

Configuração de redes do tipo *hub-and-spoke* para o transporte rodoviário de carga parcelada no Brasil utilizando algoritmos genéticos

M. R. Silva¹

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil

C. B. Cunha²

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil

Artigo Recebido: 21/01/04 - Aprovado: 17/09/2004

RESUMO: Este trabalho descreve uma estratégia de solução heurística baseada em algoritmos genéticos para o problema de configuração de redes do tipo “*hub-and-spoke*” para transportadoras de carga parcelada no Brasil. Esse problema consiste em determinar quantos e quais são os terminais de consolidação de carga parcelada (também conhecidos como “*hubs*”) e quais pontos ou filiais são atendidos por cada “*hub*”, de forma a minimizar o custo total, composto de parcelas de custos fixos e variáveis. O modelo proposto se diferencia dos demais encontrados na literatura por permitir considerar fatores de economia de escala para os custos de transporte que variam de acordo com os respectivos volumes de carga entre instalações, como ocorre com as transportadoras de carga no Brasil. Dada a natureza combinatorial do problema e a sua função objetivo não linear, duas estratégias de solução heurísticas são utilizadas, ambas baseadas em Algoritmos Genéticos, sendo uma delas com uma abordagem inédita de utilizar algoritmos genéticos em duas fases. As heurísticas foram aplicadas a um problema real de uma transportadora de carga parcelada no Brasil e permitiram obter resultados de ótima qualidade.

ABSTRACT: This paper describes a heuristic solution strategy based on genetic algorithms to the problem of configuring hub-and-spoke networks for less-than-truckload freight carriers in Brazil. The problem consists of determining the number of consolidation terminals (also known as hubs), their locations and the assignment of the spokes to the hubs, aiming to minimize the total cost, which is composed of fixed and variable costs. The proposed model differs from similar models found in the literature in the sense that it allows variable scale reduction factors for the transportation costs according to the total amount of freight between hub terminals, as occurs to less-than-truckload (LTL) freight carriers in Brazil. Given the combinatorial nature of the problem, as well as a non-linear objective function, two heuristics are proposed. Both are based on Genetic Algorithms, being one of them a novel approach which consists of a two-phase genetic algorithm. The heuristics were applied to a real world problem for a LTL freight carrier in Brazil, leading to very good results.

1 INTRODUÇÃO

O segmento de carga parcelada abrange, como o próprio nome já diz, os serviços de transporte de cargas cujo volume, para um cliente, uma origem e um destino, não é suficiente para lotar um veículo. Assim, cargas de diversos clientes são agregadas e transportadas conjuntamente. Esse tipo de serviço normalmente engloba as operações de coleta na origem, de consolidação com outras cargas de outros clientes para transferência de longa distância, de desconsolidação e de entrega no destino.

Conseqüentemente, as empresas de transporte rodoviário necessitam dispor de estruturas de apoio, ou seja, instalações geograficamente distribuídas, chamadas, em muitos casos, de *filiais*, nas quais são consolidadas cargas de diferentes origens, para um ou

mais destinos convergentes. Para uma empresa, a localização dessas *filiais*, na quase totalidade das vezes, são definidas ao longo do tempo, em função da demanda de cargas, bem como pela prática e experiência do responsável pela operação da empresa.

Existem vários benefícios na consolidação de carga parcelada, e talvez o mais relevante é a possível redução dos custos de transporte nas transferências de longa distância, através da agregação de cargas de diferentes origens para o mesmo destino ou destinos próximos. Assim, o planejamento da rede de transporte de uma transportadora, ou seja, a definição da localização e da área de atuação de cada um destes terminais de consolidação, é um componente crítico para o desempenho do sistema como um todo. Mais especificamente, o objetivo é determinar o número de terminais de consolidação, a localização de cada um deles, bem como sua respectiva área de atuação, de

forma a minimizar a somatória dos custos envolvidos, que englobam custos variáveis de transporte e custos fixos de operação desses terminais, atendendo requisitos de nível de serviço pré-definidos.

Muitas empresas de transporte de carga parcelada, em particular no segmento expresso, isto é, com prazos de entrega reduzidos e garantidos, têm desenvolvido sistemas de coleta, transferência e entregas usando redes do tipo “*hub-and-spoke*”. Ao invés de se estabelecerem ligações diretas entre todas as filiais, cujos volumes de carga nem sempre justificam a frequência que seria necessária para atender requisitos de nível de serviço (em particular prazos de entrega), algumas filiais funcionam como pontos concentradores de carga, viabilizando um sistema de transferência eficiente, tanto em termos de custos quanto de qualidade de serviço, através da consolidação de cargas.

O termo “*hub-and-spoke*” é utilizado para descrever a forma com que a rede de transportes está desenhada. Em uma tradução direta, temos “cubo e raio” fazendo uma analogia com as rodas de uma carroça, por exemplo. Segundo Aykin (1995), sistemas do tipo “*hub-and-spoke*” passaram a ser muito utilizados no transporte aéreo dos Estados Unidos, principalmente com o Ato de Desregulamentação do Transporte Aéreo de 1978, que permitiu às companhias aéreas escolherem as rotas que quisessem ofertar e as respectivas tarifas que iriam praticar. Tais mudanças tiveram efeitos profundos sobre muitos aspectos da operação aérea desse país, particularmente no que tange a tarifas, nível de serviço, qualidade e segurança. Mas, talvez o mais importante foi que estas empresas aéreas alteraram a estrutura de suas rotas, desenvolvendo redes do tipo “*hub-and-spoke*”.

