

# UMA NOVA ABORDAGEM PARA O PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS COM RESTRIÇÕES OPERACIONAIS

Gladston Luiz da Silva  
Adelaida Pallavini Fonseca  
Universidade de Brasília

## RESUMO

Este trabalho apresenta o problema de roteirização de veículos com restrições operacionais relacionadas à janelas de tempo e duração da máxima da jornada para frotas homogêneas de veículos, cujo objetivo é a determinação de um conjunto de roteiros que atendam aos clientes relacionados, respeitadas as restrições colocadas. A estratégia de solução proposta é baseada no uso do mapa Auto-Organizável de Kohonen para a determinação de agrupamentos de clientes, associada à heurística alternativa ao Algoritmo do Etiquetamento Permanente para a definição da programação dos veículos. Os testes computacionais da estratégia proposta foram realizados no ambiente Matlab em problemas-teste usados como *benchmarking* na literatura.

## ABSTRACT

This paper deals with the vehicle routing problem with operational constraints related to time windows and the maximum duration of the journey to homogeneous fleet of vehicles, whose goal is to determine a set of scripts that meet the clients listed. The proposed solution strategy is based on using Self-Organizing Map for the determination of groups of customers, coupled with an alternative heuristic to the Permanent Labeling Algorithm for defining the lineup of vehicles. Computational tests of the proposed strategy were conducted in Matlab using benchmarking problems of literature.

## 1. INTRODUÇÃO

O interesse e a demanda pela aplicação de modelos de roteirização para problemas reais têm crescido muito nos últimos anos. Para CUNHA (1997) a relevância dos problemas de roteirização e programação de veículos pode ser medida pelo expressivo número de artigos publicados na literatura especializada, motivada pela permanente busca de novas estratégias e métodos para a resolução de modelos cada vez mais complexos e abrangentes do cenário real.

Este trabalho surgiu dessa motivação e da intenção em apresentar proposta alternativa de solução para problemas de roteirização e programação de veículos com restrições de janelas de tempo e de capacidade dos veículos, dada a crescente importância dessa questão para a sociedade. Para tais problemas, muitas vezes é desejável a obtenção de soluções aproximadas, que podem ser encontradas mais rapidamente e são suficientemente precisas para a aplicação a que se referem. Geralmente esta tarefa é realizada por meio de vários métodos heurísticos e metaheurísticos, desenvolvidos a partir de alguns *insights* sobre a natureza do problema.

O Problema de Roteirização e Programação de Veículos com Janelas de Tempo (PRPJT) apresenta uma complexidade que aumenta com a abrangência da malha viária, do volume da demanda e de sua distribuição geográfica, das exigências dos clientes, da regulamentação trabalhista, do tamanho e tipos de veículos, e de outras variáveis que incidem no problema, somado a outras variáveis próprias do ambiente em que atuam as distribuidoras e de logística.

CUNHA (1997) apresentou proposta para a solução do PRPJT, com restrições de janela de tempo, de duração da jornada e de capacidade de veículos, com quantidades de carga determinísticas e conhecidas a priori, para uma frota de veículos que pode ser homogênea ou heterogênea. Para problemas com frotas homogêneas o autor propôs a adoção de heurísticas de Inserção Sequencial e de Inserção em Paralelo. A heurística de Inserção Sequencial consiste em determinar roteiros que otimizem o tempo de viagem, procurando a utilização de um número reduzido de veículos. Assim, o algoritmo para a resolução do caminho mínimo com janela de tempo é aplicado sequencialmente, de forma que todos os clientes ainda não atendidos são candidatos à inclusão no veículo corrente. Caso não tenha sido possível a inserção de um cliente após certo número de iterações, mantém-se a melhor solução para o veículo. Os demais clientes ainda não atendidos são candidatos à inclusão no veículo seguinte. Já a heurística de Inserção em Paralelo o objetivo é determinar uma programação que utilize a frota total disponível, assegurando uma distribuição mais homogênea dos clientes aos veículos.

Neste artigo, pretende-se verificar a validade de uma nova estratégia para a solução de PRPJT, decorrente da aplicação do mapa Auto-Organizável (*Self-Organizing Maps* - SOM), ou Rede de Kohonen, associada ao uso de heurística alternativa ao Algoritmo de Etiquetamento Permanente (AEP). O uso de Redes Neurais como parte integrante da estratégia proposta neste trabalho, decorre da capacidade de aplicação em problemas reais que essa área do conhecimento tem apresentado, em particular em problemas de transporte relacionados à roteirização de veículos.

## 2. METODOLOGIA

Neste trabalho a estratégia adotada para a resolução do PRPJT consistiu em utilizar o SOM para determinar a estrutura de agrupamento a ser adotada, quando ocorre a designação do conjunto de pontos (clientes) aos neurônios correspondentes, seguida pela utilização de uma variação do AEP para a resolução do problema PRPJT propriamente dito.

