{h} \right]}{\left[\frac{m^3}{h} \right]} = [h] \quad (9)$$

o tempo de viagem cheio desde o ponto de produção i até o cliente j (tch_{ij}) com a fórmula

$$tch_{ij} = \frac{\text{distância } (q_i \rightarrow q_j)}{\text{velocidade de } l \text{ carregado}} = \frac{\left[\frac{km}{h} \right]}{\left[\frac{km}{h} \right]} = [h] \quad (10)$$

e, finalmente, a hora na qual o caminhão l chegaria no cliente j , isto é $hi_l + tv_{Gr_i} + tf_i + tc_{li} + tch_{i(k)j(k)}$ e conseqüentemente o tempo de espera em filas (tf_j) caso houver outro caminhão já alocado descarregando no cliente j nesse intervalo de tempo (II). Por último, é calculado o tempo de descarga do caminhão l no cliente j (td_{lj}) com a fórmula

$$td_{l,j} = \frac{cc_l}{cd_j} = \frac{\left[\frac{m^3}{h} \right]}{\left[\frac{m^3}{h} \right]} = [h] \quad (11)$$

e é determinada a hora na qual o caminhão l estaria pronto para iniciar mais uma viagem ou voltar para sua garagem (II). A variável denominada tempo total acumulado assume o valor da soma de todos os tempos desde a saída da garagem até a finalização da descarga no cliente j no estágio k , ou seja $ttac_{j(k)} \leftarrow (tv_{Gr_i} + tf_i + tc_{li} + tch_{i(k)j(k)} + tf_j + td_{lj})$.

Neste ponto deve ser verificada a factibilidade de horários, ou seja, se o caminhão l pode fazer a viagem que está sendo considerada dentro de seu horário de trabalho

considerando a tolerância para mais do horário de finalização hf_i estabelecida (12). Para o caso de que a viagem considerada seja demorada demais deverá ser procurado, na seqüência, outro ponto de produção para o cliente considerado (10), ou outro cliente para o caminhão considerado, o que é feito de maneira automática quando se variam os estados (8).

Verificada a factibilidade da viagem, passa-se à minimização propriamente dita. Os tempos de viagem vazia e de filas no ponto de produção i e no cliente j são agrupados em uma variável temporária auxiliar denominada tv_{aux} (13). A comparação desta variável auxiliar com a variável F de minimização do tempo vazio acumulado (14) leva a três alternativas:

- se tv_{aux} for maior do que F , procurar em outras origens do cliente j (10) ou em outros clientes para o caminhão l (8);
- se tv_{aux} for menor do que F , foi achado um novo valor mínimo para a variável de otimização, que é o tempo vazio acumulado (15). A variável temporária F e a variável de otimização $tvmin_{j(k)}$ assumem o valor de tv_{aux} , e a variável temporária que controla o tempo de viagem cheia L assume o valor de $tch_{i(k)j(k)}$ (15);
- se tv_{aux} for igual a F , ou seja que foi atingido o mesmo valor mínimo encontrado (situação de empate), passa-se a procurar qual das duas viagens analisadas (a viagem atual e a última mínima encontrada) possui o maior tempo de viagem cheia (16). A finalidade deste última procura é a de tentar designar os caminhões primeiro para as viagens mais prolongadas, visto que os tempos das viagens cheias já foram otimizados com o algoritmo 1 (AMT).

Finalmente, são armazenados na memória temporária todos os clientes $j(k)$ factíveis no estágio k examinados e, para cada um destes clientes, o ponto de produção i que minimiza o tempo vazio acumulado, a quantidade do produto p que seria transportada desde i até j ($X_{p ij}$), o menor tempo vazio acumulado $tvmin_{j(k)}$ e o tempo total acumulado $ttac_{j(k)}$ (17).

Uma vez que foram examinados todos os clientes $j^{(k)}$ pertencentes ao conjunto de clientes N_{jl} que o caminhão l pode atender finaliza o primeiro estágio e começam o segundo e demais estágios. Essencialmente os procedimentos empregados para o segundo e os demais estágios são similares aos do primeiro estágio. Existem, porém, três diferenças que tornam o primeiro estágio diferente dos demais. Estas diferenças serão apresentadas nos parágrafos seguintes.