A ilustração da Figura 1 representa um exemplo de uma rede do tipo “*hub-and-spoke*”, em que os nós k e l representam os terminais para consolidação de carga (“*hubs*”) e os nós i e j aqueles que são atendidos através dos terminais (“*spokes*”). Um fluxo de carga T_{ij} , com origem no nó i e destino em j , é atendido da seguinte forma: inicialmente a carga em i é enviada para o terminal de consolidação (“*hub*”) k , onde é consolidada com outras cargas e enviada para o “*hub*” l e daí distribuída para os pontos atendidos por l , incluindo o nó j .

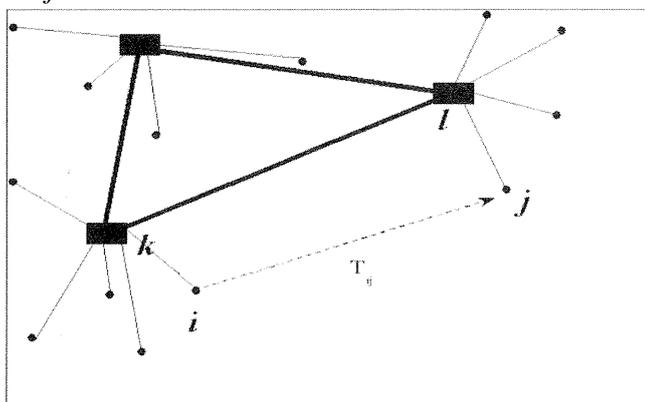


Figura 1. Exemplo de rede do tipo “*hub-and-spoke*”

Assim, pretende-se, neste artigo, descrever uma estratégia de solução para o problema de otimização da configuração de uma rede do tipo “*hub-and-spoke*” para o transporte rodoviário de carga parcelada no Brasil, utilizando-se algoritmos genéticos para a resolução. Uma contribuição relevante e inédita da estratégia proposta é que a mesma permite considerar não apenas um único fator de economia de escala para os custos de transporte, como nos trabalhos encontrados na literatura, mas fatores que variam de acordo com os respectivos volumes de carga entre terminais de consolidação. Adicionalmente, é apresentado também um estudo de caso real para uma empresa que opera no segmento de transporte de carga parcelada pelo modal rodoviário no Brasil.

Este artigo está organizado da seguinte forma: o próximo item contém uma visão geral do problema de localização de terminais, bem como uma revisão bibliográfica sobre o assunto. No item 3 é apresentada a formulação matemática do problema, seguindo-se, no item 4, o detalhamento da estratégia de solução baseada em Algoritmos Genéticos. Já o item 5 corresponde ao estudo de caso, com a aplicação da metodologia proposta ao problema real de uma transportadora de carga parcelada e o item 6 às considerações finais, bem como recomendações para trabalhos futuros.

2 PROBLEMAS DE CONFIGURAÇÃO DE REDES NA LITERATURA

O Problema de Localização de Terminais Não Capacitado com Alocação Única (PLTNC-AU) consiste em determinar o número e a localização de terminais de consolidação (“*hubs*”) e quais pontos ou filiais (“*spokes*”) são alocados a cada terminal de consolidação (“*hub*”), de forma a minimizar o custo total, compreendendo custos variáveis de transporte e custos fixos de operação desses terminais. Os terminais de consolidação são considerados não capacitados e cada filial só pode ser atendida por um único terminal de consolidação, daí o nome alocação única.

O PLTNC-AU foi estudado primeiramente por O’Kelly (1987), que formulou um modelo de programação inteira quadrática e propôs duas heurísticas, sendo ambas fundamentadas na enumeração exaustiva de todas as alternativas de localização para “*hubs*”, enquanto que o critério para a designação dos nós não-“*hubs*” aos “*hubs*” baseou-se exclusivamente na distância ao “*hub*” mais próximo.

Segundo Abdinnour-Helm (1994), o PLTNC-AU está relacionado a diversos outros problemas, como por exemplo o p -“*hub*” *Median Problem*, em que o número de “*hubs*” é definido a priori. O’Kelly (1987) propôs a primeira formulação matemática para esse problema, como um problema de programação inteira quadrática. Segundo o autor, mesmo esse problema,

em que o número de “hubs” é fixo, pertence à categoria conhecida como NP-difícil (do inglês “NP-hard”), o que inviabiliza a obtenção da solução ótima através de algoritmos exatos.

De acordo com Sohn e Park (1998), o termo correto para denominar esse problema é *p-hub location problem*, pois o termo “median” é geralmente usado para outros tipos de problema, em que não há fluxo entre todos os pares de nós. Os autores consideraram tanto o problema com alocação única, como também com alocação múltipla. Para o problema de alocação única, mais difícil do ponto de vista matemático, os autores propuseram um novo modelo matemático que permitiu reduzir pela metade o número de variáveis e restrições em relação à formulação proposta por Skorin-Kapov *et al.* (1996), possibilitando a obtenção de soluções ótimas para a maioria das instâncias analisadas pelos autores.

Uma heurística de troca (única e dupla) foi proposta por Klincewicz (1991), bem como uma heurística de agrupamento de pontos (*cluster*) para o *p-hub location problem*. Em seu trabalho posterior, Klincewicz (1992) propôs duas outras heurísticas, baseadas em busca tabu e em GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*). Skorin-Kapov, D. e J. Skorin-Kapov (1994) desenvolveram uma técnica de busca tabu modificada, e duas outras heurísticas foram desenvolvidas por Campbell (1996). O primeiro algoritmo exato a resolver este problema foi proposto por Skorin-Kapov *et al.* (1996), e se mostrou prático para redes de até 25 nós.

