

ARTIGO

META HEURÍSTICA *TABU SEARCH* APLICADA AO PROBLEMA DE PROJETO DE REDES DE TRANSPORTE

Leonardo Campo Dall'Orto

José Eugenio Leal

Departamento de Engenharia Industrial
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Teodor Gabriel Crainic

Centre de Recherche sur les Transports
Université de Montréal

RESUMO

Na otimização clássica o problema de projetos de redes de serviço é formulado como um problema inteiro misto. Esta abordagem resulta em uma formulação com um número grande de variáveis e restrições. Utilizar técnicas de enumeração para resolver este problema é extremamente dispendioso em relação ao tempo computacional, quando se trabalha em um contexto dinâmico este problema é ainda mais contundente. Nossa idéia é decompor a rede em vários subproblemas enraizados em um terminal (nó) e resolvê-los um a um. Cada subproblema representa a operação de um despachante em um dado período e iteração. A estratégia de solução para cada subproblema é encontrar uma solução inicial factível e aprimorá-la utilizando uma meta-heurística. No nosso caso, usaremos a idéia das cadeias de ejeção e técnicas de busca na vizinhança encontradas na meta-heurística *tabu search*. O objetivo é encontrar rapidamente uma solução de alta qualidade.

ABSTRACT

In a classical optimization, the service network design problem is formulated as a mixed integer problem. This approach results in a

large number of constraints and variables. Using enumeration techniques to solve this problem is extremely time-consuming, and when we represent it in a dynamic context it's even worse. Our idea is to decompose the network by terminal (node) and solve several sub-problems. Each sub-problem represents the operation of the carrier, at a given time period an iteration. The strategy for each sub-problem is: find an initial feasible solution and improve it by a metaheuristic procedure. In our problem we'll use the idea of ejection chains and tabu search techniques. The objective is to quickly identify a high quality solution.

1. INTRODUÇÃO

O transporte de carga é de vital importância na economia de um país. Ele suporta a produção, comercialização e atividades de consumo assegurando uma eficiência na movimentação de matérias primas e produtos acabados, representando uma porcentagem significativa nos custos finais de um produto.

Na área industrial o transporte de carga deve manter um alto desempenho em termos econômicos e de qualidade de serviço. Isto porque esta é uma área onde se busca o lucro e existe um ambiente altamente competitivo aonde o fator custo é crucial. Aliado a isso, as novas técnicas de gerenciamento logístico buscam minimizar ou até eliminar os inventários nas plantas e minimizar os custos em toda cadeia de abastecimento. Desta forma, os prestadores de serviço em transporte devem manter uma qualidade de serviço e um padrão elevado.

A evolução política do mundo teve um grande impacto no setor de transportes. A criação de zonas de livre comércio e a criação de blocos comerciais formando novos mercados tiveram um alto impacto nos sistemas de transporte e as consequências ainda vêm sendo estudadas.

O transporte de carga deve estar pronto para captar e se adaptar a rápidas mudanças políticas, sociais e econômicas e também observar as novas tendências no setor. E o setor é caracterizado por um domínio complexo, onde atuam várias firmas, organizações e

instituições, cada qual com seus objetivos e diretrizes. Modificações na estrutura e nos serviços exigem um alto investimento e um longo período de espera para a concretização dos planos. É nesse domínio que métodos e ferramentas eficientes e acurados são requeridos para assistir e melhorar os processos de análise, operação e controle (Crainic, 1998).

Dentre as mais variadas técnicas para o auxílio na resolução de problemas operacionais envolvendo o gerenciamento de frotas a Alocação Dinâmica de Veículos (ADV) tem se destacado. O número de trabalhos publicados nas revistas especializadas mostra o aumento do interesse da comunidade científica em desenvolver sistemas que possam modelar problemas reais de grande porte. Muitos destes trabalhos estão ligados a aplicações em empresas, denotando o interesse da indústria no assunto.

Historicamente a alocação dinâmica de veículos vem sendo abordada de diferentes formas. De acordo com Powell e Carvalho (1998a), as primeiras formulações, abordando a ADV como uma rede linear, aparecem nos trabalhos de White e Bomberault (1969) e White (1972), muito embora a formulação básica já fosse conhecida antes (por exemplo, Dantzig e Fulkerson (1954)). Dejax e Crainic (1987), apresentam uma boa revisão sobre esse assunto. Jordan e Turnquist (1983), descrevem um modelo de otimização em uma rede dinâmica para a distribuição de veículos vazios. Trabalhos recentes buscam contrastar as metodologias estáticas e dinâmicas e incorporar o comportamento estocástico deste tipo de problema, como o trabalho de Powell (1986), que apresenta um modelo estocástico para o problema de alocação dinâmica de veículos. Powell (1988), apresenta um levantamento de quatro diferentes abordagens para o problema de alocação dinâmica: redes de transbordo determinísticas, redes estocásticas/não-lineares, processo de decisão de Markov e programação estocástica, mostrando como um problema pode ser abordado por diferentes perspectivas.

Em muitos destes trabalhos, um fator de restrição é o tamanho dos problemas a serem tratados. Problemas reais tornam-se, devido a seu tamanho e complexidade, proibitivos para a maioria dos modelos. Visando contornar esse tipo de problema, Powell, *et all* (1995),

Carvalho (1996), Powell e Carvalho (1997, 1998a, 1998b), apresentam uma nova formulação para o problema de gerenciamento de frotas dinâmicas denominada de *Logistics Queueing Networks* (LQN), que é baseada no controle de redes de filas.

O desafio aqui é buscar estender a aplicação da filosofia da LQN para o nível tático, utilizando seus métodos para a solução do problema de planejamento de rede de serviços.

Existem vários trabalhos abordando o problema de projeto de redes, vários modelos, formulações e aplicações. A área das aplicações é vasta e abrange o planejamento e operações de transporte, telecomunicações, logística e distribuição da produção. Uma boa revisão sobre esses modelos pode ser encontrada em Crainic e Laporte (1997). Maiores detalhes sobre formulações, modelos e aplicações podem ser encontrados nas pesquisas de Magnanti e Wong (1986) e Minoux (1986), nos trabalhos de Ahuja *et al.* (1995), Nemhauser e Wolsey (1988) e Salkin e Mathur (1986), nas referências bibliografia levantadas por Balakrishnan, Magnanti e Mirchandani (1997), e nos artigos de Gavish (1991) e Balakrishnan *et al* (1991).

