

# Roteirização dinâmica de veículos usando simulação e algoritmo genético

Antonio Galvão Novaes<sup>1</sup>, Paulo Juliano Burin<sup>2</sup>, Edson Tadeu Bez<sup>3</sup> e Bernd Scholz-Reiter<sup>4</sup>

**Resumo:** Problemas dinâmicos de roteirização de veículos têm recebido crescente atenção dos pesquisadores em função da rápida evolução das tecnologias de telecomunicação, do tratamento da informação e dos avanços observados nas técnicas de análise, otimização e computação. Nos centros urbanos sujeitos a congestionamentos de tráfego elevados e imprevisíveis, os operadores logísticos costumam alocar, muitas vezes, um número excessivo de tarefas aos seus veículos, acarretando o não cumprimento de atividades programadas ao fim da jornada diária, situação essa que leva à não realização dos compromissos logísticos assumidos com seus clientes. Neste artigo é analisado um problema de roteirização dinâmica, em que parte das tarefas em excesso, que venham a ocorrer nos roteiros programados, é transferida para um veículo auxiliar, que efetua, assim, um roteiro dinâmico constituído pelas atividades provenientes dos veículos regulares. Para resolver o problema, foi utilizado um algoritmo genético, associado à simulação para obtenção de parâmetros relevantes.

*Palavras-chave:* roteirização dinâmica, algoritmo genético, simulação.

**Abstract:** Dynamic vehicle routing problems have received increasing attention in the literature due to the rapid evolution of telecommunication and information technologies, as well as advances in analytical and computational techniques. In large urban centers subject to critical and often unpredictable traffic congestion, logistics operators often use to allocate an excessive number of tasks to their vehicles, generating undone programmed activities at the end of the working day, thus impairing contractual obligations previously assumed with their clients. In this article, a dynamic routing problem is analyzed in which the tasks in excess, that might exceed the daily working time limit in a route, are assigned to an auxiliary vehicle, thus forming another dynamic route composed by the transferred tasks generated by the regular trucks. To solve the problem, a genetic algorithm was employed in association with a simulation program intended to get some relevant parameters.

*Keywords:* dynamic routing, genetic algorithm, simulation.

## 1. INTRODUÇÃO

Problemas dinâmicos de roteirização de veículos (*Dynamic Vehicle Routing Problems – DVRP*) têm recebido ultimamente grande atenção da comunidade científica das áreas de transporte e logística (Gendreau e Potvin, 1998; Mitrovic-Minic *et al.*, 2004; Mitrovic-Minic e Laporte, 2004; Ribeiro e Lorena, 2005; Golden *et al.*, 2008; Novaes *et al.*, 2009a, Branchini *et al.*, 2009; Lorini *et al.*, 2011; Novaes *et al.*, 2011). Problemas do tipo *DVRP* são usualmente relacionados, em situações dinâmicas diversas, com a alocação eficiente de veículos a tarefas, tais como coleta e entrega de mercadorias, realização de serviços (manutenção, atendimento de emergências, etc.), em que as tarefas são completadas dentro de um limite de tempo preestabelecido e a capacidade de carga do veículo não é excedida. Procura-se minimizar, nesses problemas, a distância ou o tempo de percurso, para isso utilizando uma heurística apropriada. O enfoque estático corresponde às situações em que todas as características do processo de roteirização são conhecidas antes que o veículo inicie sua rota e supondo que o plane-

jamento do roteiro mantenha-se inalterado (Larsen, 2001).

Quando as informações sobre as condições da viagem (novas demandas, alterações na sequência e nas características do percurso, etc.) mudam gradualmente ao longo da operação (ambiente *real time*) o problema é considerado dinâmico (Psaraftis, 1988; Larsen, 2001; Larsen *et al.*, 2007; Goel, 2008).

Boa parte dos modelos sobre *VRPs* apresentados na literatura são estáticos. Os tempos de deslocamento entre locais relevantes (depósitos, clientes) são usualmente obtidos a partir de modelos de caminho mais curto numa rede, com valores conhecidos em cada *link* (distâncias, tempos de percurso, custos). Em condições de congestionamento de tráfego, comuns em grandes cidades, esses elementos se alteram frequentemente. Em metrópoles como São Paulo, por exemplo, os tempos de percurso na distribuição urbana apresentam grande variabilidade. Isso ocorre porque, devido às condições extremas de tráfego e ao grande número de variáveis aleatórias envolvidas ao longo da rota, o tempo de ciclo do veículo apresenta grande dispersão. Como consequência, os operadores que entregam, apanham carga, ou executam serviços diversos, acabam alocando um maior número de clientes a seus roteiros de forma a melhorar a utilização do veículo e de sua tripulação, para assim reduzir custos. Em termos logísticos, no entanto, tal prática leva à ocorrência de tarefas não executadas ao fim do dia, com séria redução do nível de serviço. Isso porque um dos requisitos logísticos mais importantes é o de respeitar os prazos previamente acertados. E as tarefas não realizadas tendem a se acumular nos dias subsequentes, piorando ainda mais a situação.

Psaraftis (1988) discute as relações entre problemas de roteirização estática e dinâmica de veículos, identificando

<sup>1</sup> Antonio Galvão Novaes, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil. (e-mail: novaes@deps.ufsc.br).

<sup>2</sup> Paulo Juliano Burin, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil. (e-mail:).

<sup>3</sup> Edson Tadeu Bez, Universidade do Vale do Itajaí, São José, SC, Brasil. (e-mail:).

<sup>4</sup> Bernd Scholz-Reiter, Universidade de Bremen, Bremen, Alemanha. (e-mail:).

fatores que diferenciam estes dois tipos de enfoques. Larsen (2001), por sua vez, analisa em detalhe problemas reais de roteirização de veículos. Já Gendreau e Potvin (1998) apresentam classificações interessantes sobre problemas de roteirização dinâmica de veículos. Um ponto importante destacado por esses últimos autores é a área coberta pelo veículo: local (urbana), regional, nacional e internacional. Nossa aplicação refere-se a um problema urbano, em que as condições severas de tráfego exigem, muitas vezes, soluções emergenciais visando a manutenção do nível de serviço acordado com os clientes do serviço. Outro aspecto importante na classificação de Gendreau e Potvin (1998) refere-se ao tipo de carregamento do veículo. Na aplicação analisada neste trabalho, tem-se uma operação conhecida como *less-than-truck-load*, em que a quantidade de carga de cada cliente é menor do que a lotação do veículo, levando à consolidação de diversos pedidos num mesmo caminhão.