Klincewicz (1991) propôs duas heurísticas para o PLTNC-AU, sendo uma delas nomeada com Heurística de Troca e outra chamada de Heurística de Agrupamento, obtendo boas soluções para uma grande quantidade de testes realizados. Também O’Kelly (1992) propôs uma heurística aproximada para resolver o PLTNC-AU. Abdinnour-Helm e Venkataramanan (1995) desenvolveram uma heurística baseada em *branch-and-bound* e em algoritmos genéticos para resolver esse problema.

Skorin-Kapov, D. e J. Skorin-Kapov (1994) propuseram um método de solução baseado em Busca Tabu, e para teste deste método de solução, foi utilizada a mesma base de dados que O’Kelly (1987) utilizou, sendo os dados do fluxo aéreo de passageiros entre as 25 maiores cidades dos Estados Unidos em 1970. Os resultados computacionais foram apresentados em subconjuntos de 10, 15, 20 e 25 cidades e 2, 3 e 4 terminais para cada conjunto de cidades.

Para todas os testes realizados, a busca tabu permitiu melhorar todas as soluções encontradas até a época. Skorin-Kapov *et al.* (1996) verificaram que através da busca tabu foi possível encontrar a solução ótima em todos os casos, sendo a mesma sugerida para resolver problemas de maior porte, como os problemas reais em redes de transporte de carga parcelada.

Abdinnour-Helm (1998) desenvolveu uma heurística híbrida para resolver o PLTNC-AU, obtendo

a solução ótima em 98% dos casos (63 de um total de 64 problemas). Esta heurística foi baseada em algoritmo genético e busca tabu, sendo o primeiro utilizado para resolver a parte locacional do problema, ou seja, definir a quantidade e a localização de “hubs”, e a busca tabu para a parte alocacional do problema, ou seja, a alocação de nós não-“hub” aos nós “hubs”.

Estratégias de solução baseadas em algoritmos genéticos também foram aplicadas por Jaramillo *et al.* (2002) para a resolução de outros tipos de problemas de localização de instalações, entre os quais problemas de carga fixa capacitados e não-capacitados, o problema de cobertura máxima, e modelos de localização competitiva, com resultados bastante promissores em relação a outros métodos disponíveis na literatura.

Silva e Cunha (2003) também utilizaram algoritmos genéticos para a solução do PLTNC-AU, desenvolvendo duas heurísticas chamadas AG1 e AG2. Nesse trabalho, os algoritmos genéticos foram utilizados tanto para a parte locacional como para a parte alocacional do problema, obtendo excelentes resultados em comparação com as únicas duas heurísticas disponíveis para a solução deste problema, apresentadas nos trabalhos de Abdinnour-Helm e Venkataramanan (1995) e de Abdinnour-Helm (1998).

Entretanto, em nenhum desses trabalhos foi considerada uma questão prática e importante que ocorre no segmento de transportadoras de carga parcelada no Brasil: o fator de redução (economia de escala) do custo unitário de transporte entre dois “hubs” pode ser variável e função não só da distância e da localização dos terminais, como também do volume total de carga entre esses dois pontos. Dessa forma, procura-se levar em consideração que uma configuração da rede com muitos “hubs” não só representa maiores custos fixos, mas também custos de transporte mais elevados, uma vez que os volumes de carga entre “hubs” nem sempre podem justificar cargas fechadas em veículos grandes, nem tampouco é possível aguardar um volume de carga suficiente para o despacho de um veículo grande com carga completa, em função dos prazos de entrega acordados com os clientes e da prática do mercado.

É oportuno destacar que, na prática, as modificações e os investimentos necessários para que uma filial de uma transportadora opere como “hub” são, em geral, de pequena monta e sem nenhuma especificidade. Assim, não cabe, nesse caso, a consideração de custos de saída (também conhecidos como custos irrecuperáveis ou “*sunk costs*”), ou seja custos que não podem ser recuperados quando a empresa decide sair do mercado ou, no caso, desativa ou deixa de operar um terminal de consolidação. Em geral a consideração dos custos irrecuperáveis depende principalmente do grau de especificidade do uso do capital (o que não é

relevante neste caso); da existência de mercados para máquinas e equipamentos usados (o que está assegurado, dado o tamanho do mercado de empresas transportadoras no Brasil); da existência de mercados para o aluguel de bens de capital (o que não é pertinente, pois não há nenhum bem de capital específico que não possa ser vendido ou alienado).

3 MODELAGEM MATEMÁTICA

O problema proposto, denominado Problema de Localização de Terminais Não Capacitado com Alocação Única e Fatores de Redução Variáveis (PLTNC-AUFRV) consiste em determinar o número e a localização de terminais de consolidação (“hubs”) e a alocação dos pontos ou filiais (“spokes”) a cada terminal de consolidação (“hub”), de forma a minimizar o custo total de transporte e fixo das instalações.

Neste problema o número de terminais de consolidação é uma variável de decisão, uma vez que, a cada instalação candidata está associado um custo fixo total de operação do terminal de consolidação (“hub”). Esse custo fixo, não varia com a quantidade de carga movimentada no local, representa basicamente o adicional de equipamentos e pessoal (incluindo administrativo) para que a filial passe a operar como terminal, ao incorporar as operações de processamento de carga (descarga, conferência, movimentação interna e carga) e “cross-docking”.

Seja $i=1, 2, \dots, N$ um conjunto de filiais de uma empresa transportadora. Para duas filiais $i \in N$ e $j \in N$, a quantidade de carga que necessita ser movimentada entre i e j é representada por T_{ij} e o custo unitário de transporte entre i e j é dado por c_{ij} . Os valores O_i e D_i representam, respectivamente, os volumes totais de carga originados na filial i e destinados à mesma, respectivamente; f_j reflete o total de custos fixos de instalação e operação de um terminal de consolidação localizado no nó j . Conforme mencionado anteriormente, $\alpha_{km}(T)$ corresponde a um fator de redução (economia de escala) na ligação entre os terminais de consolidação k e m , que é função do volume total de carga movimentada T_{km} entre esses terminais. Deve-se notar que o parâmetro $\alpha_{km}(T)$ é único para cada ligação entre “hubs”, não havendo simetria, ou seja, $\alpha_{km}(T) \neq \alpha_{mk}(T)$; adicionalmente, esse parâmetro não necessita nem ser do tipo de uma função contínua.