O projeto de redes de serviço vem sendo cada vez mais utilizado no que concerne às decisões ao planejamento tático dos transportadores, abrangendo a seleção e o agendamento de serviços a serem operados, a especificação das operações nos terminais e o roteamento das cargas. Na otimização clássica este problema é formulado como um problema inteiro misto. Esta abordagem resulta em um grande número de restrições e variáveis. Usar técnicas de enumeração para resolvê-lo é extremamente dispendioso em termos de tempos computacionais, o que se torna ainda pior quando esse problema é representado na forma dinâmica.

Heurísticas vêm sendo usadas e obtendo bons resultados. Algumas heurísticas, como, por exemplo, métodos gulosos de tocas de arcos, buscam evitar o uso de técnicas de programação matemática usados nessa classe de problemas, porém, para problemas capacitados, os resultados encontrados não vem sendo encorajadores. Métodos do tipo dual-ascendente e relaxações são freqüentemente utilizados como heurísticas e os resultados apresentados são interessantes.

Metaheurísticas, principalmente *Tabu Search*, *Simulated Annealing* e Algoritmos Genéticos começam a ser amplamente aplicados (Crainic, 1998b). Maiores detalhes do projeto de redes de serviço são encontrados em Assad (1980), Crainic (1988a), Delomere, Roy, e Rousseau (1988) e Cordeau, Toth, e Vigo (1998). Modelos dinâmicos são encontrados em Farvolden e Powell (1991, 1994), Farvolden, Powell, e Lusting (1992), Equi *et al* (1997) e Haghani (1989).

O objetivo desse trabalho é apresentar uma estratégia para solucionar o problema de projeto de redes de serviço capacitado e com custos fixos. Para isso duas fases são necessárias, a primeira determina os valores dos potenciais utilizados pela metodologia LQN e a segunda fase, que será o foco principal do trabalho, decompõe a rede em terminais (nós) gerando uma série de subproblemas. Cada subproblema representa a operação de um despachante em um dado período e iteração. A estratégia para cada subproblema é encontrar uma solução inicial factível e aprimorá-la utilizando uma meta-heurística. No nosso caso, usaremos a idéia das cadeias de ejeção e técnicas de busca na vizinhança encontradas na meta-heurística *tabu search*. O objetivo é encontrar rapidamente uma solução de alta qualidade.

O trabalho está organizado da seguinte forma: a seção 2 busca mostrar de forma breve as idéias das cadeias de ejeção e da meta-heurística *tabu search*. Na seção 3 serão apresentados a descrição do problema estático e dinâmico do projeto de redes de serviço e um modelo geral para o problema do projeto de redes. Na seção 4, será descrita de forma sucinta a filosofia LQN, serão descritos também a estratégia de solução adotada e o modelo do algoritmo de solução. Por fim, na seção 5 serão apresentadas as conclusões do trabalho.

2. TABU SEARCH E CADEIAS DE EJEÇÃO

Para problemas de projetos de redes de grande porte não é possível, devido a sua complexidade, atingir a solução exata. Várias heurísticas foram aplicadas aos problemas, mas os resultados não foram satisfatórios. Métodos do tipo dual ascendente e relaxações são aplicados como heurística e apresentam bons resultados.

Metaheurísticas, principalmente *Tabu Search*, *Simulated Annealing* e *Genetic Algorithms* estão sendo aplicadas com sucesso.

Nos últimos anos a *tabu search* vem sendo aplicada com um alto grau de sucesso nos mais variados problemas NP-hard. Uma boa fonte de consulta é encontrada em Glover e Laguna (1997) e Glover (1986). É basicamente uma estratégia de busca iterativa na vizinhança, que permite movimentos que degradam a função objetivo. Através desses movimentos o método pode escapar de um ótimo local ruim (ao contrário de uma abordagem puramente descendente). Para evitar ciclos, uma memória de curto prazo, conhecida como lista tabu, é utilizada para armazenar soluções já visitadas ou componentes destas soluções. É proibido (tabu) voltar a essas soluções por um certo número de iterações.

A estrutura da vizinhança é um dos aspectos mais importantes no desenvolvimento de uma heurística *tabu search*. O mecanismo que gera modificações nas soluções é chamado de *neighborhood structure*. A vizinhança de uma determinada solução é o conjunto de soluções que podem ser atingidos a partir da solução inicial aplicando-se o *neighborhood structure*. O processo de transformação de uma solução para outra é chamado de movimento (Rego, 1996).

Um movimento pode ser definido como uma ou mais operações. Uma operação elementar pode ser a inserção ou troca de uma carga ou veículos no grafo do problema. Movimentos compostos de uma única operação são chamados de movimentos simples. Se um movimento, porém, é composto de duas ou mais operações (dependentes), é chamado de movimento composto e nesse caso cada operação pode ser chamada de submovimento.

Da mesma forma define-se a estrutura de vizinhança simples como a estrutura aonde através de um movimento simples muda-se de uma solução para outra e estrutura de vizinhança composta como a estrutura que utiliza movimentos compostos para alterar seu estado.

As cadeias de ejeção é um *neighborhood structure* que combina movimentos simples para produzir um movimento composto e vem

surgindo como uma nova técnica para explorar o espaço de soluções em métodos de busca local.

Uma interpretação genérica consiste em selecionar sucessivamente um conjunto de elementos que serão designados a um novo estado, de tal forma que a cada passo a mudança de estado depende do elemento do passo anterior, criando desta forma uma reação em cadeia.

O objetivo das cadeias de ejeção é produzir um conjunto restrito de movimentos que são os melhores dentro de um vasto (frequentemente exponencial) número de alternativas, requerindo para isso um esforço polinomial.

A idéia do presente trabalho consiste em aplicar a técnica de cadeias de ejeção, que vem sendo usualmente aplicada a problemas de roteamento de veículos, para resolver um problema de projeto de redes de transportes. A seção seguinte faz uma abordagem ao problema em questão descrevendo sua estrutura, modelo e variáveis de decisão.