A primeira diferença é que no primeiro estágio não é dada a cada caminhão l a opção de retornar à sua garagem Gr_l . Esta negação baseia-se no fato de que no primeiro estágio o caminhão sai da garagem, e é impossível, pelo menos na teoria, de que ele volte para a garagem sem ter realizado nenhuma viagem transportando madeira. Nos estágios seguintes sempre deve existir a opção do caminhão voltar para a garagem. Esta opção somente é utilizada quando a jornada de trabalho do caminhão está próxima de terminar. O algoritmo na verdade vai “abrindo” estágios até que não seja possível realizar nenhuma viagem a mais. Esse é o momento de mandar o caminhão de volta para sua garagem. Se em um estágio não existe nenhum cliente que possa ser atendido dentro do horário de trabalho do caminhão l só resta a ele retornar à sua garagem Gr_l (34). A partir desse momento começa o processo de reconstrução das viagens ótimas que permitem ao caminhão l minimizar a soma dos tempos de viagem vazio e de espera em filas nos pontos de produção i e/ou nos clientes j (35). Se houver algum cliente j passível de ser atendido, a variável binária de controle j_{util} assume o valor *Verdadeiro* (31). O algoritmo tentará alocar o caminhão para mais um estágio (cliente) forçando a variável binária de controle j_{util} a assumir novamente o valor *Falso* e incrementando em uma unidade a variável k que identifica o número do estágio (18).

A segunda diferença é que na hora de procurar a combinação ótima para atender cada um dos clientes seguintes $j^{(k)}$ (19) deve ser considerada a possibilidade do caminhão vir de cada

um dos clientes anteriores $j_{(k-1)}$ (22) e seus correspondente tempos de viagem vazia $tv_{j_{(k-1)}i_{(k)}}$ dados pela fórmula

$$tv_{j_{(k-1)}i} = \frac{\text{distância } (q_{j_{(k-1)}} \rightarrow q_i)}{\text{velocidade de } l \text{ vazio}} = \frac{[km]}{[km/h]} = [h] \quad (12)$$

Obviamente deve ser recuperada a informação da combinação ótima encontrada para o cliente anterior (25) para levar em consideração, por exemplo, se o cliente estiver se repetindo nos diferentes estágios e não houver uma quantidade demandada ótima suficiente como para realizar mais de uma viagem do caminhão l (26). Pode ocorrer que o cliente j se repita mas com outro ponto de produção i como fornecedor do produto p , ou até o mesmo ponto de produção i mas com outro produto p . Por este motivo é considerada mais uma opção de busca por produto (24). E no caso extremo, se estiverem sendo considerados o mesmo cliente j , o mesmo ponto de produção i e o mesmo produto p , pode ocorrer que a quantidade demandada seja suficiente para realizar mais de uma viagem. Este último controle é feito utilizando a variável X_{pij} que reúne a informação de qual teria sido o volume do produto p transportado desde o ponto de produção i até o cliente j (26).

A terceira diferença refere-se à factibilidade de o caminhão l ter tempo suficiente não só para levar madeira até o cliente $j_{(k)}$, senão também de, eventualmente, voltar depois para sua garagem. Para isso é calculado o tempo vazio para voltar desde o cliente $j_{(k)}$ até a garagem de l ($tv_{j_{(k)}Grl}$) (20), se a garagem for permanente; caso contrário esse tempo vazio assume o valor zero. O cliente $j_{(k)}$ só será considerado como um cliente factível se for possível ao caminhão l retornar posteriormente à sua garagem (28). É claro que se não for possível voltar à garagem desde nenhum cliente $j_{(k)}$, a designação do caminhão l termina com o melhor cliente $j_{(k-1)}$ encontrado.

Existem outras pequenas diferenças no que se refere ao cálculo dos tempos. O tempo total acumulado até o cliente seguinte $ttac_{j(k)}$ deve obviamente incluir o total acumulado até o cliente anterior $ttac_{j(k)}$ (27). A variável tv_{aux} inclui, além do tempo vazio desde o último cliente até o ponto de produção i , $tv_{j(k-1)i}$, e os tempos de espera em filas tf_i e tf_j , o menor tempo vazio acumulado até o cliente anterior $tvmin_{j(k)}$ (29).

De maneira análoga a como foram armazenados na memória temporária todos os clientes j factíveis examinados no primeiro estágio (17), no segundo e demais estágios deve ser registrada, para cada um dos clientes $j(k)$, a combinação de cliente anterior $j(k-1)$ e ponto de produção i que minimizam o tempo vazio acumulado, a quantidade do produto p que seria transportada desde i até j (X_{pij}), o menor tempo vazio acumulado $tvmin_{j(k)}$ e o tempo total acumulado $ttac_{j(k)}$ (33).

Aqueles pontos não mencionados especificamente do segundo e demais estágios são similares aos correspondentes do primeiro estágio. Assim sendo, (21) é igual a (8), (30) é igual a (14), e (32) é igual a (16).

Por último, quando já foram designados todos os caminhões disponíveis, o algoritmo detém-se (36), organiza todas as viagens no que se refere aos horários de saída e chegada às garagens, pontos de produção e clientes levando em consideração os eventuais tempos de espera em filas (37), guarda esses resultados em meio magnético (38), imprime todos os relatórios necessários por caminhão, ponto de produção e cliente (39), e finaliza (40).