### 2.1 Formulação Matemática do PRPJT

Dispõe-se de uma frota composta por  $V$  veículos, que podem ou não ser homogêneos com relação a tipo, modelo ou tamanho, para atendimento a  $N$  pontos ou clientes. Para cada veículo  $v$  da frota, onde  $v = 1, 2, \dots, V$ , são definidos:

- Capacidade máxima de peso  $K^v$ ;
- Custo unitário do transporte com relação à distância  $C_d^v$ ;
- Custo fixo diário total  $C_f^v$ , que considera os salários relativos às horas de trabalho da tripulação, as despesas de capital do veículo, as despesas com licenciamento, seguro, dentre outras.
- Custo horário  $C_h^v$ , decorrente de veículos que por ventura sejam alugados com tarifas horárias.
- Duração máxima da jornada de cada veículo  $H^v$ .

Ao conjunto de  $N$  pontos ou clientes a serem atendidos, seja para a coleta ou entrega de produto(s), onde a cada ponto  $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ , tem-se associadas as seguintes variáveis:

- Tempo de atendimento  $s_i \geq 0$ ;
- Janela de tempo  $[a_i, b_i]$ ,  $a_i \leq b_i$ , que define os limites no qual o atendimento pode ser iniciado, ou seja, o horário mais cedo e o horário mais tarde, de tal forma que o horário de término de atendimento não está condicionado ao limite superior da janela de tempo, mas ao horário de início do atendimento;
- Quantidade  $q_i \geq 0$  de carga a ser coletada ou entregue.

Para diferenciar os pontos de origem e de destino dos veículos, representa-se a base de saída e de chegada dos veículos, respectivamente, pelos pontos 0 e  $N + 1$ . No caso do problema de entrega, as cargas originam-se na base de partida e o veículo retorna vazio ao final dos atendimentos. No problema de coleta, o veículo inicia vazio e, ao final dos atendimentos, as cargas têm como destino o depósito. A cada um desses pontos tem-se as seguintes associações:

- Tempo de atendimento  $s_0 = s_{N+1} = 0$ , sendo que para o problema de entregas  $s_0 \neq 0$  representa o tempo de carregamento do veículo, enquanto para o problema de coleta  $s_{N+1} \neq 0$  representa o tempo de descarga do veículo;
- As janelas de tempo  $[a_0, b_0]$  e  $[a_{N+1}, b_{N+1}]$ , representam os horários permitidos de saída e de chegada dos veículos às base;
- Assume-se que as quantidades de carga movimentadas são iguais a zero ( $q_0 = q_{N+1} = 0$ ), pois nesses pontos não ocorrem atendimentos.

O deslocamento do veículo de um nó  $i, i = \overline{0, N}$  até o nó sucessor  $j = \overline{1, N+1}$ ,  $i \neq j$ , representado pela distância  $d_{ij}$ , requer um tempo de viagem  $t_{ij}$ . Assume-se que as matrizes das distâncias percorridas e dos tempos de viagem não são simétricas, ou seja, não necessariamente  $d_{ij} = d_{ji}$  e  $t_{ij} = t_{ji}$ . Caso não exista ligação entre  $i$  e  $j$ , tem-se  $d_{ij} = \infty$  e  $t_{ij} = \infty$ .

As seguintes variáveis de decisão do modelo são:

$$x_{ij}^v = \begin{cases} 1, & \text{se } j \text{ é atendido após } i \text{ pelo veículo } v; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$T_i$  = horário de início de atendimento em  $i, i \in \{1, 2, \dots, N\}$ .

A função objetivo do problema proposta consiste em minimizar:

$$\sum_{v=1}^{NV} \sum_{i=0}^N \sum_{j=1}^{N+1} C_d^v d_{ij} x_{ij}^v + \sum_{v=1}^{NV} \sum_{i=0}^N \sum_{j=1}^{N+1} (T_i + s_i + t_{i,N+1}) C_h^v x_{i,N+1}^v + \sum_{v=1}^{NV} \sum_{j=1}^N C_f^v x_{0j}^v$$

Sujeita às seguintes restrições:

- $\sum_{v=1}^{NV} \sum_{j=1}^{N+1} x_{ij}^v = 1, i = \overline{0, N}, i \neq j$
- $\sum_{j=0}^{N+1} x_{0j}^v = 1, v = \overline{1, NV}$
- $\sum_{i=0}^N x_{ij}^v - \sum_{i=1}^{N+1} x_{ji}^v = 0, j = \overline{1, N}, v = \overline{1, NV}$
- $\sum_{i=0}^{N+1} x_{i,N+1}^v = 1, v = \overline{1, NV}$
- $a_i \leq T_i \leq b_i, i = \overline{1, N}$
- $T_i + s_i + t_{ij} - T_j \leq (1 - x_{ij}^v)M, i = \overline{1, N}, j = \overline{1, N}, j \neq i, v = \overline{1, NV}, M \rightarrow \infty$

$$\begin{aligned}
& - \sum_{i=0}^N \sum_{j=1}^N q_j x_{ij}^v \leq K^v, \quad v = \overline{1, NV} \\
& - (T_j + s_j + t_{j, N+1}) x_{j, N+1}^v - (T_i + t_{oi}) x_{oi}^v \leq H, \quad i = \overline{1, N}, \quad j = \overline{1, N} \\
& - x_{ij}^v \in \{0, 1\}, \quad i = \overline{0, N+1}, \quad j = \overline{0, N+1}, \quad v = \overline{1, NV}
\end{aligned}$$

## 2.2 O Mapa Auto-Organizável

O princípio fundamental do SOM baseia-se na simulação da atividade cerebral, na qual o arranjo das células nervosas corticais decorre de estímulos recebidos por sensores ligados às mesmas, formando centros de atividades mais intensos, de acordo com as atividades no momento. Por esse princípio, as ligações que produzem respostas mais eficientes são aquelas que são reforçadas.