Este artigo é uma continuação de um trabalho anterior (Novaes et al., 2009a) e seu objetivo é apresentar uma alternativa dinâmica para um problema estático de coleta de produtos, em que se procura reduzir ao máximo o não cumprimento de tarefas planejadas ao fim do dia, ao mesmo tempo em que se procura melhorar o desempenho operacional da frota. Para isso será desenvolvido um esquema integrado de roteirização, em que parte das tarefas alocadas a um veículo é transferida para um veículo auxiliar, monitorado pelo depósito central. O trabalho se insere num projeto de pesquisas denominado LogGlobal – Improving Global Supply Chains, parte integrante de um projeto maior denominado Bragecrim – Brazilian-German Collaborative Research Initiative on Manufacturing Technology, patrocinado pela Fundação Capes, no Brasil, e pelo DFG – Deutsche Forschungsgemeinschaft, na Alemanha. Dentro dos objetivos do projeto, o problema de roteirização analisado está especificamente ligado à coleta de componentes produzidos por empresas fornecedoras (*OEM – Original Equipment Manufacturers*) e destinados a uma empresa montadora, ou *SI (system integrators)* no caso de computadores e outros produtos eletrônicos assemelhados. Ou seja, as tarefas eventualmente transferidas para um veículo auxiliar não implicam na necessidade de manuseio de carga fora do depósito, processo esse que, às vezes, requer equipamentos especializados, além de estar sujeito a outras eventuais restrições. Outras possíveis aplicações, fora do escopo desse projeto de pesquisa, incluem a instalação e manutenção de equipamentos, coleta de pacotes e pequenas encomendas, etc. A roteirização das tarefas do veículo auxiliar é otimizada através de um algoritmo genético (Goldberg, 1989; Ribeiro e Lorena, 2005). Ao longo do processo, isto é, à medida que os veículos vão executando as tarefas, informações obtidas centralmente são repassadas aos veículos, permitindo o remanejamento de parte das tarefas para o veículo de apoio.

## 2. ROTEIRIZAÇÃO ESTÁTICA PRELIMINAR

No caso a ser estudado neste trabalho, o veículo parte do depósito com todas as tarefas definidas antecipadamente, não sendo contempladas alterações na programação prévia. Assim, se não houver tempo suficiente para cumprir todas as tarefas programadas, parte das atividades serão deixadas para o dia seguinte, ou data posterior. O problema de roteirização analisado neste artigo é composto por um depósito

central e uma frota homogênea de veículos que atende uma região urbana  $\mathcal{R}$ . Cada veículo é alocado a um distrito, ou zona. Os veículos deixam o depósito bem cedo pela manhã, se deslocam até o distrito, percorrem uma rota ótima obtida através de um *PCV* (Problema do Caixeiro Viajante), realizam os serviços em cada cliente, e retornam ao depósito quando todas as tarefas forem cumpridas, ou quando o tempo máximo de jornada de trabalho se esgotar. No exemplo de aplicação consideramos nove distritos distribuídos em três anéis circulares, conforme mostrado na Figura 1. Trata-se de um processo de representação aproximada, em que os distritos têm a forma de cunhas (*wedges*), esquema esse bastante utilizado na simulação e análise de problemas de distribuição com um depósito central. Essa representação é justificada pelo fato de que os distritos tendem a ser alongados na direção do depósito (Newell e Daganzo, 1986). Extensões do modelo a situações com formas não geométricas dos distritos, densidade variável, etc., podem ser desenvolvidas seguindo a metodologia apresentada por Novaes et al. (2000) e Novaes et al. (2009b). Quando os pontos de atendimento dentro do distrito se distribuem de maneira aproximadamente uniforme e independente (distribuição espacial de Poisson), e as zonas são razoavelmente compactas e convexas (Larson e Odoni, 1981), as distâncias reais entre pontos podem ser estimadas com razoável precisão através da multiplicação da distância teórica, calculada através da norma  $\ell_2$  (distância Euclidiana), por uma constante corretiva previamente ajustada (Novaes et al., 2000).

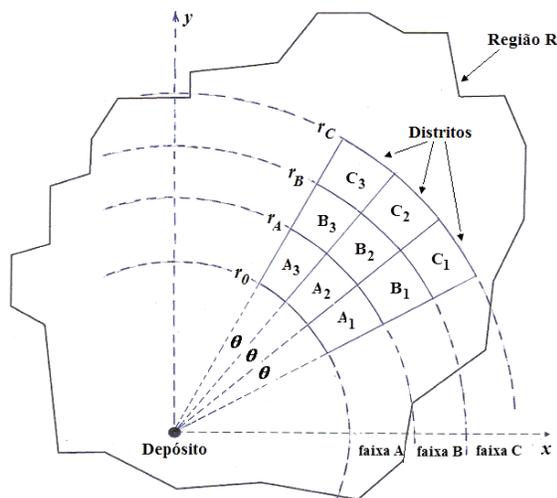


Figura 1. Esquema do processo de distribuição com nove distritos

### 2.1. Equalização do esforço entre os distritos

Neste artigo admitimos que a densidade  $\delta$  de clientes cadastrados na região atendida seja constante. Observa-se que, uma vez que  $\delta$  é admitido constante, um eventual aumento ou redução no número de clientes por zona pode ser simplesmente acomodado por meio da ampliação ou redução proporcional da área do distrito. Seja  $nc_i$  o número de clientes cadastrados num distrito  $i$  qualquer. Num determinado dia, a probabilidade de um determinado cliente cadastrado solicitar serviço é  $p$ . Dessa forma, o número de visitas  $n_i$  programadas para o roteiro  $i$  num dia qualquer é dado por uma distribuição binomial, com média  $p \times nc_i$ .