Deve-se salientar que a finalidade do SPT não é minimizar exclusivamente os tempos de espera em filas nos pontos de produção tf_i e nos clientes tf_j . Esta opção é desejável mas a finalidade última do sistema é minimizar a soma dos tempos das viagens vazias e de espera em filas. Pode perfeitamente ocorrer que na solução ótima apareçam certos tempos de espera em filas não nulos. Isto apenas indicaria que é preferível, para o caminhão que está sendo

considerado, aguardar certo tempo em uma fila do que ir para outro ponto de produção mais distante, e que consumiria conseqüentemente um tempo de viagem vazia maior.

4.1.2.2 Resultados da aplicação do Algoritmo de Designação dos Caminhões

Para a execução do Algoritmo de Designação dos Caminhões (ADC) foram transformados aos resultados ótimos mensais, obtidos pelo AMT na Tabela 19, para programar o transporte de um dia em particular. Para o caso foi considerada uma segunda-feira, de maneira que cada uma das quantidades ótimas da Tabela 19 foi dividida pelo número de horas úteis do mês considerado, ou seja 516 hs. para o mês de Novembro de 1997 (ver página 74) e multiplicada pelo número de horas úteis do dia em questão, isto é, 18 hs. úteis para uma segunda feira.

O ADC aplicado aos dados transformados como descrito acima forneceu o Programa de Transporte apresentado na Tabela 20. As referências com respeito ao cabeçalho da Tabela 20 podem ser encontradas na seção 3.2.4 - Nomenclatura e simbologia adotadas.

TABELA 20: PROGRAMA DE TRANSPORTE ÓTIMO GERADO PELO ALGORITMO DE DESIGNAÇÃO DOS CAMINHÕES PARA UMA SEGUNDA-FEIRA

<i>l</i>	<i>hsg</i>	<i>i</i>	<i>p</i>	<i>hci</i>	<i>tfi</i>	<i>hsi</i>	<i>Vt</i> [t]	<i>Oc</i> [t]	<i>j</i>	<i>hcj</i>	<i>tff</i>	<i>hsj</i>	<i>hcg</i>	<i>c_{ij}</i> [R\$/t]	<i>c_{ij} × Vt</i> [R\$]
1	00:00	3	2	00:00	00:00	00:34	35	0	3	04:48	00:00	05:05		3,14	109,90
1		1	6	05:48	00:00	06:22	34	1	2	07:51	00:00	08:08	08:51	3,50	119,00
2	00:00	2	6	00:00	00:00	00:35	35	0	1	04:12	00:00	04:29		7,65	267,75
2		4	1	05:50	00:00	06:25	35	0	5	09:09	00:00	09:27	11:13	5,94	207,90
3	00:00	7	6	00:00	00:00	00:28	35	0	4	04:38	00:00	04:52		6,34	221,90
3		4	1	06:13	00:21	07:02	35	0	5	09:46	00:00	10:00	11:43	5,94	207,90
4	00:00	8	1	00:00	00:00	00:39	39	6	5	04:49	00:00	05:08		8,42	328,38
4		3	7	06:51	00:00	07:30	38	7	1	11:00	00:00	11:20	12:41	6,72	255,36
5	00:00	1	2	00:00	00:00	00:38	45	0	3	04:35	00:23	05:17		3,14	141,30
5		7	6	07:00	00:00	07:34	40	5	4	11:44	00:00	12:01	13:44	6,34	253,60
6	00:00	5	6	00:00	00:00	00:42	42	3	4	04:19	00:30	05:10		6,34	266,28
6		6	1	06:53	00:00	07:27	34	11	5	10:57	00:00	11:14	13:24	6,72	228,48
7	00:00	4	1	00:00	00:00	00:38	45	0	5	03:22	00:11	03:52		5,94	267,30
7		2	6	05:38	00:00	06:16	45	0	4	09:53	00:00	10:12	11:58	6,34	285,30
8	00:00	2	8	00:00	00:35	00:51	16	0	2	02:20	00:00	02:28		3,50	56,00
8		2	8	03:11	00:00	03:27	8	8	2	04:56	00:00	05:04	05:47	3,50	28,00
9	00:00	8	3	00:00	00:39	00:54	15	1	2	02:23	00:05	02:35		3,50	52,50
9		1	4	03:18	00:00	03:33	16	0	1	07:10	00:00	07:18	09:01	7,65	122,40
10	00:00	3	5	00:00	00:34	00:56	22	0	1	04:26	00:03	04:40		6,72	147,84
10		3	5	06:23	00:00	06:45	16	6	1	10:15	00:00	10:26	11:47	6,72	107,52
11	00:00	1	9	00:00	00:38	00:56	18	4	1	04:33	00:03	04:45		7,65	137,70
11		2	6	06:31	00:00	06:47	22	0	4	10:24	00:00	10:32	12:15	6,34	139,48
12	00:00	6	6	00:00	00:00	00:10	10	2	1	03:40	00:14	03:59		6,72	67,20
12		5	8	05:45	00:00	05:55	10	2	2	07:24	00:07	07:36	08:19	3,50	35,00
13	00:00	5	7	00:00	00:42	01:10	28	7	1	04:47	00:00	05:01		7,65	214,20
13		2	6	06:47	00:00	07:14	27	8	4	10:51	00:13	11:17	13:03	6,34	171,18
14	00:00	7	1	00:00	00:28	00:54	35	0	5	05:04	00:05	05:22		8,42	294,70
14		2	1	07:08	00:07	07:42	35	0	5	11:19	00:04	11:36	13:22	7,65	267,75
15	00:00	2	6	00:00	00:51	01:26	35	0	1	05:03	00:00	05:20		7,65	267,75
15		8	6	07:30	00:00	07:56	35	0	4	12:06	00:00	12:19	14:02	6,34	221,90
16	00:00	8	6	00:00	00:54	01:39	45	0	4	05:49	00:00	06:11		6,34	285,30
16		8	6	08:21	00:00	09:06	45	0	4	13:16	00:00	13:39	15:00	6,34	285,30
17	00:00	2	1	00:00	01:26	02:11	45	0	5	05:48	00:00	06:10		7,65	344,25
17		2	1	07:56	00:00	08:41	45	0	5	12:18	00:36	13:17	15:00	7,65	344,25
18	00:00	2	1	00:00	02:11	02:56	45	0	5	06:33	01:15	08:11		7,65	344,25
18		2	1	09:57	00:00	10:42	45	0	5	14:19	00:16	14:57	17:07	7,65	344,25