3. PROJETO DE REDES DE SERVIÇO

3.1. Descrição do Problema

Projetos de redes de serviço fazem parte das atividades de planejamento tático de uma companhia e é particularmente relevante para firmas e organizações que opera sistemas de consolidação de transporte. O objetivo é atender a demanda e assegurar o lucro da empresa. Tem-se que considerar o lado da "oferta", onde se tem operações que integram as atividades nos terminais, seleção, roteamento e agendamento dos serviços e cobrir também o lado da "demanda", onde se realiza o roteamento das cargas através da rede, assegurando a confiança numa entrega em tempo de acordo com as especificações e metas do transportador.

Um dos principais objetivos do planejamento tático é atingir o melhor ponto entre os custos operacionais e lucratividade da firma e performance do serviço. Para ilustrar a complexidade das decisões e

trocas compensatórias características do planejamento tático Crainic e Laporte (1997) apresentam um exemplo do roteamento de envios entre dois terminais onde se opera um sistema de transportes com consolidação. A figura 1 mostra a representação deste sistema composto por cinco terminais e sete serviços. Um envio originado no terminal A com destino no terminal D é classificado em A e pode ser roteado de acordo várias estratégias incluindo:

1. Consolidar o envio com outras cargas que tenham o mesmo terminal de destino e colocá-las em um dos serviços diretos disponíveis, S1 ou S2, de acordo com suas características.
2. Consolidar o envio com outras cargas para D, mas colocá-las em um veículo no serviço S3, onde se efetuará uma parada para carga e descarga de mercadorias.
3. Consolidar o envio com cargas para o terminal C, colocá-las no serviço S4, descarregar o envio no terminal C, reclassificá-lo e consolidá-lo com cargas originadas em B e C com destino D e utilizar o serviço S5.

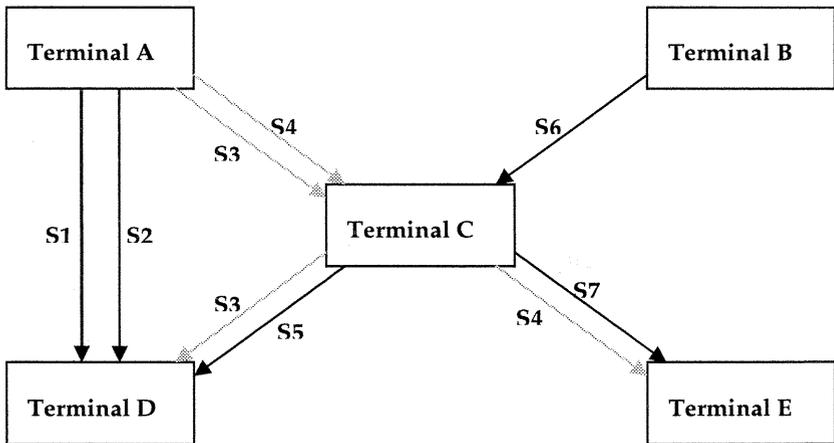


Figura 1: Rede de Serviços

A melhor decisão a ser tomada deve considerar o roteamento de todo tráfego, o nível de serviço de cara rota e o custo e características dos serviços em cada terminal. Formalmente as principais decisões a serem feitas no nível tático seguem os seguintes tópicos:

1. Seleção do serviço. As rotas – terminais de origem e destino, rota física e paradas intermediárias – onde serviços serão oferecidos e as características de cada serviço. Frequência e agendamento fazem parte desse processo de decisão.
2. Distribuição de tráfego. Os itinerários utilizados para mover o fluxo de cada demanda: serviços usados, terminais atravessados, operações realizadas nesses terminais, etc.
3. Políticas dos terminais. Regras gerais que especificam as atividades de consolidação realizáveis em cada terminal.
4. Estratégias gerais de balanceamento de veículos vazios, indicando como reposicioná-los para atender as necessidades previstas para o próximo período.

No projeto de redes de serviço as formulações podem ser estáticas ou dinâmicas mas sempre são determinísticas. As próximas seções serão dedicadas às formulações.

3.2. Modelo Matemático para o Problema de Projeto de Redes

Modelos de projetos de redes são utilizados para representar os mais variados problemas de planejamento e operações em transportes, telecomunicações, distribuição, etc. Essas formulações têm um papel importante nas decisões relativas à estrutura logística, à rede de serviços e à operação de sistemas de transporte a longa distâncias.

Formulações de projetos de redes são definidas em grafos que contêm *nós* ou *vértices*, conectados por arcos, os quais podem ser direcionados ou não. Em um grafo os vértices podem representar as origens e/ou os destinos dos fluxos de cargas ou produtos. Os arcos, por sua vez, podem apresentar várias características, como comprimento, capacidade e custo. Em particular, *custos fixos* podem

ser associados a alguns, ou todos os arcos, indicando que assim que se escolhe um destes arcos isto acarreta em um custo fixo, que é um custo extra além do custo de utilização geralmente relacionado com o volume de tráfego no arco. O objetivo é escolher arcos da rede, com suas respectivas capacidades, buscando atender a demanda por transporte com o menor custo possível para o sistema, computando os custos fixos e variáveis.

Considere o grafo $G = (N, A)$, onde N representa o conjunto de nós e A o conjunto de arcos. P representa o conjunto de cargas transportado através da rede. A formulação geral para o problema de projetos de redes com custos fixos é descrita a seguir:

$$\text{Minimize } \sum_{(i,j) \in A} f_{ij} y_{ij} + \sum_{(i,j) \in A} \sum_{p \in P} c_{ij}^p x_{ij}^p \quad (1)$$

$$\text{Sujeito a: } \sum_{j \in N} x_{ij}^p - \sum_{j \in N} x_{ji}^p = d_i^p \quad i \in N, p \in P \quad (2)$$

$$\sum_{p \in P} x_{ij}^p \leq u_{ij} y_{ij} \quad (i, j) \in A \quad (3)$$

$$x_{ij}^p \geq 0 \quad (i, j) \in A, p \in P \quad (4)$$

$$y = \{0,1\} \quad (i, j) \in A \quad (5)$$

onde, y_{ij} é a variável inteira que modela a escolha de um arco, isto é, se $y_{ij} = 1$ o arco (i,j) está aberto, ou em uso, caso contrário está fechado, x_{ij}^p representa a quantidade de fluxo do produto p no arco (i,j) , f_{ij} é o custo fixo relacionado como arco (i,j) , c_{ij}^p o custo de transporte por unidade de fluxo do produto p no arco (i,j) , u_{ij} é a capacidade do arco (i,j) e d_i^p a demanda do produto p no nó i .