Para cada zona  $i$  a área do distrito será  $S_i = nc_i / \delta$ . Para simplificar os cálculos, admitimos que, dentro de uma mesma faixa, as zonas têm a mesma área e, portanto, o mesmo número de clientes cadastrados. No entanto, para faixas diversas, o número de clientes por zona se altera, pois o roteiro correspondente a zonas mais distantes do depósito consomem mais tempo no trajeto depósito-zona e vice-versa.

Suponhamos então que  $nc_A$  seja o número de clientes cadastrados num distrito da faixa  $A$ . Seja  $H$  a jornada diária máxima de trabalho da tripulação. Para estimar o tempo útil  $TU_A$  disponível para a execução das tarefas num distrito da faixa  $A$ , é necessário descontar de  $H$  os tempos gastos para o veículo se deslocar do depósito à zona e vice-versa. Tem-se então

$$TU_A = H - \frac{2k r_0}{v}, \quad (1)$$

em que,

$r_0$ : distância Euclidiana do depósito à entrada das zonas  $A_1$ ,  $A_2$ , e  $A_3$  (vide Figura 1);

$k \geq 1$ : coeficiente corretivo da distância Euclidiana para ajustá-la aproximadamente à rede viária (Newell e Daganzo, 1986; Novaes *et al.*, 2000); e

$v$ : velocidade média nos percursos de ida e volta ao distrito.

Da mesma forma, os tempos úteis para as faixas  $B$  e  $C$  são dados por

$$TU_B = H - \frac{2k r_A}{v} \text{ e } TU_C = H - \frac{2k r_B}{v}. \quad (2)$$

Dessa forma podem-se estimar aproximadamente os totais de clientes a serem cadastrados nas zonas situadas nas faixas  $B$  e  $C$  através das relações

$$nc_B \cong nc_A \frac{TU_B}{TU_A} \text{ e } nc_C \cong nc_A \frac{TU_C}{TU_A}. \quad (3)$$

Dispondo-se dos valores de  $nc_A$ ,  $nc_B$  e  $nc_C$ , calculam-se as áreas de cada zona, e para isso dividem-se os números de clientes cadastrados em cada distrito pela densidade  $\delta$ . O valor de  $r_0$  é um dado do problema. O valor de  $r_A$  pode ser calculado pela relação a seguir, definida pelas propriedades geométricas indicadas na Figura 1,

$$S_A = \frac{\theta \pi (r_A^2 - r_0^2)}{360} = \frac{nc_A}{\delta} \text{ e } r_A^2 = r_0^2 + \frac{360 nc_A}{\delta \pi \theta}, \quad (4)$$

em que,

$\theta$ : ângulo formado pelas faixas (Figura 1), expresso em graus.

De forma análoga,

$$r_B^2 = r_A^2 + \frac{360 nc_B}{\delta \pi \theta} \text{ e } r_C^2 = r_B^2 + \frac{360 nc_C}{\delta \pi \theta}. \quad (5)$$

Ficam assim definidos os contornos dos nove distritos de forma a garantir condições equalizadas de serviço para os veículos a eles alocados, isto é, tempos de ciclo aproxima-

damente iguais, em valores médios.

## 2.2. Tempo de ciclo e tarefas não realizadas

O tempo de ciclo  $TC_i$  do veículo alocado ao distrito  $i$  é a soma dos tempos de percurso entre o depósito e o distrito (ida e volta), soma dos tempos de percurso dentro da zona (tempo entre uma visita e a seguinte) e dos tempos de atendimento aos diversos clientes da zona. O valor esperado de  $TC_i$ , e representado por  $\overline{TC}_i$ , é então dado por

$$\overline{TC}_i \cong 2 \frac{k D_i}{v} + \frac{k n_{i-1} \bar{d}}{v} + n_i \overline{T}_S, \quad (6)$$

em que,

$n_i$ : número de clientes a serem visitados, num certo dia, no distrito  $i$ ;

$D_i$ : distância Euclidiana entre o depósito e a zona  $i$ ;

$v$ : velocidade média;

$\bar{d}$ : distância Euclidiana média entre dois clientes sucessivos atendidos no roteiro; e

$\overline{T}_S$ : tempo médio de serviço ao atender um cliente.

As variáveis indicadas acima são admitidas como variáveis aleatórias independentes e, desde que se observe  $n_i \geq 15$ , o teorema do limite central da Estatística permite afirmar que  $TC_i$  pode ser representado por uma distribuição normal. Por outro lado, a variância de  $TC_i$  é a soma das variâncias dos componentes mostrados em (6), ou seja,

$$Var[TC_i] = 2Var\left[\frac{k D_i}{v}\right] + n_{i-1}Var\left[\frac{k d_i}{v}\right] + n_i Var[T_S]. \quad (7)$$

Na versão estática do problema, o número de clientes a serem visitados num roteiro deve ser definido considerando, para isso, um limite máximo para as tarefas não realizadas ao fim da jornada diária, número esse que deve respeitar um nível estatístico predeterminado. De fato, sempre que o tempo de ciclo exceder a jornada máxima de trabalho, o veículo retornará ao depósito sem completar todas as tarefas. As tarefas não realizadas são transferidas então para o próximo dia, mas são comuns situações em que a sobrecarga de serviço acaba gerando atrasos ainda maiores, de vários dias.

O parâmetro que espelha na simulação as condições de tráfego é a velocidade média de percurso. Admitimos neste artigo que duas condições diversas de tráfego possam ocorrer num dia útil: (a) cenário  $H_0$ , que corresponde a um dia de trabalho típico, com condição de tráfego padrão, e gerando uma velocidade média  $v_0$ ; (b) cenário  $H_1$ , que representa uma condição particularmente severa de tráfego, ocasionada por graves acidentes em artérias importantes, greve no sistema de transporte público, chuvas pesadas, alagamentos, etc., e gerando uma velocidade média  $v_1 < v_0$ . Admitimos que o cenário  $H_0$  ocorra com probabilidade  $p_0$  e o cenário  $H_1$  com probabilidade  $1 - p_0$ . Para cada cenário, uma vez que a velocidade  $v$  se altera, os valores de  $\overline{TC}_i$  e  $Var[TC_i]$  se alteram também. Uma vez que a variável  $TC_i$  é regida por uma distribuição normal (teorema do limite central), o valor máximo esperado  $TC_i^*$ , para nível de confiança de 98%, é dado por

$$TC_i^* = E[TC_i] + 2.06 \{ \text{var}[TC_i] \}^{1/2}. \quad (8)$$

Seja  $H$  o tempo máximo permitido para a jornada de trabalho da tripulação do veículo, descontados a hora de almoço, tempo para descanso, etc. A seguinte restrição é imposta no modelo

$$TC_i^* \leq H, \quad i=1,2,\dots, \quad (9)$$

válida para todos os distritos que cobrem a região  $\mathfrak{R}$ .