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

$$Y_j = \begin{cases} 1, & \text{se a filial } j \text{ opera como um hub} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se a filial } i \text{ é designada ao hub } j \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

A formulação matemática para o PLTNC-AUFRV pode ser escrita como:

Minimizar:

$$\sum_i \sum_k X_{ik} c_{ik} (O_i + D_i) + \sum_j \sum_m X_{jm} \sum_i \sum_k X_{ik} (T_{ij} c_{km} \alpha_{km}(T)) + \sum_j Y_j f_j \quad (1)$$

sujeito a:

$$\sum_i X_{ij} \leq M Y_j \quad \text{para todo } j \in N \quad (2)$$

$$\sum_j X_{ij} = 1 \quad \text{para todo } i \in N \quad (3)$$

$$X_{ij}, Y_j \in \{0,1\} \quad \text{para todos } i \in N \text{ e } j \in N \quad (4)$$

A função objetivo (1) compreende a minimização da soma de três parcelas de custo: de transporte para as cargas com origem e destino em cada terminal, de transferência entre terminais e de custo fixo total para os terminais selecionados. A restrição (2) impõe que uma filial i só possa ser atendida a partir de um “hub” selecionado, sendo M um valor constante suficientemente grande (neste caso, pode-se adotar $M = n$). A restrição (3) assegura que cada filial seja designada a um e somente um “hub”. A restrição (4) está relacionada à integralidade das variáveis de decisão. Deve-se notar que esta formulação corresponde a um problema de programação inteira mista com função objetivo quadrática. A mesma se diferencia da formulação apresentada por Silva e Cunha (2003) por considerar os fatores de economia de escala variáveis na função objetivo.

4 ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO

Conforme Silva e Cunha (2003), o PLTNC-AU possui ordem de complexidade exponencial e o que impede a solução de instâncias reais através de algoritmos exatos disponíveis comercialmente. Já no caso do PLTNC-AUFRV, a função objetivo é não linear, o que reforça ainda mais a necessidade de uma heurística para resolução de instâncias reais, como as que se pretende resolver. Assim, a estratégia de solução aqui proposta baseia-se em Algoritmo Genético. Mais especificamente, propõe-se um aprimoramento das duas heurísticas baseadas em Algoritmo Genético propostas por Silva e Cunha (2003), a fim de considerar o fator de economia de escala $\alpha(T)$ variável com a carga total transportada entre os “hubs”.

O conceito de Algoritmo Genético foi proposto pela primeira vez por Holland (1975). Algoritmos Genéticos

são classificados como heurísticas populacionais, em que se trabalha simultaneamente com inúmeras soluções, a população de soluções, que são combinadas de alguma maneira para gerar novas soluções. Boas referências sobre o assunto podem ser encontradas em Goldberg (1989), Reeves (1993), Beasley (1999), entre outros.

A aptidão ou “fitness” de um indivíduo da população corresponde à avaliação do valor da função objetivo do problema de otimização, podendo esse valor sofrer uma penalização caso o indivíduo represente uma solução que viola alguma restrição do problema de otimização. Esse esquema é bastante flexível e conveniente, permitindo representar diferentes tipos de função objetivo, incluindo não lineares e não contínuas, como no caso do presente problema.

Em termos de otimização, cada indivíduo, correspondente a uma possível solução para o problema, é representado através de uma seqüência ou cromossomo. Esse é um aspecto chave para a utilização de algoritmos genéticos.

São utilizadas para o PNLTC-AUFRV versões modificadas das duas heurísticas, propostas por Silva e Cunha (2003) para solução do PNLTC-AU utilizando algoritmos genéticos, denominadas AG1 e AG2, respectivamente. Na primeira delas, denominada AG1, o algoritmo genético foi utilizado para a seleção dos melhores nós “hubs”, sendo cada uma das demais filiais não-“hubs” alocada ao seu “hub” mais próximo. Isto foi possível tendo em vista que os “hubs” não apresentam restrição de capacidade.

A estrutura de um cromossomo que representa um membro qualquer da população para o AG1 corresponde a um vetor de bits 0 e 1. Este vetor tem dimensão igual ao número total de nós da rede em consideração. O valor 1 indica que a filial é um “hub” e o valor 0 caso contrário.

A grande virtude da estratégia AG1 é a sua simplicidade, pois permite determinar rapidamente a aptidão de cada indivíduo da população. Entretanto, nos testes computacionais realizados para validação da heurística, conforme o trabalho de Silva e Cunha (2003), verificou-se que, embora a heurística AG1 permitisse selecionar os melhores “hubs”, a alocação heurística das filiais (nós não “hubs”) com base na menor distância, às vezes não levava à solução ótima, em função de custos menores nas ligações entre “hubs” decorrentes da economia de escala associada à transferência entre “hubs”.

A segunda heurística, denominada AG2, consiste na execução do algoritmo genético em duas fases. A primeira fase corresponde exatamente ao AG1, permitindo definir a quantidade e localização dos “hubs”. Uma vez selecionados os “hubs”, um novo algoritmo genético é processado para a fase alocaional, ou seja, para determinar a alocação ótima das filiais (nós não “hubs”) aos “hubs” anteriormente selecionados. O objetivo foi tentar sair do ótimo local,

definindo novas alocações para os nós não “hub”. Nesta segunda fase da heurística AG2, a estrutura de um cromossomo que representa um membro qualquer da população corresponde a um vetor de bits 0, 1, .. K, onde K representa o número de “hubs” selecionados na primeira fase. Assim, um bit com valor k ($1 \leq k \leq K$) significa que aquele nó não “hub” está alocado ao k-ésimo “hub”.