Quando o agendamento é contemplado a dimensão tempo deve ser adicionada à formulação. Isto é usualmente feito pela representação das operações do sistema sobre um número de períodos de tempo utilizando uma rede espaço-tempo (Crainic, 1998a).

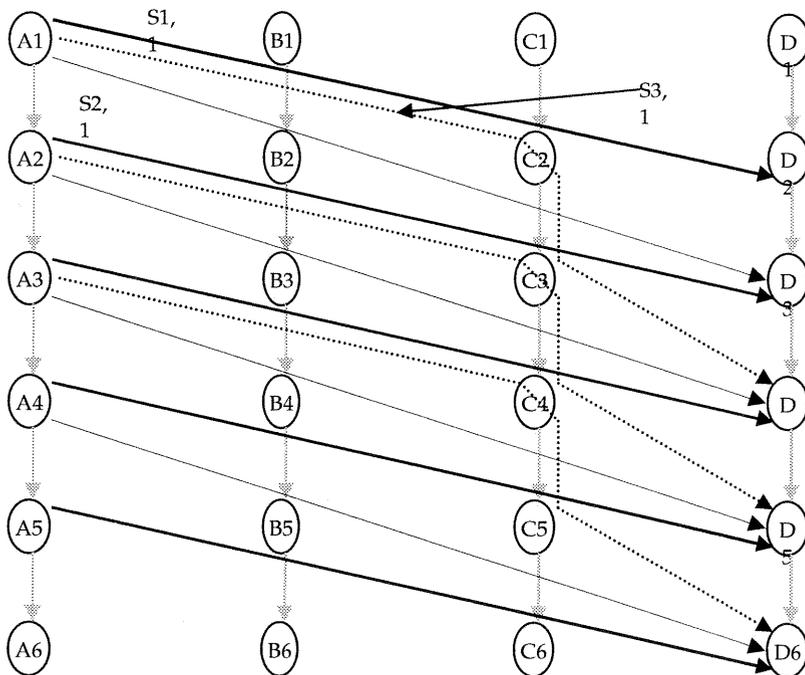


Figura 2: Representação de um problema de rede de serviços dinâmica

Crainic (1998b) define o problema de projeto de redes de serviço dinâmico. Agora a representação da rede física é replicada a cada período. Serviços são gerados em arcos temporais. Iniciando em uma origem a um dado período, um serviço chega (e parte, no caso de paradas intermediárias) em outro terminal em outro período. Cada perna do serviço é representada por um arco temporal entre dois terminais diferentes em dois períodos diferentes. O custo associado aos arcos nesta rede é similar àqueles usados na formulação estática.

Novamente se têm dois tipos de variáveis de decisão. Variáveis inteiras de projeto são associadas a cada serviço. Restritas a valores $\{0,1\}$, essas variáveis indicam se um serviço será oferecido ou não em um determinado período. Quando várias partidas são feitas em um mesmo período, variáveis inteiras gerais (não-negativas) devem ser

utilizadas. Variáveis contínuas são utilizadas para representar a distribuição do fluxo de carga através da rede de serviço.

Crainic e Laporte (1997) mostram uma instância de um problema dinâmico ilustrado na figura 2. Considere o problema ilustrado na figura 1, assuma que já foi decidido que do terminal A serão oferecidos somente os serviços S1, S2 e S3. Deve-se então determinar o agendamento das partidas desses serviços para os próximos períodos, assim como o correspondente roteamento do tráfego. Na figura 2 cada terminal é desenhado para cada um dos períodos considerados. Cada serviço é então desenhado para cada possível período de partida e sua rota na rede espaço-tempo é apresentada.

Modelos para essa classe de problemas podem ser escritos similarmente às formulações estáticas (Equações (1) – (5)), mas significativamente maiores devido à dimensão tempo.

4. ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO

Para contornar o problema da alta complexidade dos modelos dinâmicos, busca-se no presente trabalho utilizar a filosofia da Logistics Network Queueing e desenvolver uma estratégia de solução que garanta a obtenção de bons resultados em tempos computacionais reduzidos.

4.1. Logistics Queueing Network

A LQN é uma abordagem recente endereçada para o problema de alocação dinâmica de recursos apresentada em Powell *et al.* (1995), Powell e Carvalho (1997 e 1998) e Carvalho (1996). O método utiliza filas para representar recursos e tarefas em cada terminal do diagrama espaço-tempo. A figura 3 ilustra uma configuração possível para dois terminais em dois períodos. Deve-se gerenciar dois recursos: veículos e cargas. Em cada terminal existem as seguintes ações possíveis: mover veículos carregados de um terminal para outro, segurar veículos vazios para usá-los em períodos futuros, mover veículos vazios para reposicioná-los em um terminal diferente, determinar para onde enviar um veículo que se torna vazio e qual veículo de qual terminal será designado a novas cargas. O

objetivo é maximizar o lucro total gerado pela operação do sistema e satisfazer a demanda.

A idéia básica da metodologia LQN é utilizar formulações recursivas de modelos de programação dinâmica, decompondo a problema de otimização resultante em pequenos subproblemas locais “fáceis” de se resolver para cada período. Cada subproblema corresponde à alocação de tarefas a veículos em um dado terminal. Para avaliar o valor de se alocar um veículo a uma tarefa, deve-se utilizar, além dos custos operacionais e dos retornos de cada alocação, o valor de se ter um veículo vazio no terminal de destino. Esse valor, devido à dinâmica do sistema, depende das decisões futuras tomadas em todos os terminais. A cada período e para cada tipo de veículo, esses valores são aproximados pela medida de quão desejável é se ter mais um veículo em cada terminal. Os *potenciais* resultantes são, então, utilizados para criar uma aproximação linear na parte recursiva da formulação que corresponde aos períodos futuros. Gradientes dessas aproximações da função objetivo em relação à oferta de veículos nos terminais são utilizados para ajustar os potenciais, bem como os limites superiores dos movimentos vazios.