Os valores da variância de  $k D_i / v$  e da variância de  $T_s$  são estimados a partir de levantamento de campo direto. Já o valor da variância de  $k d_i / v$  foi estimado através de simulação (Novaes et al., 2009a). Para simular valores de  $k d_i$  em (7), separou-se a análise em duas etapas. Em primeiro lugar foi ajustada a distribuição da variável aleatória  $k$  (*route factor*), resultando numa distribuição normal de média  $E[k]=1,32$  e variância  $\text{Var}[k]=0,12$  (Novaes et al., 2009a). A seguir, ajusta-se estatisticamente a distribuição de  $d_i$ , considerando, para isso, distâncias Euclidianas. Admitindo-se que os pontos (clientes) se distribuam no distrito de acordo com uma distribuição espacial de Poisson, mostrou-se (Novaes et al., 2009a) que a variável  $d_i$  pode ser representada através de uma distribuição de Erlang com parâmetro  $\psi = 3$ , e cuja função densidade de probabilidade é dada por

$$f(d_i) = \frac{\mu^\psi d_i^{\psi-1} e^{-\mu d_i}}{(\psi-1)!}, \quad \psi = 1, 2, \dots, \infty \text{ e } \mu > 0, d_i \geq 0, \quad (10)$$

e onde

$$E[d_i] = \psi / \mu \text{ e } \text{var}[d_i] = \psi / \mu^2. \quad (11)$$

Na simulação, gera-se um valor aleatório para a variável  $k$ , considerando para isso distribuição normal, com a média e variância indicadas acima. Admitindo que os roteiros dentro dos distritos respeitem as condições Hamiltonianas definidas através do *PCV (Problema do Caixeiro Viajante)*, o valor esperado da distância Euclidiana entre dois clientes consecutivos é dado por (Larson e Odoni, 1981)

$$E[d_i] \cong \frac{0,765 \sqrt{S_i n_i}}{n_i} = 0,765 \delta^{-1/2}. \quad (12)$$

Entrando com o valor de  $E[d_i]$  e  $\psi = 3$  na Eq. (11), calcula-se  $\mu$ , permitindo assim simular, no computador, valores de  $d_i$  segundo a distribuição de Erlang (Eq. 10). Finalmente, o valor simulado de  $k d_i$  é obtido através da multiplicação dos valores simulados de  $k$  e de  $d_i$ .

### 2.3. Simulação da configuração estática

Na simulação da configuração estática o objetivo principal é estimar o número de tarefas não cumpridas ao fim da jornada diária de trabalho, representada por  $n_i^{(R)}$ . Trata-se de um processo simples de simulação mostrado na Figura 2. A simulação é feita separadamente para cada distrito, executando-se 9.000 amostras para cada caso. Ao fim da simulação determina-se a taxa média de falha no cumprimento do serviço, incluindo todos os distritos atendidos, como também o tempo de ciclo médio dos roteiros e a distância percorrida. O primeiro parâmetro permitirá avaliar o nível de serviço logístico resultante de cada configuração.

### 3. ROTEIRIZAÇÃO DINÂMICA

O esquema de roteirização dinâmica analisado neste trabalho é caracterizado, como já dito, pela eventual transferên-

<p><b>Início</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. <math>i = 0</math>;</li> <li>2. <math>i = i + 1</math> (<math>i</math> é o nº do distrito);</li> <li>3. gerar valor aleatório <math>0 \leq \varepsilon \leq 1</math>, se <math>\varepsilon \leq p_0</math>, <math>v = v_0</math>, se <math>\varepsilon &gt; p_0</math>, <math>v = v_1</math>;</li> <li>4. gerar valor para <math>k</math> por meio de distribuição normal;</li> <li>5. gerar valor para <math>D_i^{(I)}</math> (distância do depósito à zona) por meio de distribuição normal, calcular o valor           <math display="block">\tau_1 = k \cdot \frac{D_i^{(I)}}{v}</math>           (tempo entre o depósito e o primeiro cliente do roteiro)</li> <li>6. repetir (3) e (4), gerando <math>\tau_2 = k \cdot \frac{D_i^{(II)}}{v}</math> (tempo de retorno desde o último cliente visitado até o depósito)</li> <li>7. <math>T = \tau_1 + \tau_2</math></li> <li>8. <b>Para</b> <math>j = 1</math> até <math>j = n_i</math> <ol style="list-style-type: none"> <li>i. simular valor de <math>k</math>, de acordo com a normal, e de <math>d_i</math>, de acordo com a distribuição de Erlang, gerar valor simulado de <math>k \cdot \frac{d_i}{v}</math>;</li> <li>ii. simular valor de <math>T_s</math>, de acordo com distribuição normal;</li> <li>iii. <math>x = T + k \cdot \frac{d_i}{v} + T_s</math>;</li> <li>iv. <b>Se</b> <math>x &lt; H</math> <b>então</b> <math>T = x</math></li> <li>v. <b>Se</b> <math>x \geq H</math> <b>então</b> <math>n_i^{(R)} = n_i - j</math>, o tempo de ciclo é <math>T_i = T</math> e vá para (2);</li> </ol> </li> <li>9. <b>Se</b> <math>i</math> menor do que nº de distritos, <b>então</b> vá para (2), <b>senão</b> termine;</li> </ol> <p><b>Fim</b></p>
--