FAUSETT (1994) apresenta o SOM como uma Rede Neural de treinamento não supervisionado, cuja estrutura topológica apresenta  $r$  unidades de neurônios denominados protótipos, arranjados em um mapa de dimensão 1, 2 ou 3, e  $v$  vetores de dimensão  $s$  que representam os sinais de entrada. Para cada agrupamento é associado um neurônio, cujo vetor peso é tido como modelo padrão. JAIN *et al.* (1999) recomendam a normalização dos padrões de entrada da Rede de Kohonen, padronizando-os de forma a evitar discrepâncias entre e dentre os vetores de entrada.

No treinamento da Rede de Kohonen a distância Euclidiana de cada neurônio é calculada relativamente ao padrão de entrada, e o  $i$ -ésimo neurônio vencedor tem os pesos atualizados, assim como sua vizinhança  $V_i$ , mesmo que a mesma não possua os pesos próximos ao padrão de entrada.

SIQUEIRA (2005) apresenta o algoritmo para a Rede de Kohonen unidimensional ou bidimensional com  $r$  neurônios, com entrada aleatória dos padrões, que segue os seguintes passos:

1. Inicie os  $r$  neurônios da rede com os pesos  $w_{ij}$ , gerados aleatoriamente a partir de uma distribuição  $U \sim [0, 1]$ . Faça  $t = 1$ , determine os valores iniciais do raio da vizinhança  $R$  e da taxa de aprendizagem  $\alpha$ . Escolha um critério de parada, e vá para o Passo 2.
2. Encontre um padrão de entrada  $k$  ainda não apresentado à rede na iteração  $t$ , onde  $k \in (0, v]$ . Se todos os padrões já foram apresentados na iteração  $t$ , faça  $t = t + 1$ , e vá ao Passo 5. Caso contrário, apresente à rede a entrada  $p_k$ , e vá para o Passo 3.
3. Determine o neurônio  $i$  que possui a menor distância Euclidiana do peso  $w$  com o vetor de entrada  $p_k$ 

$$d_i = \sum_{j=1}^s (p_{ki} - w(t)_{ij})^2 \text{ para } i = \overline{1, r}.$$
 Este neurônio é denominado vencedor, e denotado por  $i^*$ . Vá para o Passo 4.
4. Ajuste os pesos do neurônio vencedor e dos neurônios pertencentes à vizinhança  $V_{i^*}(t)$  centrada no mesmo:
 
$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \alpha(t) \Lambda_{ii^*} [p_{kj} - w_{ij}(t)], \text{ para } j = \overline{1, s} \text{ e } i \in V_{i^*}(t).$$
 Vá para o Passo 2.

5. Calcule o erro do mapa, ajuste a taxa de aprendizagem  $\alpha$  e o raio de vizinhança  $R$ . Se o critério de parada for satisfeito, pare. Caso contrário, volte ao Passo 2.

Na primeira fase do algoritmo da Rede de Kohonen observa-se uma competição entre os neurônios da camada de saída, resultando em um neurônio vencedor que atenda ao critério estabelecido, que em geral é a distância Euclidiana. Em seguida, observa-se uma fase cooperativa entre os neurônios, quando é definida a vizinhança do neurônio vencedor. Por fim, os pesos do neurônio vencedor e de sua vizinhança são ajustados, caracterizando esta fase final como adaptativa.

## 2.3 O Algoritmo de Etiquetamento Permanente

DESROCHERS e SOUMIS (1988) definiram o problema de caminho mínimo com janela de tempo (PCMJT) como o de encontrar o caminho de menor distância entre um nó de origem e um nó de destino, respeitando-se as restrições de janela de tempo em cada um dos nós do caminho. Para a solução desse problema propuseram o Algoritmo de Etiquetamento Permanente (AEP), que se baseia no conceito de *buckets* generalizados e numa regra de seleção de etiqueta a ser tratada, a partir da execução de um teste de dominação, no qual o custo de uma etiqueta gerada é comparado ao custo mínimo de todas as etiquetas já tratadas para o nó destino. Considerando que os tempos de viagem são não negativos, se o custo do caminho associado à etiqueta gerada for maior que o custo mínimo dentre as etiquetas já tratadas, essa etiqueta gerada será dominada.