Um exemplo ilustrativo é apresentado na Figura 2, representando uma rede com 10 nós (ou terminais) candidatos a “hubs”. O caso (a) representa um possível cromossomo de AG e também da primeira fase de AG2, tendo sido selecionadas duas instalações como “hubs” nos nós 4 e 6; pode-se também visualizar a alocação dos nós não-“hubs” 1, 2, 3, 5, 7, 8, 9 e 10 aos respectivos “hubs” mais próximos. Para o AG2, caso a melhor solução obtida na primeira fase corresponda aos “hubs” nos nós 4 e 6, o caso (b) indica que os bits podem assumir os valores 1 ou 2, correspondentes aos nós 4 e 6, respectivamente. Um cromossomo resultante dessa segunda fase alocaional dos nós não-“hubs” é indicado em (c), onde o nó 1 é alocado ao “hub” que ocupa a posição 1 no vetor hub, que é a filial 4; analogamente o nó 2 é atendido pela filial 4 e assim sucessivamente.

A principal modificação nas heurísticas AG1 e AG2 para o PLTNC-AUFRV consiste na função que calcula a aptidão de cada um dos indivíduos da população: uma vez definida a configuração da rede em termos dos “hubs” e de quais pontos ou filiais (“spokes”) são alocados a cada “hub”, determina-se o fluxo total entre cada par de “hubs”, o que permite determinar o fator de redução de escala correspondente e o custo total de transporte; as demais parcelas de custo são calculadas da mesma maneira que descrito em Silva e Cunha (2003).

Outros detalhes quanto à estrutura geral de funcionamento de AG1 e AG2 podem ser vistos no trabalho de Silva e Cunha (2003).

5 ESTUDO DE CASO

As heurísticas propostas foram aplicadas a um problema real de uma empresa que opera no segmento de transporte de carga parcelada pelo modo rodoviário. Essa empresa está, há três anos consecutivos, entre as 10 melhores empresas de transporte rodoviário de cargas segundo avaliação publicada anualmente na revista *Maiores & Melhores do Transporte e Logística* (2002).

Atualmente esta empresa opera com “hubs” que foram criados de forma empírica para atender os objetivos de expansão e crescimento da sua área de atuação. Para garantir um nível de serviço mínimo prestado aos clientes, cada nova unidade inaugurada possuía inicialmente uma baixa demanda, e para

acompanhar as necessidades de nível de serviço impostas pelo mercado, essa demanda gerada por diferentes origens eram consolidadas nestes “hubs” a fim de se formarem carregamentos diretos, reduzindo-se assim o custo por unidade transportada.

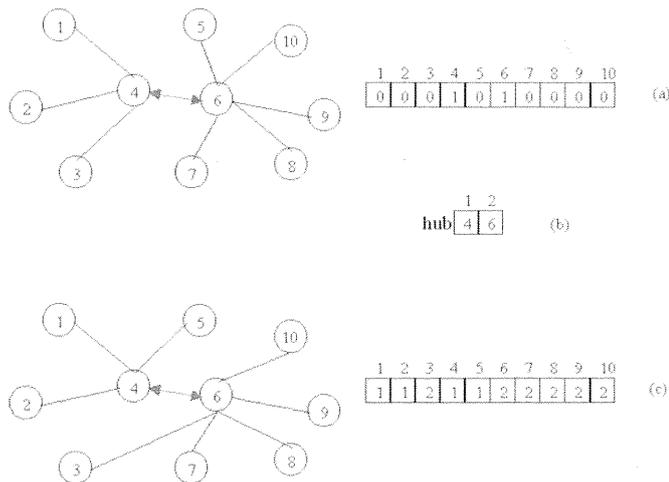


Figura 2. Exemplo de representação binária para o PLTNC - AUFRV

Após mais de 60 anos no mercado, essa transportadora necessitou revisar e validar a configuração atual da rede, ou seja, definir quais filiais devem funcionar como terminais de consolidação (“hubs”) e quais filiais se ligam a elas, com foco na minimização do custo total de transporte e atendimento de requisitos de nível de serviço nas operações.

A empresa em estudo transporta em média 173 mil toneladas de carga por ano, sendo que o fluxo principal desta carga refere-se ao transporte cujas origens principais estão nas regiões sul e sudeste do país, e os respectivos destinos principais concentram-se nas regiões norte e nordeste. A receita operacional líquida, que corresponde ao total das vendas, deduzindo-se as devoluções, descontos incondicionais e impostos que incidem sobre o faturamento, está em torno de R\$ 110 milhões por ano.

A frota desta empresa é composta de veículos próprios e agregados, sendo que a frota própria é direcionada principalmente para as operações de coleta e entrega de carga, e os veículos agregados estão dedicados principalmente às operações de transferência da carga entre filiais. A frota própria é composta de 275 veículos, com idade média de 10 anos. A frota agregada é composta de 800 veículos, com idade média de 7 anos. Aproximadamente 55% da frota é rastreada via satélite.

Esta empresa possui 46 filiais, estando presente nos seguintes estados: RS, PR, SC, SP, RJ, MG, ES, GO, DF, TO, PA, BA, SE, AL, PE, PB, RN, CE, PI, MA,

atendendo mais de 6.000 municípios do país. A empresa iniciou suas operações com uma única unidade no norte do estado de Minas Gerais na década de 30. Na década de 50 já possuía filiais nos estados de SP, RJ, MG e BA. A consolidação da empresa no mercado se deu nas décadas de 70 e 80 culminando com a abertura de outras filiais, alcançando uma estrutura bem próxima da configuração atual, demandando 3.700 empregos diretos.