Figura 2. Simulação da configuração estática

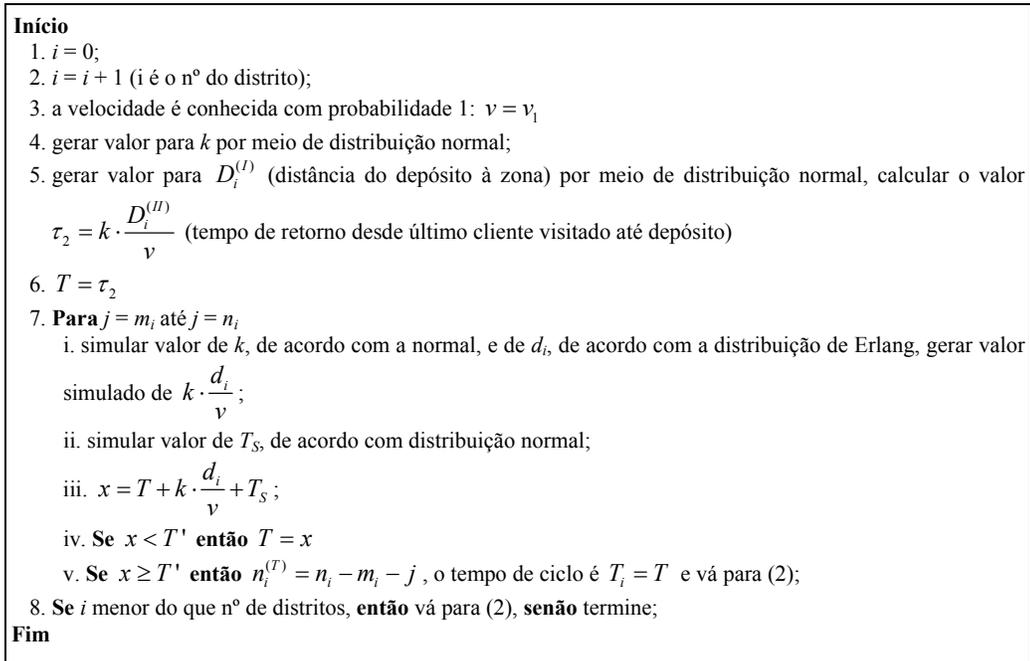


Figura 3. Tarefas transferidas para veículo auxiliar

cia de tarefas dos veículos regulares para um veículo auxiliar com sede no depósito, e que cobre todas as zonas da região atendida. Ao sair do depósito, não se sabe ainda se as condições de tráfego do dia estarão enquadradas no cenário  $H_0$  ou no cenário  $H_1$ . Dessa forma, a simulação do processo se inicia exatamente da mesma forma que a descrita na Seção 2.3. O setor de controle, situado no depósito, vai levantando informações gerais sobre as condições de tráfego e, se ficar caracterizada a ocorrência do cenário  $H_1$  num determinado instante, algumas providências são tomadas. Em primeiro lugar, o computador de bordo em cada veículo registra os instantes de parada em cada cliente, como também o tempo de liberação do veículo partindo para sua próxima visita. Essas informações vão sendo transmitidas ao computador central do depósito. Seja então  $m_i$  o número de clientes já visitados no distrito  $i$ , e  $T'$  o tempo útil restante, já descontado o tempo de retorno ao depósito. Agora a velocidade de percurso é  $v = v_1$ , uma vez que cenário  $H_1$  ficou definido com certeza. Seja  $n_i^{(T)}$  o número de tarefas a serem transferidas para o veículo auxiliar. A simulação segue agora o indicado na Figura 3.

Uma vez calculado o número de tarefas a serem transferidas, será necessário determinar quais clientes serão passados para o veículo auxiliar. Dois critérios gerais podem ser adotados nesse processo de transferência. O primeiro dá destaque à otimização dos roteiros dos veículos regulares, enquanto o segundo procura focalizar primeiramente o roteiro do veículo auxiliar. No primeiro caso, deve-se aplicar um algoritmo sobre as  $n_i - m_i$  tarefas ainda não realizadas, buscando escolher a combinação das  $n_i^{(T)}$  tarefas que minimize o tempo total de percurso  $T_i$  e que, conseqüentemente, minimize  $n_i^{(T)}$ . Para isso aplica-se um *operador de remoção* conforme indicado em Goel (2008). Nesta aplicação preliminar adotamos uma estratégia gulosa (*greedy*)

que corresponde à transferência para o veículo auxiliar das últimas  $n_i^{(T)}$  tarefas escaladas para o roteiro  $i$ . Se for adotado o segundo critério, no entanto, pode-se selecionar as  $n_i^{(T)}$  tarefas que estejam mais próximas do centro de massa dos pontos que correspondem aos clientes de todas as zonas. Como o veículo auxiliar percorrerá em princípio todos os distritos, esse critério tende a tornar menos extenso o seu roteiro, resultando um melhor aproveitamento do caminhão. Em pesquisa futura se pretende analisar critérios diversos e verificar qual opção garante nível de serviço adequado, com menor custo.

As tarefas a serem transferidas para o veículo auxiliar, a partir das diversas zonas, vão formando uma série de solicitações dinâmicas ao longo do tempo. Torna-se necessário, então, definir uma estratégia de roteirização dinâmica para o veículo auxiliar. Para tal utilizamos um algoritmo genético a ser descrito na próxima seção.

#### 4. ALGORITMO GENÉTICO PARA O DVRP

Na solução de problemas de roteirização dinâmica de veículos, alguns métodos heurísticos têm sido utilizados, como os descritos por Ribeiro e Lorena (2005). Em particular neste estudo, em que se analisaram os bons resultados obtidos por Ribeiro e Lorena (2005), que aplicaram algoritmos genéticos na roteirização dinâmica de veículos, e considerando que o número de clientes atendidos por um caminhão não é elevado, em virtude da restrição da jornada diária máxima de trabalho da tripulação, optou-se pela adoção de um algoritmo genético para a determinação do roteiro do veículo auxiliar. Outras heurísticas, baseadas na busca tabu (Gendreau *et al.*, 1999), colônia de formigas (Carabetti *et al.*, 2010), entre outras, também podem ser utilizadas na solução deste problema.