A heurística proposta de variação do AEP decorre do seguinte argumento: dado o atendimento à janela de tempo por um dado conjunto de etiquetas, a dominação ocorre somente em função do menor custo (ou distância), privilegiando não o par  $(T_j^k, C_j^k)$ , mas  $(C_j^k)$ . A abordagem alternativa ao AEP surgiu de forma intuitiva ao se pensar que com o estabelecimento da relação de dominância entre os *buckets*, o atendimento à restrição da janela de tempo seria a função primordial da variável  $T$ , deixando para a variável custo o papel de definir a programação dos veículos.

A heurística proposta para a programação dos veículos utiliza como entrada as variáveis que caracterizam a instância em estudo, a variável (grupo) que apresenta a designação dos clientes aos grupos (neurônios), assim como o número de agrupamentos que foram compostos (números de neurônios) e a quantidade de clientes por grupo. Na composição dessa nova base de dados, deve-se proceder à ordenação crescente dos grupos e, dentro de cada grupo, à ordenação crescente da variável que indica o limite superior para o início do atendimento dos clientes.

A heurística estabelece que, em cada agrupamento, a programação dos veículos aos clientes ocorra garantindo o atendimento às restrições das janelas de tempo e à capacidade de carga do veículo, e que a ordem de atendimento seja estabelecida mediante a indicação de menor distância (custo). Definida a programação dos veículos em cada agrupamento, calculam-se as distâncias percorridas por cada veículo e a distância total percorrida para atendimento à instância em estudo.

### 3 RESULTADOS

Os testes computacionais foram realizados no ambiente Matlab em problemas-teste de SOLOMON (1987). A estratégia proposta para problemas de roteirização e programação de veículos com frota homogênea é baseada no uso do SOM para a determinação de agrupamentos de clientes, associada à heurística alternativa ao AEP para a definição da programação dos veículos.

O primeiro passo dado neste sentido foi aplicar a estratégia em alguns problemas-teste, com o objetivo de identificar diferenças que poderiam ocorrer nos resultados devido à variação da parametrização para o treinamento da Rede de Kohonen.

Para cada problema-teste relacionado, foi verificada a distância total percorrida pelos veículos, em função da variação vetor de entrada ( $P$ ), das topologias hexagonal e quadrática ( $TFCN$ ), assim como das opções de medidas de distâncias ( $DFCN$ ) entre os neurônios disponíveis no Matlab. A partir dos resultados foi possível concluir que é significativa a diferença alcançada nos resultados devido à variação da matriz de entrada quando a estratégia de solução proposta neste trabalho para problemas PRPJT. Isto representa que foi encontrada evidência estatística ( $P\text{-value} \cong 0$ ) de que melhores resultados são alcançados quando a matriz de entrada é composta apenas pelas coordenadas das instâncias analisadas.

Ainda considerando a Análise de Variância apresentada na Tabela 1, foi possível concluir que, fixados os parâmetros de treinamento da Rede de Kohonen denominados *steps* (número de passos para a vizinhança alcançar dimensão 1) e *in* (vizinhança inicial dos neurônios), não houve evidência estatística de que para os problemas-teste analisados os resultados variam (em média) em virtude das topologias: hexagonal ou quadrada.

**Tabela 1:** Análise de Variância de resultados apresentados em problemas-teste

Fonte	Soma de Quadrados	G.L.	Quadrado Médio	F	Prob>F ( $P\text{-value}$ )
<b><math>P</math></b>	10056765.3	2	5028382.6	34.52	0
<b><math>TFCN</math></b>	2047.9	1	2047.9	0.01	0.9058
<b><math>DFCN</math></b>	12505.1	3	4168.4	0.03	0.9934
<b><math>P * TFCN</math></b>	11531.3	2	5765.7	0.04	0.9612
<b><math>P * DFCN</math></b>	54705.9	6	9117.7	0.06	0.9990
<b><math>TFCN * DFCN</math></b>	14692.5	3	4897.5	0.03	0.9917
Error	18354645.9	126	145671.8		
Total	28506893.9	143			

Também não foi detectada diferença significativa nos resultados quando da variação das medidas de distâncias dos neurônios (*dist*, *boxdist*, *linkdist* ou *mandist*), tampouco quando foram identificadas variações devido às interações dos efeitos  $P * TFCN$ ,  $P * DFCN$ ,  $TFCN * DFCN$ . Esses resultados indicam que a contribuição do mapa Auto-Organizável na solução da estratégia adotada está associada ao agrupamento dos clientes em função das coordenadas dos problemas-teste, cabendo à heurística alternativa ao AEP o papel de determinar a programação dos veículos. Essa informação orientou a composição paramétrica utilizada na análise realizada em 30 instâncias propostas por SOLOMON (1987), dada a grande possibilidade de variação do espaço paramétrico.

Os resultados obtidos com a estratégia de solução proposta neste trabalho foram comparados aos resultados alcançados por CUNHA (1997), que também utilizou o AEP em problemas relaxados, associado a duas estratégias distintas para frotas homogêneas: a Alocação Sequencial e a Alocação Paralela.