A abordagem geral de solução realiza iterativamente uma série de passos *forward* e *backward* ao longo do eixo do tempo. A cada iteração, o passo *forward* designa veículos às tarefas, o passo *backward* calcula os gradientes e uma fase de ajuste modifica os potenciais e os limites de movimentos vazios. O processo continua até que a convergência é assegurada.

Nosso propósito é utilizar a idéia destes potenciais na estratégia de solução para o problema de projetos de redes. A estratégia de solução consiste de duas etapas, a primeira é avaliar e determinar os valores destes potenciais. A segunda etapa realiza a decomposição da rede em vários subproblemas enraizados nos terminais o qual é o objetivo da próxima seção. Estes subproblemas representam a operação de um *transportador* em um dado período e iteração.

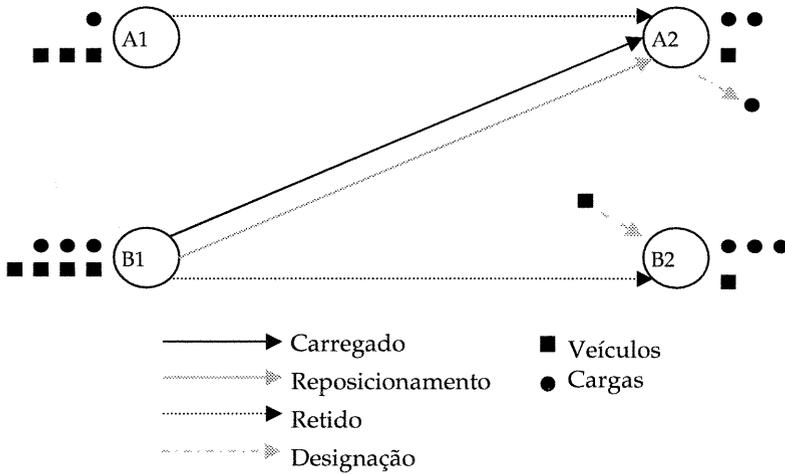


Figura 3: Logistics Queueing Network

4.2. Modelo do Subproblema

O foco do modelo da segunda etapa está voltado para uma subrede do diagrama espaço/tempo. A subrede é enraizada em um nó (terminal) i , no período t e na iteração n ; chamada $G^{n_{it}} = (N^{n_{it}}, A^{n_{it}})$ e representa a decisão de um transportador. A figura 4 ilustra o conceito da subrede.

A demanda é definida como o volume $R^{n_{ikt}}$ (número de envios) a ser enviado do nó i para cada um dos destinos $k \in K^{n_{it}}$. Os nós em K podem ser terminais ou vértices conceituais resultantes de agregações. Seja $S^{n_{it}} = \sum_{k \in K} R^{n_{ikt}}$ a oferta total do nó i no período t na iteração n .

Para atingir os destinos a partir do nó i um primeiro movimento (despacho) deve ser feito para um nó do conjunto de nós adjacentes $j \in J^{n_{it}}$, $J \subseteq N$. De cada $j \in J$ pode-se chegar ao destino nos nós $k \in K$. Tem-se então $N^{n_{it}} = \{i, J^{n_{it}}, K^{n_{it}}\}$ e $A^{n_{it}} = \{(i,j), (j,k) \mid j \in J^{n_{it}}, k \in K^{n_{it}}\}$.

O custo de usar o arco (i,j) é f_j , e a capacidade do arco é u_j . A decisão do nó adjacente a ser utilizado em termos da rede é equivalente a

escolha da ligação (j,k) . O custo de transporte desta ligação é dado pela função $\hat{V}_{jkt+\tau_{ij}}(R_{jkt+\tau_{ij}})$, que corresponde ao valor dos potenciais determinados pela metodologia LQN. Esta é, geralmente, uma função não linear dos envios de i para j com destino a k no tempo t , mais os outros envios de j para k provindos de outros terminais. Quando \hat{V} é linear, essas contribuições de outros terminais não têm influência na solução do subproblema e devem ser descartadas. A função \hat{V} pode ser linearizada adicionando-se arcos paralelos à rede. Na nossa abordagem será utilizado $g_{jkt} = \hat{V}_{jkt+\tau_{ij}}(R_{jkt+\tau_{ij}})$ como uma aproximação linear de \hat{V} . Quando um nó intermediário j for o nó de destino, $j \in K$, assume-se $g_{jj} = 0$. Sempre se tem a opção de não movimentar a carga (ou fazê-lo em um tempo futuro) a esta opção tem-se custo h_{ikt} , relacionado a manter em i uma carga para k .

Dessa forma tem-se as variáveis de decisão: $z^{n_{ijt}} = \{0,1\}$ de utilização dos terminais intermediários e $x^{n_{ijkt}}$ o volume enviado de i para k através de j .

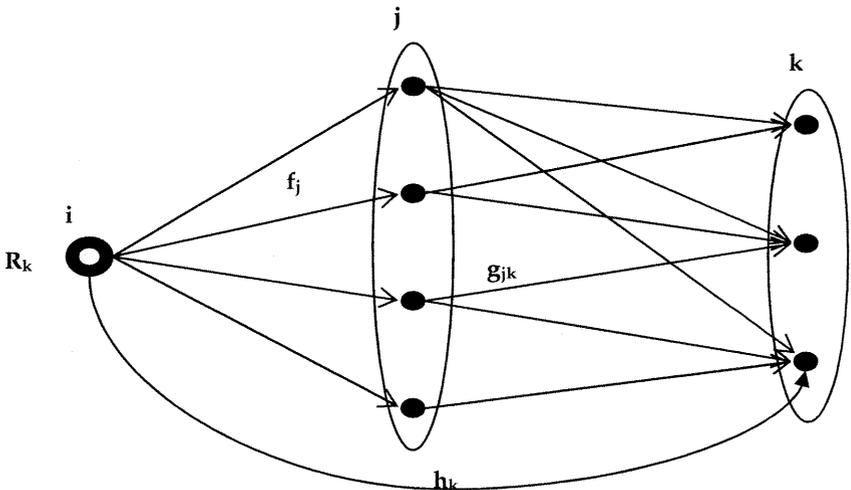


Figura 4: Subrede enraizada em um nó

A forma geral para o subproblema é baseada na formulação do problema de projetos de redes com capacidade e custos fixos apresentada anteriormente (Eqs. (1)-(5)). Para cada terminal no espaço/tempo tem-se:

$$\text{Minimize } Z = \sum_{j \in J} (f_j z_j + \sum_{k \in K} g_{jk} x_{jk}) + \sum_{k \in K} h_k (R_k - \sum_{j \in J} x_{jk}) \quad (6)$$

$$\text{Sujeito a: } \sum_{k \in K} x_{jk} \leq z_j u_j \quad \forall j \in J \quad (7)$$

$$\sum_{j \in J} x_{jk} \leq R_k \quad \forall k \in K \quad (8)$$

$$x_{jk} \geq 0 \quad \forall j \in J, k \in K \quad (9)$$

$$z_j = \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (10)$$

O objetivo passa a ser resolver uma série de subproblemas, como os descritos pelas equações (6)-(10), para cada terminal no tempo/espaço. Na seção seguinte será apresentado o modelo do algoritmo para solucionar o subproblema enraizado em um nó.

4.3. Algoritmo de Solução

O objetivo agora é identificar de forma rápida e eficiente uma solução de alta qualidade para cada subproblema não se preocupando com a otimalidade da solução a ser encontrada. Para isso será adotada a seguinte estratégia de solução: determinar uma solução inicial factível para o subproblema e melhorá-la utilizando uma metaheurísticas de trocas tabu baseada nas cadeias de ejeção. O modelo geral do algoritmo é apresentado na figura 5 e descrito na figura 7.

O primeiro passo, portanto é determinar uma solução inicial factível. Essa solução pode ser obtida por várias heurísticas, por exemplo:

1. Abrir todos os nós intermediários; resolver o problema de fluxos em redes com custos mínimos; fechar os nós intermediários não utilizados

2. Enviar tudo em seus caminhos preferidos e usar todos os nós intermediários $j(k)$; quando vários destinos k tiverem o mesmo intermediário preferencial j e a soma da demanda correspondente for maior que a capacidade do arco, os fluxos que ultrapassem essa capacidade devem ser alocados à suas segundas rotas preferidas e assim por diante.
3. Ordenar os caminhos em ordem crescente de custos marginais; enviar tudo pelo caminho de menor custo marginal e como no caso 2 acima, caso a demanda ultrapasse a capacidade do caminho utiliza-se o segundo caminho mais curto.

A estratégia adotada neste trabalho será a terceira por ser rápida, de fácil implementação e apresentar bons resultados.

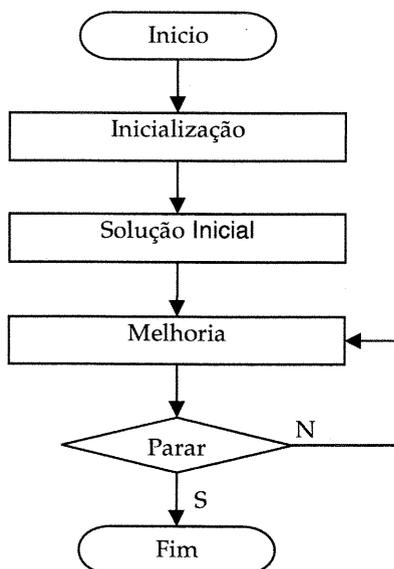


Figura 5: Modelo geral do algoritmo de solução

Uma vez determinada a solução inicial deve-se realizar uma metodologia para melhorá-la. No nosso caso será utilizada uma

metodologia de trocas tabu baseada na estratégia de cadeias de ejeção, onde vizinhanças são obtidas através de uma sucessão de movimentos, que são uma seqüência dependente. Avalia-se os movimentos e determina-se a cada passo quais os movimentos que têm os melhores potenciais para modificar uma determinada solução.

A idéia geral é realizar trocas entre os fluxos dos arcos de projeto. Porém, quando se tenta mover fluxos de um arco para o outro, o novo arco pode não ter capacidade suficiente para o novo fluxo, tornando-se necessário remover fluxos deste novo arco e destiná-los a um outro arco. Esse processo pode se repetir a cada troca que se procura fazer acarretando em uma reação em cadeia, ou seja a cada mudança no caminho a utilizado pelas cargas acarreta uma série de mudanças nas demais cargas do sistema. Nosso objetivo é utilizar essa reação para encontrar movimentos que melhorem as soluções obtidas.

Em problemas de grande porte se não tivermos controle desta reação podemos obter cadeias de grande tamanho o que acarreta em um aumento no tempo necessário para encontrar uma solução. Nossa estratégia limita o tamanho máximo desta cadeia, isto é, uma vez atingido um tamanho pré-estabelecido os fluxos pendentes serão designados a arcos de inventário.

A estratégia de trocas adotada é uma estratégia "gulosa" e pode ser descrita da seguinte forma: calcule os custos unitários de todos os caminhos possíveis para cada um dos destinos, utilizando os fluxos de uma solução factível determinada anteriormente. Ordene esses custos em ordem crescente. Determine uma cadeia de trocas seguindo a seguinte estratégia: procure o fluxo que está utilizando o maior custo unitário para atingir seu destino. Encontre um novo caminho (terminal intermediário) para esse fluxo, verifique se esse caminho possui capacidade suficiente para o novo fluxo, caso possua está determinada a cadeia, caso contrário, deve-se retirar fluxos deste caminho e procurar um novo destino para esses fluxos. Esse processo se repete até que uma cadeia seja completa seja estabelecida ou o tamanho máximo para uma cadeia seja atingido, neste caso o fluxo remanescente será direcionado para um arco de inventário. Uma vez determinada a cadeia de ejeção deve-se verificar se esta será

implementada ou não, esta decisão depende dos critérios da estratégia do método *tabu* adotado. Se foi atingido os critérios de parada do programa pare, se não, determine uma nova cadeia de ejeção e continue o processo determinando uma nova cadeia.

Para melhor compreender essa estratégia de trocas, a figura 6 apresenta a implementação de uma troca realizada em subproblema acarretando uma "cadeia de ejeção". A figura da esquerda representa uma solução factível para o problema, a figura da direita mostra as mudanças na solução decorrentes de uma perturbação no sistema, neste caso essa perturbação é a mudança de caminho de uma carga. A descrição do algoritmo e seus procedimentos pode ser visto na figura 7.