7439,07

Fonte: Pesquisa

4.1.2.3 Discussão dos resultados do Algoritmo de Designação dos Caminhões

Um aspecto do ADC que merece ser abordado com profundidade e cautela é a ordem em que são designados os caminhões. Na Tabela 20 a designação dos caminhões foi seqüencial, ou seja, a ordem de designação foi 1, 2, 3, 4, 5, e assim por diante até os caminhões 16, 17 e 18. É provável que os resultados se modifiquem, para os caminhões considerados de maneira individual, se a ordem de designação fosse outra, mas de maneira global é de se esperar que os resultados não sejam alterados de uma maneira drástica, isto é, que não apareçam grandes congestionamentos em determinados pontos de produção e/ou clientes, quando for alterada a ordem de designação dos caminhões. Na verdade a ordem de designação afetaria mais os resultados individuais de cada caminhão, uma vez que o algoritmo ADC procura, para cada caminhão que é otimizado, as melhores opções, levando em consideração todos os caminhões anteriormente designados e sem se preocupar pelos caminhões seguintes.

O ADC pode, em teoria, ser executado antecipadamente para todos os dias úteis do mês, mas a variabilidade climática e os imprevistos tornam necessária sua execução diária, a fim de garantir programas de transporte confiáveis. Porém, com a finalidade de auxiliar na tomada de decisões estratégicas como, por exemplo, o dimensionamento da frota de caminhões necessária, poderiam ser realizadas simulações onde o ADC fosse executado para períodos maiores do que um dia. Neste caso seria altamente recomendável criar diversos cenários, desde os mais otimistas até os mais pessimistas, para ter uma noção mais realista das situações que poderão ocorrer e sua influência sobre o dimensionamento da frota de caminhões.

4.2 DISCUSSÃO GERAL DOS RESULTADOS DO SISTEMA DE PROGRAMAÇÃO DO TRANSPORTE DE MULTIPRODUTOS FLORESTAIS

Talvez a primeira impressão do leitor seja a de que o SPT esteja aumentando a rentabilidade dos proprietários da frota terceirizada de caminhões em vez de estar reduzindo os custos de transporte principal para a empresa florestal. Nesse sentido o leitor tem razão em parte, como será explicado nos parágrafos seguintes.

O primeiro benefício direto para a empresa florestal é o decorrente da execução do AMT. Este algoritmo minimiza globalmente e de uma maneira exata a soma dos preços pagos pela empresa florestal aos proprietários dos caminhões correspondentes às viagens carregadas com madeira de toda a frota terceirizada. Embora estas viagens carregadas representem a renda dos proprietários dos caminhões, qualquer solução não mínima encontrada representaria maiores custos para a empresa florestal e maiores receitas para os proprietários dos caminhões. É claro que se cada cliente requerer um tipo de produto florestal particular, e o ponto de produção que o fornecer for estabelecido com anterioridade à otimização do AMT, resta a este último algoritmo praticamente nenhuma utilidade no SPT.