Os algoritmos genéticos foram introduzidos por Holland (1975). Eles representam técnicas de busca baseadas na

Teoria da Evolução por meio da seleção natural, apresentada por Charles Darwin em 1858. O livro de Goldberg (1989), juntamente com o de Holland (1975), são consideradas obras pioneiras sobre este tema. O princípio básico de um algoritmo genético é manter uma população de indivíduos (cromossomos) que evolui e se modifica por meio de recombinações desses elementos, e de mutações aplicadas a certa parcela dessa população ocasionadas por pequenas alterações do meio. Como, de acordo com a teoria Darwiniana os indivíduos mais aptos sobrevivem, utiliza-se uma função de aptidão ou avaliação, responsável pela classificação dos indivíduos e pelo grau de sua aptidão.

No Problema de Roteirização Dinâmica de Veículos (DVRP), o cromossomo representa os clientes a serem visitados numa certa ordem. Ribeiro e Lorena (2005) utilizaram algoritmos genéticos para tratar problemas do tipo DVRP com janela de tempo, e consideraram o cromossomo como um conjunto de rotas. Na nossa aplicação, um exemplo de cromossomo com sete clientes, que representa a sequência de visitas do roteiro auxiliar, é indicado a seguir. Suponhamos que  $c_i$  represente os clientes transferidos de um ou mais distritos. Na nossa aplicação, um exemplo de cromossomo é o indicado a seguir, que representa a sequência de clientes no roteiro auxiliar, no caso, em número de sete.

$c_5$	$c_6$	$c_1$	$c_4$	$c_3$	$c_2$	$c_7$
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Durante o processo de roteirização, o cromossomo sofre alterações à medida que novas transferências são realizadas. Com isso, novos clientes são inseridos no roteiro auxiliar e clientes, que até naquele instante já foram visitados, são removidos do cromossomo. A cada alteração da estrutura do cromossomo, uma reprogramação da rota é executada, ou seja, é feita uma nova chamada do algoritmo genético em busca da melhor rota. No valor do *fitness*, utilizado para avaliar a qualidade da rota, é considerada genericamente uma função objetivo. Na nossa aplicação, a função objetivo  $f$  associada ao cromossomo é representada pela soma de três tempos, soma essa que deve ser minimizada.

$$f = \tau_{H1} + \sum_{i=1}^{q-1} \tau_{i,i+1} + \tau_{H2}, \quad (13)$$

em que,

- $q$ : número de clientes no cromossomo;
- $\tau_{H1}$ : tempo de percurso do veículo auxiliar desde o depósito até o primeiro cliente;
- $\tau_{H2}$ : tempo decorrido desde a última visita ao depósito; e

$\sum_{i=1}^{q-1} \tau_{i,i+1}$ : soma dos tempos de deslocamento entre um cliente  $i$  e seu sucessor  $i+1$ .

Os tempos de atendimento aos clientes, representados por  $T_s$ , não são computados, pois, dado um valor de  $q$ , a soma desses tempos é constante e não influi na minimização de  $f$ .

Considera-se como restrição do problema a jornada máxima diária de trabalho. Caso essa restrição seja violada, os clientes transferidos são retirados um de cada vez do cromossomo e uma nova rodada do algoritmo é realizada até o

momento em que a solução volte a ser factível. No processo evolutivo do algoritmo genético, a partir de uma população de  $N$  cromossomos, cada nova geração é definida por meio de operadores genéticos denominados de cruzamento e mutação, respectivamente. Dentre os procedimentos de cruzamento existentes na literatura podemos citar o PMX (*Partially Matched Crossover*), OX (*Order Crossover*) e o CX (*Cycle Crossover*), este último utilizado neste trabalho. O procedimento que descreve esse operador pode ser entendido da seguinte maneira:

Suponha o seguinte par,

Pai 1	$c_5$	$c_6$	$c_1$	$c_4$	$c_3$	$c_2$	$c_7$
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Pai 2	$c_3$	$c_5$	$c_4$	$c_7$	$c_2$	$c_6$	$c_1$
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Para definição do Filho 1, inicia-se o processo copiando o primeiro elemento do Pai 1 para a primeira posição do Filho 1,

Filho 1	$c_5$						
---------	-------	--	--	--	--	--	--

Em seguida, verifica-se o elemento correspondente ao Pai 2 e se realiza a cópia desse elemento na posição correspondente no Pai 1.

Filho 1	$c_5$			$c_3$			
---------	-------	--	--	-------	--	--	--

O processo continua até que o elemento correspondente no Pai 2 já tenha sido copiado para o Filho 1. No exemplo em questão, esse processo é finalizado no momento em que encontra o  $c_5$  no Pai 2.

Filho 1	$c_5$	$c_6$			$c_3$	$c_2$	
---------	-------	-------	--	--	-------	-------	--

Após essa etapa, os espaços em branco são preenchidos com os elementos de Pai 2 das posições correspondentes. O mesmo processo é executado para geração do Filho 2.

Filho 1	$c_5$	$c_6$	$c_4$	$c_7$	$c_3$	$c_2$	$c_1$
---------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Filho 2	$c_3$	$c_5$	$c_1$	$c_4$	$c_2$	$c_6$	$c_7$
---------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

O operador de mutação, responsável por pequenas alterações genéticas no cromossomo, é responsável pela manutenção da diversidade da população de indivíduos. O processo definido neste trabalho foi a simples troca de dois elementos do cromossomo:

Antes	$c_5$	$c_6$	$c_4$	$c_7$	$c_3$	$c_2$	$c_1$
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Depois	$c_5$	$c_6$	$c_3$	$c_7$	$c_4$	$c_2$	$c_1$
--------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

## 5. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

De acordo com a Figura 1, adotamos  $\theta = 15^\circ$ ,  $r_0 = 6$  km,  $\delta = 0,75$  clientes/km<sup>2</sup>,  $v_0 = 30$  km/h,  $v_1 = 20$  km/h, tempo médio de atendimento de um cliente  $E[T_s] = 12$  min e  $Var[T_s] = [0.5 \times E[T_s]]^2$ . O número de clientes cadastrados no distrito  $A$  é a variável básica de nosso problema. Dado um valor de  $nc_A$ , calculam-se  $nc_B$  e  $nc_C$  através de (3), e