A abertura destas filiais foi, de forma geral, realizada de forma empírica, levando em conta o potencial para geração de negócios no local, e também, em alguns casos, para acompanhar a concorrência, servindo como alternativa para os serviços de transportes ofertados.

Juntamente com a abertura destas filiais, foram criados também, de forma empírica, terminais para consolidação de cargas, com o objetivo de se minimizarem os custos de transporte, e num primeiro momento, garantir o nível de serviço prestado aos clientes, cumprindo prazos acordados.

Para a realização do estudo de caso foi necessário um levantamento de dados dos fluxos de carga entre filiais e dos custos de transporte associados a estas operações. Os custos variáveis referem-se ao custo de transferência de carga entre filiais, e ao custo dos equipamentos para movimentação desta carga nos terminais, como empilhadeiras, transpaleteiras, etc.

Primeiramente definiu-se um período mínimo para análise dos dados, sendo que a primeira dificuldade foi na obtenção dos dados históricos destes fluxos, pois a base de dados desta empresa não era unificada, necessitando da manipulação de diversos relatórios gerenciais para se extrair tais informações. Os dados obtidos e utilizados neste estudo referem-se ao período de janeiro a agosto de 2002.

Os custos de transferência entre filiais foram obtidos junto ao Departamento de Tráfego da empresa, que possui uma tabela de fretes pagos para transferências entre filiais para diversos tipos de veículos. Como imagina-se utilizar esta mesma frota em uma nova configuração, foi utilizada a tabela de carretas agregados, pois estas representam mais de 80% de toda a transferência de cargas entre filiais. É importante salientar que, ao contrário dos problemas encontrados na literatura e considerados por Silva e Cunha (2003) para validação das heurísticas propostas, os custos não são simétricos, ou seja, o frete pago de uma hipotética cidade x para outra y é diferente do frete pago de y para x, e estes diferentes valores de frete acompanham os fluxos. Por exemplo, o frete da região sul e sudeste do país para o nordeste é maior que no sentido inverso.

Os valores assumidos pelo parâmetro de redução de escala α_{km} (T) seguiram o fluxo médio diário de carga entre filiais conforme apresentado na Tabela 1.

O custo fixo para o estabelecimento de um “hub” numa filial existente, neste estudo de caso, não implica na mudança de local do terminal, ou em obras para a adequação física do mesmo, mas sim na criação de

equipes de descarga e consolidação destes veículos de transferência, de tal forma que responda agilmente à nova demanda, ajustando seus processos internos. Este raciocínio acompanhou a prática atual da empresa na formação de “hubs” de forma empírica. Na prática há somente, em alguns casos, um reforço na equipe para atender a nova demanda, e em outros casos nem isso. Existem hoje 08 (oito) “hubs” constituídos em São Paulo-SP, Curitiba-PR, Goiânia-GO, Vitória-ES, Recife-PE, Feira de Santana-BA, Teresina-PI e Belo Horizonte-MG.

Tabela 1. Valores de α_{km} (T) de acordo com o fluxo médio diário de carga

Kg/dia	α_{km} (T)
Até 1000	1.00
1000 – 3000	0.95
3000 – 6000	0.90
6000 – 12000	0.80
Acima de 12000	0.70

Os valores considerados para o adicional de custo fixo mensal para uma filial que tornam um “hub” foram estimados com base no custo da mão-de-obra adicional requerida, incluindo salários e encargos de uma equipe básica para descarga de um veículo em trânsito, que é composta de 01 conferente e 02 ajudantes de carga, tendo um valor estimado de 2.600 unidades monetárias por mês. Os salários do pessoal de operação sempre variam com o nível de produção e estão associados ao custo variável, mas neste caso existe uma equipe fixa que não depende dos volumes movimentados.

Para complementar a análise, foi feita uma análise de sensibilidade do valor desse custo fixo mensal, correspondente a uma uma variação de $\pm 50\%$ deste valor, ou seja, tanto adicionando 50% ao valor (resultando \$3.900 por mês) como subtraindo-se 50% do valor original (resultando \$1.300 por mês), além da alternativa em que não há adicional de custo fixo.

Para o AG1, o tamanho da população foi de 100 indivíduos, o critério de parada foi que se execute o algoritmo por 30 gerações, a probabilidade de

cruzamento igual a 99% e a probabilidade de mutação igual a 1%. O critério de seleção utilizado foi a seleção por competição e o cruzamento realizado em dois pontos aleatórios.

Na heurística AG2, na sua primeira fase, os parâmetros utilizados foram os mesmos de AG1. Para a sua segunda fase, o tamanho da população utilizado foi de 250 indivíduos, tendo como critério de parada a execução de 30 gerações. A probabilidade de cruzamento foi igual a 99% e a probabilidade de mutação igual a 1%. O critério de seleção foi a seleção por competição e com dois pontos de cruzamento.

Os resultados obtidos podem ser acompanhados na Tabela 2, e a evolução da busca, ao longo das gerações, pode ser vista na Figura 3. Os processamentos foram realizados em um PC equipado com 128MB de memória RAM e um microprocessador Intel Pentium III rodando a 800 MHz.

Para o custo fixo igual a zero, ou seja, sem a necessidade de nenhuma adequação que gere custo fixo adicional, os “hubs” encontrados, tanto para AG1 como para AG2, foram os nós São Paulo-SP (1), Varginha-MG (28), Campinas-SP (32), Joinville-SC (35) e Ribeirão Preto-SP (45). Para os demais valores de custo fixo, os “hubs” encontrados foram São Paulo-SP (1) e Ribeirão Preto-SP (45).