O segundo benefício é o decorrente da programação de todas as viagens de cada caminhão de maneira a minimizar a soma dos tempos das viagens vazias e os tempos de espera em filas (ADC). É neste ponto que se poderia concluir que, na verdade, é a renda líquida dos proprietários dos caminhões que está aumentando, devido ao fato de que os caminhões permanecem menos tempo ociosos durante o dia, isto é, os proprietários dos caminhões faturam mais. Mas a empresa florestal, ciente previamente desta situação, possui uma ferramenta muito importante para renegociar os preços unitários, detalhados na Tabela 18, pagos atualmente pelo transporte principal dos produtos florestais. É desta maneira que a

empresa florestal obtém um benefício adicional, já que uma renegociação dos preços pagos pelo transporte principal ocasionaria uma redução nos custos de todo o sistema de transporte principal.

Os custos unitários de transporte principal variam de R\$ 3,14 até 8,42 /t (Tabela 18). Qualquer redução aplicada a estes valores, por mínima que seja, ao ser ponderada pelos grandes volumes transportados se traduziria em reduções importantes no custo de transporte florestal principal para a empresa florestal.

A execução do SPT finaliza quando não restar mais nenhum caminhão para ser designado nesse dia ou quando forem exauridas todas as quantidades de todos os produtos florestais que deviam ser transportadas no dia para o qual foi realizada a programação.

Poderia ser obtido até um benefício adicional se fosse flexibilizada a unidade de tempo considerada, isto é, se o período noturno entre duas jornadas de trabalho fosse também otimizado. Desta maneira um caminhão poderia terminar um dia qualquer de trabalho com meia viagem realizada; dito com outras palavras, o caminhão aludido carregaria em um dia e só realizaria a entrega no dia seguinte, correspondendo ao motorista escolher o melhor momento durante a noite para realizar a viagem carregada com madeira. Esta opção permitiria ao caminhão, por exemplo, realizar em dois dias consecutivos uma viagem e meia por dia, totalizando três viagens de madeira no período, em vez de realizar uma viagem por dia durante três dias.

O SPT gera, adicionalmente, um benefício extremamente importante que é o fato de permitir um controle minucioso de todas as atividades vinculadas ao transporte florestal principal, tanto no espaço como no tempo. Através da análise minuciosa dos resultados do SPT, cujo detalhamento foi apresentado na maneira de um exemplo na Tabela 20, a Gerência de Transportes pode detectar quais os pontos de produção que estarão mais congestionados

durante o dia, isto é, onde ocorrerão provavelmente as filas, e, de posse de toda a programação diária do transporte, alterar manualmente as viagens de um ou mais caminhões no caso da ocorrência de imprevistos.

A tendência da empresa florestal para a qual foi desenvolvido o SPT é a de trabalhar com uma frota conformada exclusivamente por caminhões em regime de 24 hs. Quando for atingido esse objetivo seria possível até prescindir do dia como unidade de tempo; a otimização seria então realizada para períodos de duração variável, maiores do que 24 hs. Esta situação permitiria melhorar ainda mais a otimização do transporte florestal principal de multiprodutos florestais.

Atualmente o SPT está na fase inicial de implementação. Esta fase pode ter uma duração variável, que dependerá principalmente da velocidade com que os atores do sistema (maquinistas, motoristas, técnicos, fiscais, e a gerência de transportes da empresa florestal) se adaptem à nova situação, onde cada um dos eventos que devem ocorrer ao longo do dia possui uma hora predeterminada de ocorrência e uma duração preestabelecida.

Os resultados reportados por outros pesquisadores ao ser concluída a implementação dos sistemas de programação de transporte florestal semelhantes ao tratado no presente trabalho são muito animadores. SCHILKRUT e WURMANN (1993) e WEINTRAUB *et al.* (1996), por exemplo, reportaram melhorias na eficiência operacional dos transportes na ordem de 10 % a 30 %, após a utilização do ASICAM nas oito principais empresas florestais do Chile, medidos na redução dos custos ou no aumento da capacidade de transporte com a mesma frota.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os efeitos da aplicação de um Sistema de Programação ao transporte florestal principal são muitos e bem variados no que se refere às áreas de conhecimento e aos âmbitos de gestão.

O Sistema de Programação de Transporte (SPT) desenvolvido constitui uma ferramenta sumamente útil para o planejamento do transporte principal de multiprodutos florestais, ao programar com precisão, para cada um dos caminhões utilizados, os horários de cada uma das viagens. Os programas de Transporte gerados pelo SPT incluem:

- saídas das garagens;
- chegadas aos pontos de produção;
- eventuais tempos de espera em filas nos pontos de produção;
- cargas;
- saídas dos pontos de produção;
- chegadas aos clientes;
- eventuais tempos de espera em filas nos clientes;
- descargas; e,
- ao final do dia, os retornos às garagens

A confiabilidade dos Programas de Transporte gerados pelo SPT depende: 1) da acuracidade com que são estimados os tempos de todas as atividades levadas em consideração, ou seja, os tempos das viagens carregadas e vazias, com e sem chuva, os tempos de carga e

descarga para cada caminhão em cada ponto de produção e em cada cliente, os horários de início e finalização das atividades dos caminhões, pontos de produção e clientes, e 2) da precisão com que são informadas as quantidades de cada tipo de produto florestal produzidas e estocadas em cada ponto de produção, requeridas para cada cliente, e transportadas através de cada caminhão.