**Tabela 1.** Resultados da simulação, configuração estática

Clientes cadastrados nas zonas das faixas			Nº esperado de visitas nas 9 zonas por dia	Nº de visitas efetivamente realizadas (expectância)	Fração de visitas não realizadas no dia (%)	Percurso total médio num dia (km)	Tempo médio de ciclo (h)
A	B	C					
32	26	24	171,82	170,71	0,65	677,42	6,47
33	27	24	177,01	175,30	0,97	688,06	6,64
34	28	25	180,71	178,35	1,30	698,62	6,77
35	28	25	184,79	180,88	2,11	708,82	6,97
36	29	25	189,36	183,54	3,07	718,81	7,14

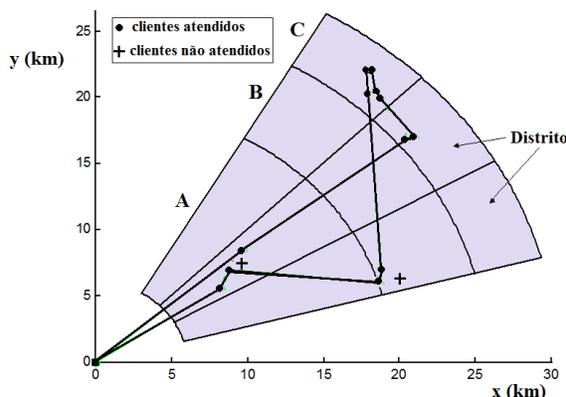
**Tabela 2.** Resultados da simulação, configuração dinâmica

Clientes cadastrados nas zonas das faixas			Nº esperado de visitas nas 9 zonas por dia	Visitas realizadas (expectância)	Visitas transferidas (%)	Visitas não realizadas (%)	Percurso total diário (*) (km)	Tempo médio de ciclo (h)
A	B	C						
32	26	24	171,82	171,74	0,74	0,05	750,10	6,43
33	27	24	177,01	176,78	1,04	0,13	760,77	6,58
34	28	25	180,71	180,38	1,33	0,19	771,89	6,69
35	28	25	184,79	184,23	2,12	0,30	780,60	6,84
36	29	25	189,36	188,35	2,91	0,53	789,62	6,96

\* Inclui também o percurso do veículo auxiliar

os raios  $r_A$ ,  $r_B$  e  $r_C$  através de (4) e (5), como também as áreas de cada zona. Seja  $nc_i$  o número de clientes cadastrados num distrito  $i$  qualquer. Na simulação, adotou-se localização aleatória (Poisson) para os  $nc_i$  clientes cadastrados no distrito  $i$ . Num dia qualquer, a probabilidade de um cliente solicitar serviço é  $p$ . Gerando-se valores aleatórios, determinam-se os clientes que deverão ser visitados no dia em análise, denominados  $mv_i$ . Se as visitas correrem dentro das condições normais, o veículo volta ao depósito tendo cumprido todas as tarefas a ele alocadas. Caso contrário haverá, na situação estática, visitas não realizadas, conforme mostrado na Tabela 1. No caso dinâmico (Tabela 2), haverá visitas transferidas para o veículo auxiliar, mas poderão ocorrer também tarefas não completadas ao fim do dia, tanto nas nove zonas, como no roteiro auxiliar, uma vez que o processo é estocástico. Obviamente essas tarefas não realizadas devem se mostrar em proporção menor da observada no caso estático, para que o novo procedimento se justifique. Todas as simulações foram replicadas 9.000 vezes cada uma, de forma a se obter resultados confiáveis.

Na Figura 4 é mostrado o roteiro dinâmico auxiliar para uma simulação com a configuração {34, 28, 25}, obtido a-



**Figura 4.** Um roteiro típico do veículo auxiliar, configuração {34, 28, 25}

través do algoritmo genético. Observa-se que foram atendidos 12 clientes, havendo duas tarefas não realizadas. Nota-se também cruzamento em dois arcos do roteiro, situação considerada não ótima nos PCVs estáticos, mas que podem ocorrer em situações dinâmicas, tendo em vista as ocorrências de eventos em instantes diversos ao longo do processo.

Suponhamos que o operador logístico tenha assumido compromisso com seus clientes de que o serviço de distribuição apresentará índice médio de tarefas não realizadas abaixo de 2%. A Tabela 1 mostra que, na versão estática, deverá adotar a configuração {34, 28, 25} para as três faixas de zonas do problema. Para tal configuração, a simulação prevê um índice de retorno de tarefas igual a 1,30%, dentro do nível de serviço comprometido com os clientes. Se o operador adotar a mesma configuração na versão dinâmica, conforme mostra a Tabela 2, o índice de tarefas não realizadas passa a ser 0,19%, o que corresponde a uma redução de 85% nas tarefas não cumpridas.

Para estimar os custos das versões estática e dinâmica, configuração {34, 28, 25}, adotamos um veículo médio VW 17.220 Worker, com custo fixo aproximado de R\$ 208,00 por dia e custo variável de R\$ 1,12 por quilômetro rodado. Na situação estática são alocados 9 veículos, um para cada distrito. Multiplicando a quilometragem indicada na Tabela 1, pelo custo variável, somando-o ao custo fixo, e dividindo pelo total de visitas efetivamente realizadas (Tabela 1) chegamos a um custo médio de R\$ 14,88 por visita efetivamente realizada. Admitimos que o custo de cumprimento das tarefas não realizadas no dia seria o dobro do custo padrão. Efetuando a composição, chega-se a um custo médio de R\$ 15,08 por visita. No caso dinâmico, são alocados 10 veículos ao serviço. Repetindo os cálculos com informações da Tabela 2, chega-se a um custo médio de R\$ 16,35 por visita, 8,4% maior do que o anterior.

Dentro dos conceitos atuais de Logística, esse desempenho bem melhor no nível de serviço, tem um valor intangível muito alto no ambiente altamente competitivo da cadeia de suprimento globalizada. Ou seja, um aumento de 8,4% no custo, com aumento expressivo no nível de serviço, pode significar um grande salto competitivo para o operador

logístico.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste artigo foi analisado um modelo dinâmico do processo de roteirização de veículos atendendo uma região urbana sujeita a condições de tráfego imprevisíveis. Com esse enfoque, parte das visitas programadas para os veículos, e que não poderiam ser cumpridas por deficiência de tempo, são transferidas para outro veículo auxiliar, reduzindo de muito o não cumprimento das tarefas programadas para o dia, situação essa que prejudica sensivelmente o nível de serviço logístico do sistema. Essa estratégia se aplica principalmente a problemas de coleta de produtos e *courier*, bem como serviços de instalação e manutenção diversos, sendo menos aplicável a serviços de entrega, que exigem transferência física. Observa-se que a adoção do esquema dinâmico, no exemplo apresentado, reduziu o índice de não cumprimento das tarefas de 1,30% para 0,19%, uma redução de 85%. Para execução prática do modelo são necessários um computador de bordo, um sistema de georreferenciamento e um sistema de telecomunicação do veículo com o terminal.