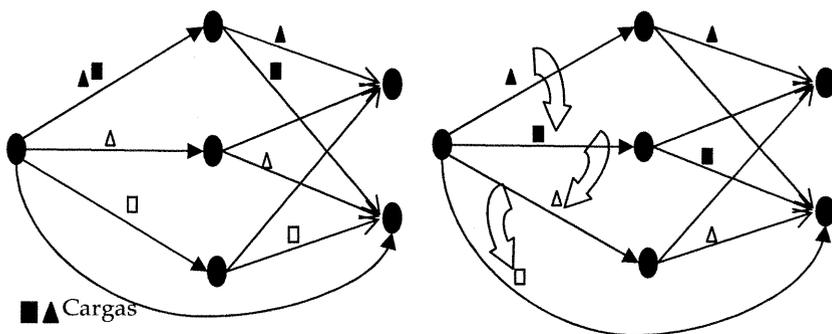


Figura 6: Esquema de uma troca

Passo 0 – Inicialização

Inicialize a lista *tabu*

Passo 1 – Solução Inicial

Calcule o custo de se enviar uma unidade de fluxo através de cada caminho.

Ordene estes custos em ordem crescente.

Aloque cargas aos caminhos de forma gulosa (ou seja, enviar pelo caminho disponível de menor custo).

Passo 2 - Melhoria

Calcule os novos custos unitários para cada caminho.

Ordene-os como no passo anterior.

Até que se estabeleça uma cadeia ou atinja o tamanho máximo faça:

Encontre a carga com o maior custo unitário.

Encontre um novo caminho para essa carga.

Se esse novo caminho tem capacidade suficiente está é a cadeia.

Se não determine o fluxo a ser trocado pela nova carga.

Se a cadeia atingiu seu tamanho máximo ponha a nova carga em um arco de inventário.

Calcule a variação na função objetivo causada por essa cadeia.

Se o movimento não for *tabu*, implemente.

Se for *tabu*, implemente somente se melhorar a melhor solução obtida até o momento.

Caso contrário selecione o próximo melhor candidato.

Atualiza as listas *tabu*.

Passo 3 - Parada

Se os critérios de parada são atendidos PARE, se não volte ao passo dois.

Figura 7: Algoritmo de solução

5. CONCLUSÕES

A primeira vista o algoritmo parece ser simples, mas vários detalhes no problema de projeto de redes de serviço aumentam sua complexidade. A primeira são os custos fixos nos arcos de projeto (i,j) . Uma vez aberto um arco de projeto (isto é $y_{ij} = 1$) deve-se pagar o seu custo fixo equivalente, desta forma a primeira carga alocada a este arco terá um custo inicial relativamente alto tornando o caminho

pouco atraente para a carga. Isto não corresponde à realidade, pois uma vez aberto outras cargas irão ser alocadas ao arco, diluindo este custo fixo inicial. Para construir a solução inicial dividiremos este custo inicial pela capacidade do arco, desta forma o custo unitário de se enviar uma carga de i para j através de j é dado por:

$$c_{pj} = \frac{f_j}{u_j} + g_{jk}$$

Uma vez construída a solução inicial recalcula-se esse valor dividindo o custo fixo do arco pelas cargas à ele alocadas. O novo custo marginal é dado por:

$$c_{pj} = \frac{f_j}{x_j} + g_{jk}$$

Depois de estabelecida a solução factível inicial todos os arcos não utilizados devem ser "fechados" ($y_{ij} = 0$). Com isso na fase de melhoria da solução poderia se chegar ao mesmo problema dos altos custos iniciais para se abrir um arco que se tinha na solução inicial. Para evitar esse problema, será utilizada uma aproximação para avaliar o custo de enviar uma carga através de um caminho, este será aproximado pelo máximo valor que este arco apresentou nas iterações anteriores.

Outro fator a ser observado é o número de nós intermediários existentes para cada destino final. Já que o algoritmo baseado em trocas entre os arcos deve-se ter um número mínimo de nós intermediários para se ter opções para as mudanças de fluxos, caso isso não ocorra o problema recai em um tipo de problema da "mochila" e pode ser resolvido utilizando estratégias conhecidas para esse tipo de problema. Este número de nós intermediários será um valor a ser calibrado para uma melhor performance do algoritmo.

Deve-se também determinar o tamanho da cadeia de ejeção, este número representa o número de mudanças que serão efetuadas para se encontrar a próxima solução. O objetivo é encontrar uma

correspondência entre o tamanho da subrede e o tamanho da cadeia de ejeção que otimize o algoritmo.

Por fim deve-se estabelecer os critérios a serem adotados pela estratégia *tabu*, como tamanhos de lista de memória de curto e longo prazos, estratégias de avaliação e trocas, como por exemplo, deve-se implementar a primeira cadeia factível e seguir o caminho fornecido por ela ou deve-se determinar um número de cadeias factíveis e seguir pela mais promissora.

O algoritmo encontra-se em fase de testes. Os primeiros resultados estão sendo encorajadores. A resposta para cada subproblema está sendo obtida dentro de tempos computacionais satisfatórios e o algoritmo tem encontrado soluções de boa qualidade. Os próximos passos serão: a) calibrar os parâmetros de programação, tais como o tamanho da cadeia de ejeção, os critérios de parada e os critérios e estratégias do método *tabu*; b) testar os resultados obtidos pelo algoritmo com resultados obtidos por pacotes de programação linear (C-Plex). Neste caso estamos buscando determinar para quais tipos de problema (tamanho, relação carga/capacidade, etc.) o nosso algoritmo apresenta melhores resultados que o de pacotes comerciais. Uma vez calibrado o algoritmo deve-se estabelecer uma estratégia para aplicar o algoritmo para toda a rede espaço-tempo.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece a CAPES pela bolsa que permitiu o desenvolvimento da pesquisa. O terceiro autor agradece ao CNPq pelo apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahuja, R. K.; T. L. Magnanti; J. B. Orlin e M. R. Reddy (1995). Applications of Network Optimization. Em Ball, M, and Magnanti, T., L. and Monma, C. L. and Nemhauser, G. L., editor, *Network Models*, volume 7 of Handbooks in Operations Research and Management Science, p. 1-83. North-Holland, Amsterdam.