A disciplina que inexoravelmente deve caracterizar todo o processo de implantação do SPT constitui, pelo menos no início, um fator que pode comprometer ligeiramente os resultados da otimização.

O Algoritmo do Modelo de Transporte (AMT) garante a minimização dos custos pagos pelas viagens carregadas com madeira. O AMT deve ser executado separadamente para cada um dos produtos florestais que devam ser transportados. Neste sentido, uma subdivisão excessiva dos multiprodutos florestais torna supérflua a utilização do AMT, já que se cada cliente diferencia-se dos demais pelo tipo de produto florestal requerido a otimização somente poderá ser atingida quando forem consideradas as viagens dos caminhões, isto é, com o Algoritmo de Designação dos Caminhões.

O Algoritmo de Designação dos Caminhões (ADC) otimiza a jornada de trabalho separadamente para cada um dos caminhões utilizando a Programação Dinâmica e minimizando, de maneira simultânea, os tempos das viagens vazias e de espera em filas. Como estes tempos na verdade não representam custos para a empresa florestal, a melhoria na eficiência da frota terceirizada é um sólido argumento para que a empresa florestal renegocie os preços unitários pagos pelo transporte principal de produtos florestais.

Para estabelecer a ordem na qual devem ser designados os caminhões são utilizadas regras heurísticas. Uma das opções consideradas é a de alocar, de cada vez, uma proporção dos caminhões que cada proprietário possui. Outra opção é a alocação arbitrária dos

caminhões em função dos antecedentes de responsabilidade, pontualidade e as condições mecânicas de cada um deles. O critério definitivo deverá ser decidido pelos responsáveis do transporte principal da empresa florestal para a qual foi desenvolvido o Sistema de Programação do Transporte - SPT.

O ADC é executado para cada caminhão considerando todos os horários das designações realizadas com anterioridade. O ADC conduz a resultados ótimos para o caminhão que é considerado mas globalmente a execução consecutiva do ADC para todos os caminhões pode ser caracterizada como um procedimento *greedy*, uma vez que para cada caminhão ela procura a combinação ótima que minimize os tempos das viagens vazias e de espera em filas, levando em consideração as designações anteriores e sem se preocupar pelos caminhões ainda não designados.

Do ponto de vista da racionalização do recurso e da redução de desperdício, pode-se afirmar que o SPT, assim como qualquer outro sistema de otimização aplicado a alguma fase do processo produtivo da matéria prima florestal, contribui significativamente nos seguintes aspectos:

- A utilização mais eficiente da frota de caminhões reduz a utilização de combustíveis fósseis e a conseqüente poluição ao ambiente, além de exigir menores esforços e recursos destinados à manutenção dos caminhos e estradas, dos pátios de abastecimento, e inclusive dos próprios caminhões;
- Os Programas de Transporte gerados pelo SPT permitem atingir níveis maiores de organização e controle das atividades vinculadas ao transporte florestal principal. Inclusive podem até ser antecipadas determinadas situações comprometedoras como a impossibilidade de utilização de determinadas rotas e a procura de rotas alternativas, a saída de serviço para manutenção dos caminhões, dentre outras.

O SPT contribui ao fenômeno de profissionalização crescente das atividades próprias do processo produtivo florestal, necessária e iniludível para enfrentar os tempos de competitividade cada vez maior que aguardam ao setor florestal no próximo milênio. Neste contexto, as Universidades geradoras e detentoras da excelência do conhecimento, devem inserir-se de maneira a auxiliar o setor florestal gerando ciência e tecnologia através de programas de pesquisa direcionados e dos cursos de Pós-Graduação.

Recomenda-se prosseguir com as pesquisas direcionadas aos sistemas de otimização vinculados ao manejo florestal em duas linhas principais:

1. Sistemas de Otimização global de toda a frota de transportes, via Programação Linear Inteira, redes de transporte, ou outras técnicas da Pesquisa Operacional; e,
2. Sistemas de Otimização conjunta do manejo florestal de médio e longo prazos associados ao transporte principal de multiprodutos florestais. Desta maneira o manejo pode ser convenientemente orientado para fornecer, levando em consideração as distâncias e os custos do transporte principal, os sortimentos conforme as necessidades dos clientes, que são relativamente previsíveis no médio e longo prazos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARDUINO, A., 1972. **Programação Dinâmica**. COPPE, UFRJ. 162 p.