Os resultados apresentados nos conjuntos C1 e C2 indicam que a estratégia proposta neste trabalho apresenta resultados inferiores para dados pré-agrupados, para os quais o mapa Auto-Organizável de Kohonen confirma o contexto geográfico dos problemas-teste.

A Tabela 2 apresenta os resultados comparativos para 30 instâncias de SOLOMON (1987). No conjunto C1 a estratégia proposta neste trabalho apresentou, em média, resultados com distância percorrida 20,6% superiores aos alcançados por CUNHA (1997). Já no conjunto C2 as dificuldades para a estratégia proposta foram ainda maiores, quando comparadas aos demais resultados.

**Tabela 2:** Resultados em 30 dos conjuntos de dados de SOMOLON

Conjunto	Problema	Heurística Alocação Sequencial *		Heurística Alocação Paralela *		SOM e heurística alternativa ao AEP		Comparativo com o melhor resultado
		no. de veículos	distância total	no. de veículos	distância total	no. de veículos	distância total	
C1	C104	10	1.060,30	10	1.108,00	10	1.111,02	4,8%
	C105	10	836,8	10	828,9	10	1.058,21	27,7%
	C106	10	836,8	10	828,9	10	1.051,11	26,8%
	C108	10	836,8	10	828,9	10	1.057,76	27,6%
	C109	10	1.132,90	10	828,9	10	1.056,97	27,5%
	Média	10	940,72	10	884,72	10	1.067,01	20,6%
C2	C202	3	806,5	4	828,5	6	1.541,45	86,1%
	C203	3	934	4	908,5	8	1.459,26	60,6%
	C204	3	952,4	3	1.068,80	8	1.433,38	34,1%
	C207	4	653,8	4	683,2	8	1.334,57	95,3%
	Média	5,44	1032,576	5,76	1029,248	8,4	1.468,07	42,6%
R1	R103	15	1.774,40	15	1.541,90	12	1.438,03	-6,7%
	R105	16	1.880,40	16	1.605,40	12	1.454,88	-9,4%
	R107	13	1.593,70	14	1.393,60	12	1.412,53	1,4%
	R109	14	1.701,00	14	1.394,00	12	1.462,18	4,9%
	R111	13	1.583,10	14	1.497,90	12	1.445,88	-3,5%
	R112	11	1.291,60	11	1.226,50	12	1.429,28	4,6%
	Média	13,4	1609,96	13,8	1423,48	12	1.440,95	-2,0%
R2	R201	4	1.846,90	4	1.907,80	4	1.647,05	-13,7%
	R203	3	1.433,70	3	1.358,50	4	1.661,71	22,3%
	R205	4	1.620,50	3	1.438,60	6	1.567,18	8,9%
	R206	3	1.392,70	3	1.349,80	6	1.522,34	12,8%
	R210	3	1.557,50	3	1.442,40	6	1.519,83	5,4%
	Média	3,4	1570,26	3,2	1499,42	5,2	1.583,62	5,6%
RC1	RC101	18	2.295,60	17	1.997,30	12	1.620,71	-18,9%
	RC102	16	2.020,80	14	1.698,70	12	1.583,57	-6,8%
	RC104	12	1.542,30	12	1.435,70	12	1.448,91	0,9%
	RC106	14	1.810,00	14	1.636,90	12	1.618,64	-1,1%

	RC108	11	1.412,20	12	1.517,60	12	1.586,69	4,6%
	Média	14,2	1816,18	13,8	1657,24	12	1.571,70	-5,2%
RC2	RC201	5	2.295,10	4	1.991,60	12	1.636,02	-17,9%
	RC202	4	1.742,60	4	1.649,30	8	1.601,14	-2,9%
	RC203	3	875,2	3	1.529,60	12	1.524,34	-0,3%
	RC205	4	2.084,00	4	1.865,30	8	1.695,57	-9,1%
	RC207	3	1500,5	5	1.661,90	12	1.612,48	-3,0%
	Média	3,8	1699,48	4	1739,54	10,4	1.613,91	-7,2%

**Nota:** (\*) Resultados alcançados por Cunha (1997)

No contexto do conjunto C2, além da disposição geográfica de agrupamento apresentada pelos problemas-teste, a longa jornada dos veículos devido à ampliação da capacidade de carga implicou no aumento na distância percorrida relativamente aos resultados comparativos (CUNHA, 1997), principalmente nas instâncias que apresentaram maior quantidade de clientes com as janelas de tempo estreitas.

Os resultados negativos apresentados nas instâncias C202 e C207 decorrem do contexto no qual estes problemas-teste estão inseridos, a saber: dados agrupados, com jornadas de longa duração e grande parcela de clientes com janelas de tempo estreitas, isto é, A muito próximo de B. Neste caso, a proximidade de agrupamentos deixa de ser um fator favorável à estratégia proposta na medida em que grupos vizinhos tornem-se competidores quanto à janela de tempo.

Por outro lado, quando o número de neurônios (veículos) foi menor do que a quantidade de agrupamentos geograficamente definidos pelo problema-teste, a limitação de carga aos veículos contribuiu para a não efetividade da estratégia, na medida em que implicou no retorno dos veículos à estação base quando o limite da carga for alcançado.