As heurísticas apresentaram “hubs” localizados principalmente nas regiões sul e sudeste do país. Um dos principais fatores é que o custo de transporte aplicado pela empresa é menor no sentido nordeste para sul/sudeste do que no sentido inverso, conforme já informado. As diferenças de custos da melhor solução obtida pelas heurísticas AG1 e AG2 pode ser explicada pelas diferentes alocações das filiais aos “hubs” selecionados.

No estudo de caso foi verificada também a eficácia do AG2, principalmente no que diz respeito à parte alocaional do problema, reduzindo-se o custo total em todos os processamentos realizados.

Os resultados da heurística AG1 confirmaram o desempenho esperado desta heurística, conforme os resultados obtidos no trabalho de Silva e Cunha (2003), obtendo resultados inferiores se comparado com AG2, demonstrando que a alocação dos nós aos “hubs” com base exclusivamente na distância não é um bom método, apesar do menor tempo de processamento.

Tabela 2. Resultados obtidos com a aplicação do estudo de caso.

Heurística		Custo Fixo (\$/mês)			
		0	1.300	2.600	3.900
AG1	Custo (\$/mês)	49.994,90	53.517,60	56.117,60	58.717,60
	Tempo CPU (seg)	117,5	117,2	117,5	117,3
	Hubs	1; 28; 32; 35; 45	1; 45	1; 45	1; 45
AG2	Custo (\$/mês)	49.326,01	52.926,03	55.526,30	58.126,30
	Tempo CPU (seg)	161,8	162,4	161,8	161,8
	Hubs	1; 28; 32; 35; 45	1; 45	1; 45	1; 45

A heurística AG2 teve um desempenho superior se comparado com AG1, com custo em média 1,1% melhor, com tempo de processamento em média 38% superior que AG1. Do ponto de vista prático,

apesar do maior tempo de processamento, AG2 com seu menor custo total, possui um grande potencial de implantação prática dos resultados obtidos.

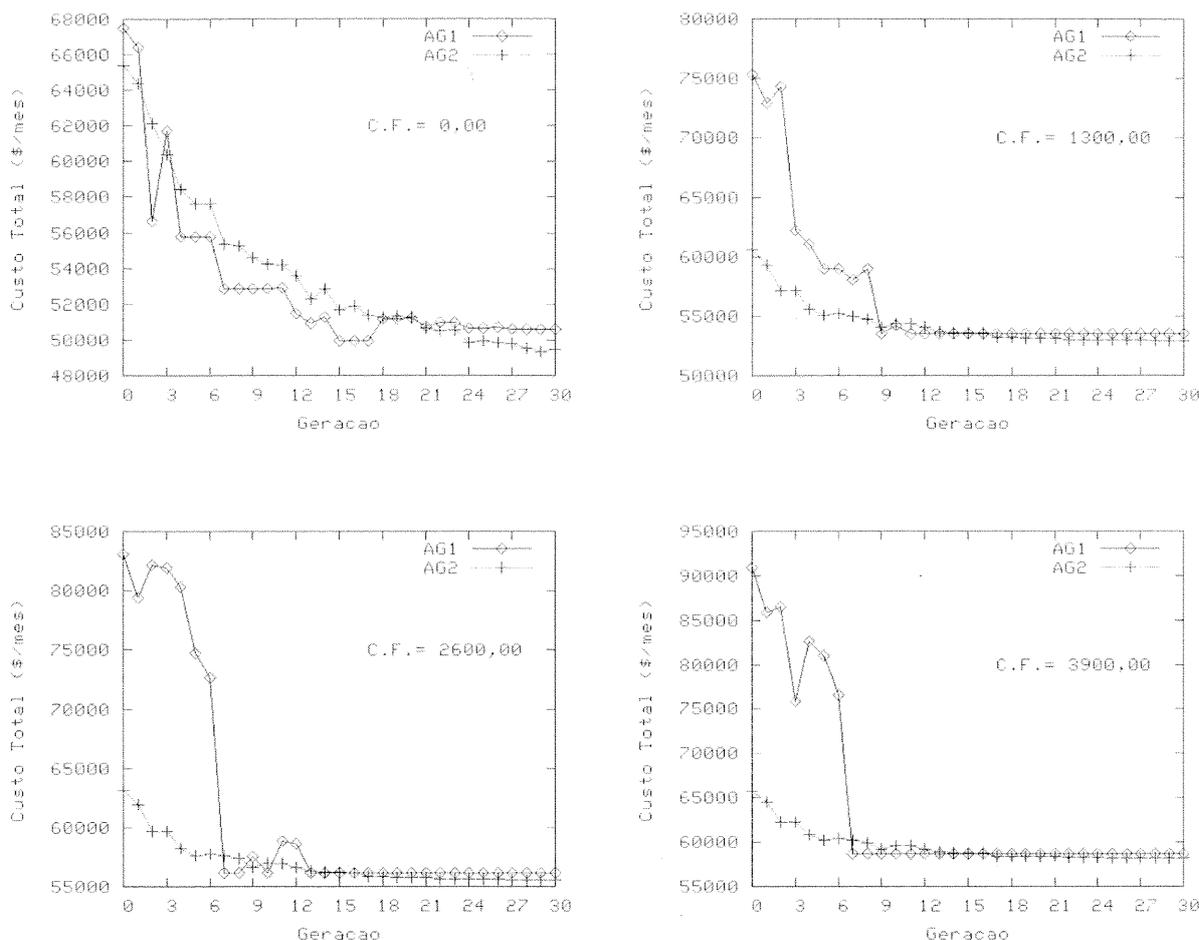


Figura 3. Evolução da busca para custo fixo igual a zero, 1300, 2600 e 3900 respectivamente.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O transporte rodoviário de cargas, pela sua importância cada vez maior no contexto logístico no Brasil, requer a contínua busca da melhoria de desempenho, medido em termos de eficiência econômica e de qualidade de serviço. Muitas transportadoras foram crescendo, se expandindo, abrindo novas filiais, sem um planejamento de suas redes logísticas. Assim, existem muitas oportunidades para redução de custos e melhoria de nível de serviço.