BALLONI, E. A., 1997. Conjuntura florestal: situação atual e tendência dos reflorestamentos no Brasil. **In:** 1º painel sobre ciência e conjuntura florestal na pós-graduação. Palestra proferida em 6/11/97.

BARROS, O. e WEINTRAUB, A., 1982. Planning for a Vertically Integrated Forest Industry. **Operations Research**, **30(6)**: 1168-1182.

BAUSCH, D. O.; BROWN, G. G. e RONEN, D., 1995. Consolidating and dispatching trucks shipments of mobil heavy petroleum products. **Interfaces** **25**: 1-17.

BELLMAN, R. E. e DREYFUS, S. E., 1962. **Applied Dynamic Programming**. Princeton University Press, Princeton, NJ. 363 p.

BEROGGI, G. E. G. e WALLACE, W. A., 1995. Operational control of the transportation of hazardous materials: an assessment of alternative decision models. **Mgmt. Sci.** **41 (12)**: 1962-1977.

BERTHOLDI COSTA, D. M., 1997. **Aplicação de algumas técnicas de Pesquisa Operacional na otimização dos serviços postais**. Dissertação de Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia. UFPR.

BERTSIMAS, D. J., 1992. A vehicle routing problem with stochastic demand. **Opns. Res.** **40 (3)**: 574-585.

BIELLI, M.; AMBROSINO, G.; BOERO, M. e MASTRETTA, M., 1991. Artificial intelligence techniques for urban traffic control. **Transpn. Res.** **25A**: 319-325.

BOWERMAN, R.; HALL, B. e CALAMI, P., 1995. A multi-objective optimization approach to urban school bus routing: formulation and solution method. **Transpn. Res.** **29A (2)**: 107-123.

BRAMEL, J. e SIMCHI-LEVI D., 1997. On the effectiveness of set covering formulations for the vehicle routing problem with time windows. **Opns. Res.** **45 (2)**: 295-301

- BULLOK, D.; GARRET Jr., J. e HENDRICKSON, C., 1993. A neural network for image-based vehicle detection. **Transpn. Res.** 235-247.
- BUONGIORNO, J. e GILLESS, J. K., 1987. **Forest management and economics. A primer in Quantitative Methods.** Macmillan Publishing Co. New York. 285 p.
- CARNIERI, C., 1989. **Planejamento florestal otimizado via redes de manejo.** Tese de Doutorado em Eng. Elétrica. Depto. de Engenharia de Sistemas, UNICAMP. 144 p.
- _____; SIMIENA, H. H. e MAZZAROTTO M., 1983. Programa integrado de transporte de soja. **In:** V Congresso da Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional (SOBRAPO), Florianópolis. 20-32.
- CHRISTOFIDES, N.; MINGOZZI, A. e TOTH, P., 1981. State-Space relaxation procedures for the computation of bounds to routing problems. **Networks 11:** 145-164.
- DESROCHERS, M.; DESROSIERS, J. e SOLOMON, M., 1992. A new optimization algorithm for the vehicle routing problem with time windows. **Opns. Res. 40 (2):** 342-354.
- DYKSTRA, D. P., 1984. **Mathematical programming for natural resource management.** McGraw Hill Book Co. New York. 318 p.
- FISHER, M. L., 1994. Optimal solution of vehicle routing problems using minimum K-trees. **Opns. Res. 42 (4):** 626-642.
- _____; JÖRNSTEN K. O. e MADSEN O. B. G., 1997. Vehicle routing with time windows: two optimization algorithms. **Opns. Res. 45 (3):** 488-492.
- GOLDEN, B. L.; MAGNANTI, T. L. e NGUYEN, H. Q., 1977. Implementing vehicle routing algorithms. **Networks 7:** 113-148.
- HOTVEDT, J. E.; LEUSCHNER, W. A. e BUHYOFF, G. J., 1982. A heuristic weight determination procedure for goal programs used for harvest scheduling models. **Can. J. For. Res. 12 (2):** 292-298.
- JONES, J. G.; HYDE, J. F. C., III e MEACHAM, M. L., 1986. **Four analytical approaches for integrating land management and transportation planning on forest lands.** Research Paper INT-361. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station. 33 p.
- KOHL, N. e MADSEN, O. B. G., 1997. An optimization algorithm for the vehicle routing problem with time windows based on Lagrangian relaxation. **Opns. Res. 45 (3):** 395-406.