Um aspecto importante a ser abordado no prosseguimento da pesquisa é a análise e avaliação de outros critérios de decisão adotados no modelo. Em particular, propõe-se analisar outros algoritmos voltados à otimização da escolha das tarefas a serem removidas do roteiro, como também a implantação dessas tarefas no roteiro auxiliar. Por exemplo, a análise preliminar dos roteiros auxiliares gerados pelo modelo nesta aplicação sugere que o critério de transferir as tarefas mais próximas ao centro de massa de todos os clientes, talvez conduza a melhores configurações para esses roteiros.

Outra questão importante é considerar um número de veículos auxiliares maior do que a unidade. Essa configuração pode ser necessária para regiões mais amplas, ou para avaliar a utilização de veículos menores nas rotas auxiliares, principalmente quando a distribuição for limitada por peso ou por volume.

Finalmente, os autores pretendem aplicar, no prosseguimento desta pesquisa, a heurística *2-opt* para melhorar a solução encontrada com algoritmo genético, como também testar heurísticas como a Busca Tabu, utilizada por Gendreau *et al.*, (1999), Colônia de Formigas (Carabetti *et al.*, 2010), e eventualmente outras.

## AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi apoiada financeiramente pelo CNPq/Fapesp, Projeto 1.0810-00684.0/684 (Pronex) e pela Capes/DFG, Projeto Bragecrim (Brasil/Alemanha), nº 2009-2.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Branchini, R.M.; V. A. Armentano e A. Lokketangen (2009) Adaptive Granular Local Search Heuristic for a Dynamic Vehicle Routing Problem, *Computers & Operations Research*, v. 36, p. 2955–2968.
- Carabetti, E.G.; S. R. de Souza e M. C. P. Fraga (2010) Uma Aplicação da Metaheurística Colônia de Formigas ao Problema de Roteamento de Veículos com Coleta e Entrega e Janela de Tempo. *Anais do XXXIII Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional*, CNMAC, Águas de Lindóia-SP.
- Craicic, T.G. e G. Laporte (1998) *Fleet Management and Logistics*, Kluwer Academic, Boston.
- Goel, A. (2008) *Fleet telematics*, Springer, New York.
- Gendreau, M. e J-Y Potvin (1998) Dynamic Vehicle Routing and Dispatching. *Fleet Management and Logistics*. Kluwer Academic, Boston, p. 115–126.
- Gendreau, M.; F. Guertin; J-Y Potvin e E. Taillard (1999) Parallel Tabu Search for Real-Time Vehicle Routing and Dispatching, *Transportation Science*, v. 33, p. 381–390.
- Goldberg, D.E. (1989) *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, Reading, Mass.
- Golden, B.; S. Raghavan e E. Wasil (2008) *The Vehicle Routing Problem*, Springer, New York.
- Holland, J. (1975) *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. The University of Michigan Press, Ann Arbor.
- Larsen, A.; O. Madsen e M. Salomon (2007) Classification of Dynamic Vehicle Routing Systems. *Dynamic Fleet Management*, V., Tarantilis, C.D.; G. Giaglis e I. Minis (eds.). Springer, New York.
- Larsen, A. (2001) *The Dynamic Vehicle Routing Problem*. PhD Dissertation, Technical University of Denmark, Lyngby, Dinamarca.
- Larson, R.C. e A. R. Odoni (1981) *Urban Operations Research*, Prentice-Hall, Englewood-Cliffs.
- Lorini S.; J-Y Potvin e N. Zufferey N. (2011) Online Vehicle Routing and Scheduling with Dynamic Travel Times. *Computers & Operations Research*, v. 38, n. 7, p. 1086–1090.
- Mitrovic-Minic S., R. Krishnamurti e G. Laporte (2004) Double-Horizon Based Heuristics for the Dynamic Pickup and Delivery Problem with Time Windows. *Transportation Research Part B*, v. 38, p. 669–685.
- Mitrovic-Minic S. e G. Laporte (2004) Waiting strategies for dynamic pickup and delivery problem with time windows. *Transportation Research Part B*, v. 38, p. 635–655.
- Newell, G.F. e C.F. Daganzo (1986) Design of Multiple-Vehicle Tours – (I) A Ring-radial Network. *Transportation Research B*, v. 20B, n. 5, p. 345–63.
- Novaes, A.G.; J. E. Souza de Cursi e O.D. Graciolli (2000) A Continuous Approach to the Design of Physical Distribution Systems, *Computers & Operations Research*, v. 27, p. 877–893.
- Novaes, A.G., E. M. Frazzon e P. J. Burin (2009a) Um Problema de Roteirização Dinâmica de Veículos. *Anais XXIII ANPET – Congresso Pesquisa e Ensino em Transportes*, Vitória.
- Novaes A.G.; J. E. Souza de Cursi; A. C. L. da Silva e J. C. Souza (2009b) Solving Continuous Location-Problems with Voronoi Diagrams. *Computers & Operations Research*, v. 36, p. 40–59.
- Novaes, A.G.; B. Scholz-Reiter; E. T. Bez e P. J. Burin (2011) An Agent-based Approach to Improve Urban Vehicle Routing Operations. *Anais do XXV ANPET – Congresso Pesquisa e Ensino em Transportes*, Belo Horizonte.
- Psarafitis, H.N. (1988) Dynamic Vehicle Routing. *Vehicle Routing: Methods and Studies*, Golden, B.L. and Assad, A.A. (eds.). Elsevier (North Holland), p. 223–248.
- Ribeiro, G. M. e L. A. N. Lorena (2005) Roteamento de veículos dinâmico usando algoritmos genéticos. *Anais do XVI ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, Recife.