Nesse contexto, este trabalho abordou o problema de localização de terminais de consolidação de cargas e alocação de filiais a esses terminais. Muitas empresas de transporte de carga parcelada estruturam seus sistemas de coleta, transferência e entregas usando redes do tipo “hub-and-spoke”.

Foi apresentada a formulação matemática desse problema e propostas duas heurísticas para a sua solução, baseadas em algoritmos genéticos e derivadas do trabalho de Silva e Cunha (2003).

A aplicação do método para solução do PLTNC-AUFRV neste trabalho nunca havia sido tratada dessa forma anteriormente na literatura. O escalonamento do parâmetro α (fator de redução no custo de transporte na ligação entre “hubs”) de acordo com o fluxo médio diário de carga entre “hubs”; e a utilização dos Algoritmos Genéticos tanto para a parte locacional (definição da quantidade e localização de “hubs”), como para a parte aloacional do problema (definição da designação de um nó não-“hub” a um “hub” definido), fazem deste trabalho inédito. Destaca-se ainda a aplicação da estratégia de solução proposta ao importante problema de configuração da rede para transportadoras de carga parcelada no Brasil. As heurísticas desenvolvidas se mostraram eficazes para solução do problema proposto. O resultado final obtido com o modelo atende ao que foi proposto, ou seja, apresentar a nova configuração da rede que minimiza o custo total de transporte, apresentando um resultado coerente com a realidade da transportadora em estudo. O tempo de processamento, no pior caso, foi em torno

de 163 segundos, sendo considerado um tempo aceitável, principalmente dado o tipo de decisão a ser tomada com o resultado encontrado (estratégico / tático).

Como continuidade deste trabalho, pretende-se ainda investigar o desenvolvimento de uma estratégia de solução baseada em algoritmo genético híbrido, com a incorporação de alguma heurística de melhoria que possa ser aplicada às populações de soluções sendo geradas. E também no desenvolvimento de um algoritmo exato que possa resolver, de forma eficaz, instâncias maiores, como deste estudo de caso. Futuros trabalhos podem considerar ainda a restrição de capacidade nos terminais de consolidação, algo ainda não explorado na literatura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdinnour-Helm, S. (1994) *Solutions approaches to hub location problems*. Department of Decision and Information Systems, Indiana University.
- Abdinnour-Helm, S. e M.A. Venkataramanan (1995) Solution approaches to hub location problems. *Annals of Operations Research (to appear)*.
- Abdinnour-Helm, S. (1998) A hybrid heuristic for the uncapacitated hub location problem. *European Journal of Operations Research*, v.106, p.489-499.
- Aykin, T. (1995) Network policies for hub-and-spoke systems with application to the air transportation system. *Transportation Science*, v.29, n.3, p.201-221.
- Beasley, J. E. (1999) *Population Heuristics*. The Management School, Imperial College, Londres.
- Campbell, J.F. (1996) Hub location problem and the p-hub median problem. *Operations Research*, v.44, p.923-936.
- Goldberg, D.E. (1989) *Genetic algorithm in search, optimization and machine learning*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Holland, J.H. (1975) *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control and artificial intelligence*. University of Michigan Press.
- Jaramillo, J.H.; J. Bhadury e R. Batta (2002) On the use of genetic algorithms to solve location problems. *Computer & Operations Research*, n.29, p.761-779.
- Klincewicz, J.G. (1991) Heuristics for the p-hub location problem. *European Journal of Operations Research*, n.53, p.25-37.
- Klincewicz, J.G. (1992) Avoiding local optima in the p-hub location problem using tabu search and GRASP. *Annals of Operations Research*, n.40, p.283-302.
- MAIORES & MELHORES DO TRANSPORTE & LOGÍSTICA (2002) OTM Editora Ltda., São Paulo, n.15.
- O'Kelly, M.E. (1987) A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities. *European Journal of Operations Research*, n. 32, p.393-404.
- O'Kelly, M.E. (1992) Hub facility location with fixed costs. *The Journal of the Regional Science Association International*, n.71, v.3, p.293-306.
- Reeves, C.R. (1993) *Modern heuristics techniques for combinatorial problems*. Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- Silva, M. R. e C. B. Cunha (2003) Uma aplicação de algoritmos genéticos para a localização de terminais de consolidação de carga parcelada. *Anais do XVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Rio de Janeiro, v. 2, p.644-655.
- Skorin-Kapov, D. e J. Skorin-Kapov (1994) On tabu search for the location of interacting hub facilities. *European Journal of Operations Research*, n.73, p.502-509.
- Skorin-Kapov, D.; J. Skorin-Kapov e M. O'Kelly (1996) Tight linear programming relaxations of uncapacitated p-hub median problem. *European Journal of Operations Research*, n.94, p.582-593.
- Sohn, J. e S. Park (1998) Efficient solution procedure and reduced size formulations for p-hub location problems. *European Journal of Operations Research*, n.108, p.118-126.

CONTATOS

¹Nome: Marcos Roberto Silva
E-mail: marcos.roberto.silva@uol.com.br

²Nome: Claudio Barbieri da Cunha
E-mail: cbcunha@usp.br