- Assad, A. A. (1980). Models for Rail Transportation. *Transportation Research A*, V. 14A, p. 205-220.
- Balakrishnan, A.; T. L. Magnanti e P. Mirchandani (1997). Network Design. In Dell'Amico, M., Maffioli, F., and Martello, S., editors, *Annotated Bibliographies in Combinatorial Optimization*, p. 311-334. John Wiley & Sons, New York, NY.
- Balakrishnan, A.; T. L. Magnanti; A. Shulman e R. T. Wong (1991). Models for Planning Capacity Expansion in Local Access Telecommunication Networks. *Annals of Operations Research*, n.33, p. 239-284.
- Carvalho, T. A. (1996). A New Approach to Solving Dynamic Resource Allocation Problems. Tese de PhD, Princeton University, NJ, USA.
- Cordeau, J. F.; P. Toth e D. Vigo (1998). A Survey of Optimizations Models for Train Routing and Scheduling. *Transportation Science*, v. 32, n. 4, p. 380-404.
- Crainic, T. G. (1998b). Service Network Design in freight Transportation. Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal, publicação # 98-66.
- Crainic, T. G. (1998a). A Survey of Optimization Models for Long-Haul Freight Transportation. Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal, publicação # 98-67.
- Crainic, T. G. e G. Laprote (1997). Planning Models for Freight Transportation. *European Journal of Operational Research*, v. 97, p. 409-434.
- Dantzig, G. e D. Fulkerson (1954) Minimizing the Number of Tankers to Meet a Fixed Schedule. *Naval Research Logistics Quarterly*, v. 1, p. 217-222.
- Dejax, P. J. e T. G. Cranic (1987) A Review of Empty Flows and Fleet Management Models in Freight Transportation. *Transportation Science*, v. 21, n. 4, p. 227-247.
- Delomere, L.; J. Roy e J. -M. Rousseau (1988). Motor-Carrier Operation Planning Models: A State of the Art. Em Bianco, L. E Bella, A. L., editores, *Freight Transport Planning and Logistics*, p. 510-545. Spring-Verlang, Berlin.
- Equi, L.; G. Gallo; S. Marziale e A. Weintraub (1997). A Combined Transportation and Scheduling Problem. *European Journal of Operational Research*, v. 97, n. 1, p. 94-104.
- Farvolden, J. M. e W. B. Powell (1991). A Dynamic Network Model

- for Less-Than-Truckload Motor Carrier Operations. Working Paper 90-05, Department of Industrial Engineering, University of Toronto, ON, Canada.
- Farvolden, J. M. e W. B. Powell (1994). Subgradient Methods for the Service Network Design Problem. *Transportation Science*, v. 28, n.3, p. 256-272.
- Gavish, B. (1991). Topological Design of Telecommunications Network-Local Access Design Methods, *Annals of Operations Research*, v. 33, p. 17-71.
- Glover, F. (1986). Future Path for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence. *Computers and Operations Research*, v. 13, p. 533-549.
- Glover, F. e M. Laguna (1997). *Tabu Search*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- Haghani, A. E. (1989). Formulation and Solution of Combined Train Routing and Makeup, and Empty Car Distribution Model. *Transportation Research B: Methodological*, v. 23B, n. 6, p. 433-449.
- Jordan, W. C. e M. A. Turnquist (1983) A Stochastic, Dynamic Network Model for Railroad Car Distribution. *Transportation Science*, v.17, n. 2, p. 123-145.
- Magnanti, T. L. e R. T. Wong (1986). Network Design and Transportation Planning: Models and Algorithms. *Transportation Science*, v. 18, n. 1, p. 1-55.
- Nemhauser, G. L. e L. A. Wolsey (1988). *Integer and Combinatorial Optimization*. Wiley, New York, NY.
- Powell, W. B. (1986). A Local Improvement Heuristic for the Design of Less-than-Truckload Motor Carrier Networks. *Transportation Science*, v. 20(4), p. 246-357.
- Powell, W. B. (1988). A Comparative Review of Alternative Algorithms for the Dynamic Vehicle Allocation Problem. Em Golden, B. e Assad, A. (eds.) *Vehicle Routing: Methods and Studies*. North Holland, New York, USA.
- Powell, W. B. e T. A. Carvalho (1998b). Real-Time Optimization of Containers and Flatcars for International Operations. *Transportation Science*, v. 32, n. 2, p. 110-126.
- Powell, W. B. e T. A. Carvalho (1997). Dynamic Control of Multicommodity Fleet Management Problems. *European Journal of Operational Research*, v. 98, p. 522-541.

- Powell, W. B. e T. A. Carvalho (1998a). Dynamic Control of Logistics Queueing Networks for Large-Scale Fleet Management. *Transportation Science*, v. 32, n. 2, p. 90-109.
- Powell, W. B.; T. A. Carvalho; G. A. Godfrey e H. P. Simão (1995). Dynamic Fleet Management as a Logistics Queueing Network. *Annals of Operations Research*, v. 61, p. 165-188.
- Rego, C. (1996). Local Search and Neighborhood Structures for Vehicle Routing Problems: Sequential and Parallel Algorithms. Tese de PhD. University of Versailles, FRA.
- Salkin, H. M. e K. Mathur (1989). *Foundations of Integer Programming*. North-Holland, Amsterdam.
- White, W. (1972) Dynamic Transshipment Networks: An Algorithm and its Application to the Distribution of Empty Containers. *Networks*, v. 2, n. 3, p. 211-236.
- White, W. e A. Bomberault (1969) A Network Algorithm for Empty Freight Car Allocation. *IBM Systems Journal*, v. 8, n. 2, p. 147-171.

Endereço dos autores:

Leonardo Campo Dall'Orto

José Eugenio Leal

Departamento de Engenharia Industrial

Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro

E-mail: leonardo.dallorto@delara.com.br

jel@rdc.puc-rio.br

Teodor Gabriel Crainic

Centre de Recherche sur les Transports

Université de Montréal

E-mail: theo@CRT.UMontreal.CA