#### 4.1 Comentários dos Resultados Obtidos

A proximidade geográfica associada à proximidade de janela de tempo não favorece no alcance de soluções efetivas da estratégia proposta, pelo simples fato de serem concorrentes. Esse contexto se enquadra na situação típica de empresas que trabalham com uma carteira de clientes previamente definida, como é o caso dos CORREIOS, por exemplo, que tem uma carteira definida de clientes, e que podem realizar previamente a programação dos veículos para a entrega e para a coleta de produtos.

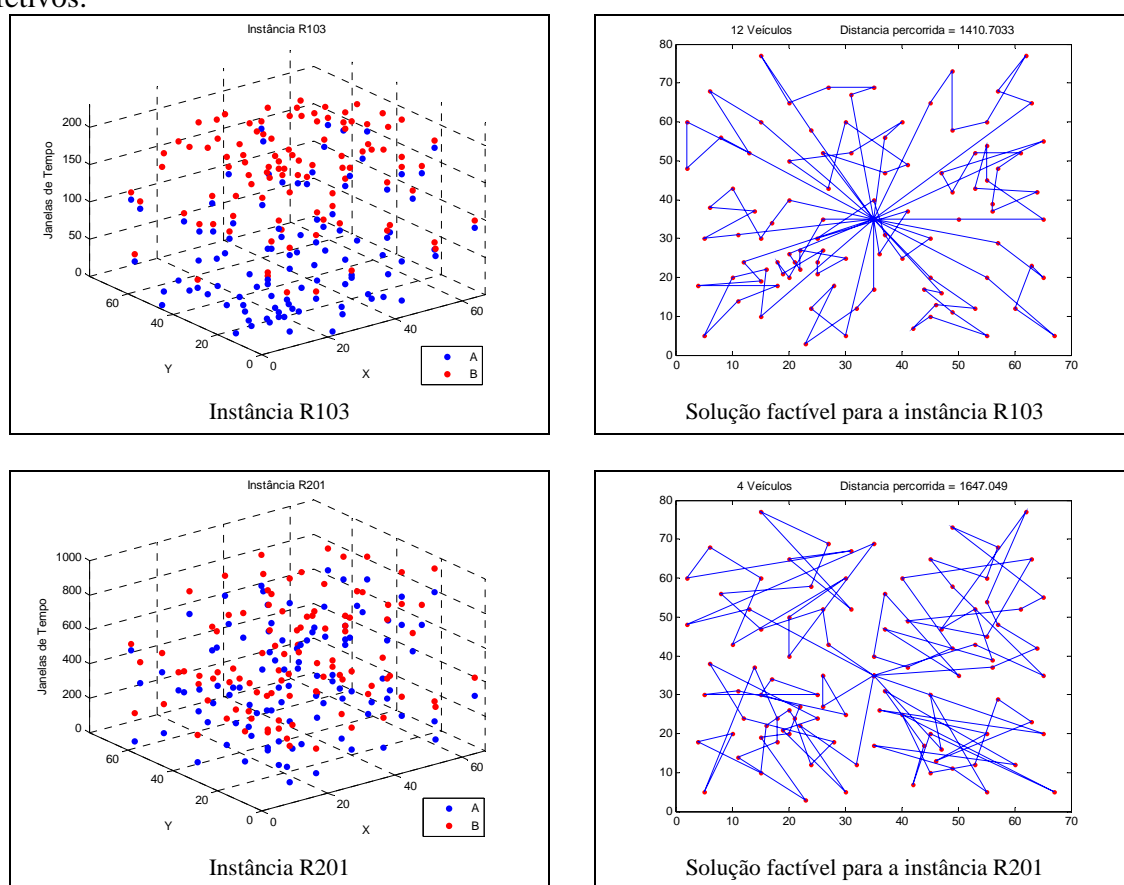
No contexto dos conjuntos R1 e R2 os resultados alcançados pela estratégia proposta foram superiores aos anteriores, sendo que no conjunto R1 os resultados foram equivalentes aos resultados comparativos. Para o conjunto R1, os resultados apresentados pela estratégia proposta neste trabalho foram, na média, ligeiramente superiores aos alcançados pelos estudos comparativos, sendo que as soluções factíveis encontradas necessitaram de um número menor de veículos para atender à demanda dos clientes.

A ampliação da capacidade dos veículos no contexto do conjunto R2 refletiu negativamente na capacidade da estratégia proposta em obter soluções factíveis no mesmo nível das demais, uma vez que as soluções alcançadas necessitaram de um número de veículos superior, que não resultaram na diminuição das distâncias percorridas.



FONSECA (2002) informa que os clientes frequentes e os clientes ocasionais se utilizam de sistema telefônico ou de comunicação escrita do tipo correio eletrônico (e-mail) para solicitar seus serviços, e que em um dia de operação padrão, os clientes regulares respondem a aproximadamente 23% do total de coletas diárias, enquanto os clientes frequentes e ocasionais representam 77% do total de coletas.