- KOURTZ, P. 1988. Two dynamic programming algorithms for forest fire resources dispatching. **Can. J. For. Res.** **19 (1)**: 106-112.
- LOUCKS, D. P., 1964. The Development of an Optimal Program for Sustained-Yield Management. **Journal of Forestry** **62**: 485-490 p.
- MURTY, K. G., 1985. **Linear and combinatorial programming**. Robert E. Krieger Publishing Co. Malabar, Florida. 567 p.
- NEWNHAM, D. H., 1975. **Logplan: A model for planning logging operations**. Ottawa. Information Report FMR-X, 77. 59 p.
- PARLAR, M. e VICKSON, R. G., 1982. Optimal forest fire control: an extension of Park's model. **For. Sci.** **28**: 345-355.
- PRACTICAL Basic Programs – Apple II, 1983. 93-102.
- ROBUSTÉ, F.; DAGANZO, C. F. e SOULEYRETTE II, R. R., 1990. Implementing vehicle routing models. **Transpn. Res.** **24 (4)**: 263-286.
- RODA, S. M., 1996. Treinamento: outra prioridade no projeto. **Eu Rodo**, Publicação bimestral da Volvo do Brasil Veículos Ltda., Ano XIV, Nº 77: 14-15.
- RONEN, D., 1988. Perspectives on practical aspects of trucks routing and scheduling. **European Journal of Operational Research** **35**: 137-145.
- RÖNNQVIST, M. e RYAN, D., 1997. **Solving trucks dispatch problems in real time**. Division of Optimization / MAI, Linköping Institute of Technology, Sweden. 15 p.
- RUSSELL, R. A. e CHALLINOR, P. E., 1988. Effective methods for petroleum tank truck dispatching. **Comp. & Opns. Res.** **15 (4)**: 323-331.
- SANQUETTA, C. R.; VOLPI, N. M. P. e CARNIERI, C., 1997. Otimização do empreendimento florestal. estudo de caso para reflorestamento de Pinus. **In**: Curso de Manejo Florestal Sustentável. Embrapa, Colombo, PR.
- SCHILKRUT, A. C. e WURMANN, D. K., 1993. Desarrollo de modelos matemáticos aplicados al transporte en el sector forestal. **Ingeniería de Sistemas** **10(2)**.
- SCHNEIDER, P. R.; MAYER KLEIN, J. E.; FINGER, C. A. G.; HOPPE, J. M. e ELESBÃO, L. E., 1991. Determinação da área basal para a decisão entre condução da brotação e reforma de povoamentos de *Eucalyptus grandis*. **In**: VI Jornadas técnicas: Inventarios -

- Modelos de producción y crecimiento forestales. Eldorado, Misiones, de 9 a 11 de outubro de 1991. 344-361 p.
- SCOLFORO, J. R. S., 1990. **Sistema integrado para predição e análise presente e futura do crescimento e produção, com otimização de remuneração de capitais para *Pinus caribaea* var. *hondurensis***. Tese de Doutorado, UFPR. 290 p.
- SEIXAS, F., 1992. **Uma metodologia de seleção e dimensionamento da frota de veículos rodoviários para o transporte principal de madeira**. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). USP. São Carlos - SP, Brasil. 106 p.
- _____. e WIDMER, J. A., 1993. Seleção e dimensionamento da frota de veículos rodoviários para o transporte principal da madeira utilizando-se de Programação Linear não-inteira. **IPEF, Piracicaba (46)**: 107-118.
- SPEIDEL, G., 1966. **Economia Florestal**. UFPR. Curitiba, Paraná, Brasil. 167 p.
- TAHA, H. A., 1994. **Investigación de Operaciones**. 5ª ed. Ed. Alfaomega, México. 960 p.
- TERRAB, M. e ODoni, A. R., 1993. Strategic flow management for air traffic control. **Opns. Res. 41 (1)**: 138-152.
- WARE, G. O e CLUTTER, J. L., 1971. A Mathematical Programming System for the Management of Industrial Forests. **For. Sci. 17**: 428-445 p.
- WATERS, C. D. J. e BRODIE, G. P., 1987. Realistic sizes for routing problems. **J. Opl. Res. Soc. 38(6)**: 565-566.
- WEINTRAUB, A.; BARAHONA, F. e EPSTEIN, R., 1994. A column generation algorithm for solving general forest planning problems with adjacency constraints. **For. Sci. 40(1)**: 142-161.
- _____, EPSTEIN, R.; MORALES, R. e SERON, J., 1990. Un sistema de asignación al transporte de productos forestales. **Ingeniería de Sistemas 7(1)**: 73-81.
- _____; _____; _____; _____. e TRAVERSO, P., 1996. A truck scheduling system improves efficiency in the forest industries. **Interfaces 26 (4)**: 1-12.
- YOSHIMOTO, A.; BRODIE, J. D. e SESSIONS, J., 1994. A new heuristic to solve spatially constrained long-term harvest scheduling problems. **For. Sci. 40(3)**: 365-396.
- ZAMBONI, L. V. S., 1997. **Técnicas de roteirização de veículos aplicadas ao transporte escolar**. Dissertação de Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia. UFPR.