Em contextos nos quais a distribuição geográfica dos clientes for aleatória e que a capacidade de carga dos veículos for pequena, como é o caso maior parcela de atendimentos realizados nos serviços de entregas expressas, a estratégia adotada neste trabalho apresentou resultados efetivos.



**Figura 1:** Representação gráfica das instâncias R103 e R201 com as respectivas soluções factíveis

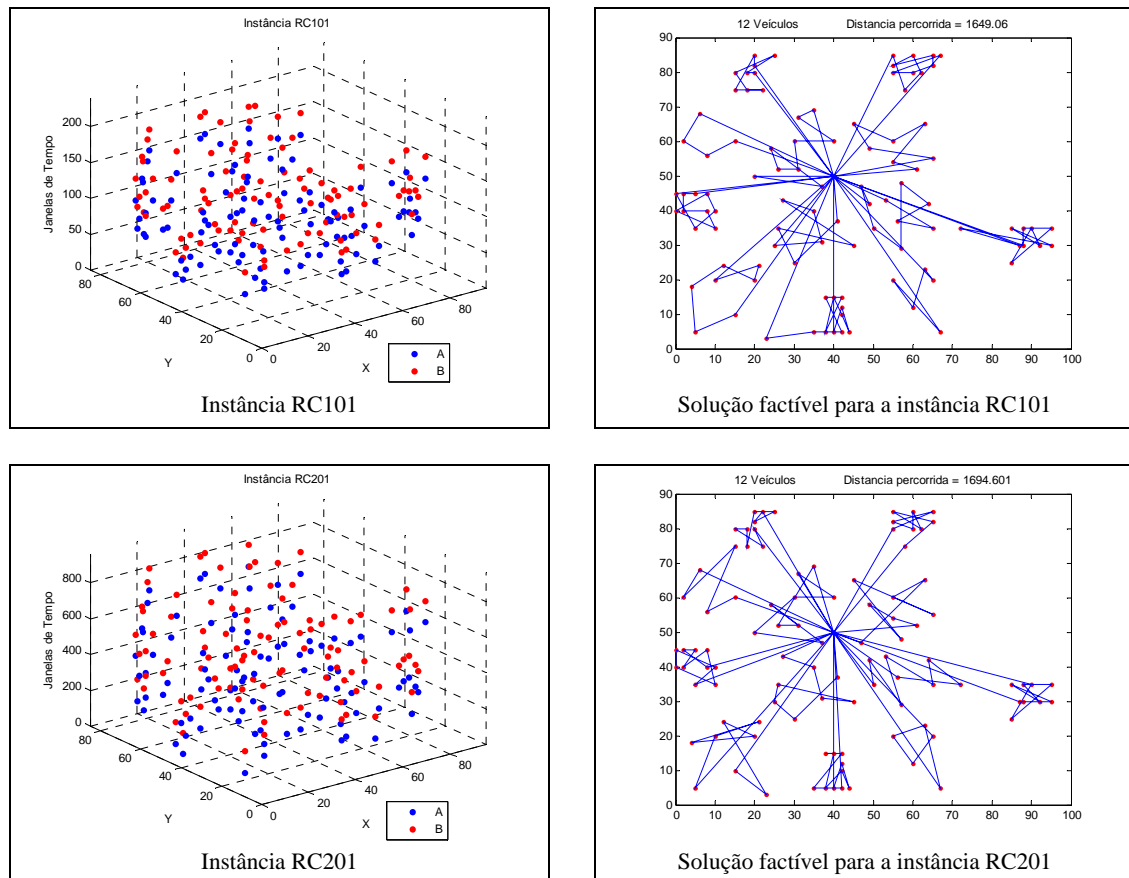
Nos conjuntos RC1 e RC2 os resultados obtidos pela estratégia proposta foram superiores aos comparativos no que se refere às distâncias percorridas pelos veículos. O contexto dos problemas RC1 e RC2 tem uma proximidade ainda maior com o contexto do serviço de remessas expressas do que o apresentado no contexto dos problemas R1 e R2, haja vista que o semi-agrupamento dos clientes relativamente à localização geográfica pode ser interpretado da seguinte forma quanto à programação dos veículos: os clientes regulares representam aqueles que podem e devem ser agrupados conforme sua localização geográfica, permitindo uma programação prévia dos veículos; enquanto os clientes frequentes ou ocasionais representam a

parcela cuja localização é dita aleatória para o contexto, e que devem ser inseridos na programação dos veículos que estão em campo.

A estrutura semi-agrupada apresentada por esses conjuntos favoreceu a estratégia proposta, em especial para o conjunto RC1, no qual foi observada uma redução das distâncias, assim como uma redução na quantidade de veículos utilizados. Na Figura 2 podem ser observadas as representações gráficas das instâncias RC101 e RC201, assim como soluções factíveis encontradas.

No conjunto RC2 foi verificada uma redução nas distâncias percorridas, mas o modelo não foi capaz de obter tais resultados mediante a redução da quantidade de veículos para atender aos clientes. Assim, em todas as instâncias estudadas a ampliação das capacidades dos veículos resultou em diminuição da qualidade das soluções apresentadas pela estratégia proposta.

Para esse tipo de serviço de remessas expressas, nas quais a maior parcela de clientes é ocasional e, portanto, possuem localização geográfica aleatória no contexto da programação dos veículos, a estratégia proposta nesse trabalho também apresenta resultados efetivos.



**Figura 2:** Representação gráfica das instâncias RC101 e RC201 com as respectivas soluções factíveis

## 4 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposta a estratégia composta pelo uso do mapa Auto-Organizável de Kohonen combinado com uma estratégia alternativa ao Algoritmo de Etiquetamento Permanente para resolver Problemas de Roteamento e Programação de Veículos com Janelas de Tempo, cuja validação foi realizada em problemas-teste de SOLOMON (1987), utilizados como benchmarking na literatura.

A partir dos resultados apresentados é possível concluir que para conjuntos de problemas cujos dados apresentem padrões aleatório ou semi-agrupado de localização geográfica, como é o caso dos serviços de transporte expresso, a estratégia proposta se mostrou efetiva, quando comparados aos resultados alcançados por CUNHA (1997) que também utilizou o AEP em problemas relaxados como estratégia de solução em problemas PRPJT. A proximidade geográfica associada à proximidade de janela de tempo não favorece no alcance de soluções efetivas da estratégia proposta, pelo simples fato de serem concorrentes.

Em virtude dos resultados apresentados pela estratégia proposta, alguns estudos podem ser realizados para dar solução às limitações encontradas:

- Encontrar alternativa de composição dos dados de entrada que permita à Rede de Kohonen um mapeamento que não incorra em clientes concorrentes quanto às janelas de tempo relacionados nos mesmos grupos.
- Desenvolvimento de estratégia que permita o atendimento clientes de um mesmo grupo nos casos em que os veículos apresentarem limitação de carga. Uma alternativa a ser testada seria a transferência de clientes não atendidos para agrupamentos de neurônios vizinhos, que não implicassem em não atendimento a clientes do agrupamento vizinho por ocasião dessa transferência.
- Aperfeiçoamento da heurística alternativa proposta ao AEP no que se refere à otimização da programação dos veículos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAS, N.; OOMMEN, B.J.; ALTINEL, I.K. 1999. The Kohonen network incorporating explicit statistics and its application to the traveling salesman problem. *Neural Networks*, v. 12, n. 9, p. 1273-1284.
- ASSAD, A. A. 1988. Modeling and implementation issues in vehicle routing. In: *Vehicle Routing: Methods and Studies*, B. L. Golden, A. A. Assad (eds), North Holland, Amsterdam, p. 7-46.
- BAKER. B. M. 1982. Further improvements to vehicle routing heuristics. *Journal of the Operational Research Society*, v.43, n.10, p. 1009-1012.
- BAKER. B. M. 1983. An exact algorithm for the time-constrained traveling salesman problem. *Operational Research Society*, v.43, n.10, p. 1009-1012.
- BODIN, L., GOLDEN, B., ASSAD, A., BALL, M. 1983. Routing and Scheduling of Vehicles and Crews: The State of the Art. *Computers and Operations Research*, v. 10, n. 2, p. 63-212.
- BODIN, L., GOLDEN. 1990. Twenty years of routing and scheduling. *Operations Research*, v. 38, n. 4, p. 571-570.
- CHRISTOFIDES, N., MINGOZZI, A., TOTH, P. 1979. *The vehicle routing problem*. John Wiley & Sons, New York.
- CLARKE, G. e WRIGHT, J. W. 1963. Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. *Operations Research*, v. 12, p. 568-581.
- COCHRANE, E.M., BEASLEY, J.E. 2003. The Co-Adaptive Neural Network Approach to the Euclidean Travelling Salesman Problem. *Neural Networks*, v. 16, n. 10, p. 1499-1525.
- CRÉPUT, Jean-Charles, KOUKAM, A. e HAJJAM K. 2007. Self-Organizing Maps in Evolutionary Approach for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, v. 7, n. 1, p. 103-110.

- CUNHA, C. B. 1997. Uma contribuição para o problema de roteirização de veículos com restrições operacionais. São Paulo: EPUSP, Departamento de Engenharia de Transportes. 222p. (Tese de Doutorado).
- CUNHA, C. B., GUALDA, N. F. 1999. Heurísticas baseadas em relaxação lagrangiana para o problema de roteirização de veículos com restrições operacionais. Transporte em Transformação II. São Paulo: Makron Books/CNT, pp. 81-95.
- DASKIN, M. S. 1985. Logistics: An overview of the state of the art and perspectives on future research. Transportation Research. v. 19A, n. 5/6, p. 383-398.
- DESROCHERS, M., SOUMIS, F. 1988. A generalized permanent labelling algorithm for the shortest path problem with time windows. INFOR, v. 26, n. 3, p. 191-212.
- DESROSIERS, J. DUMAS, Y. SOUMIS, F. 1986a. A dynamic programming solution of the large-scale single-vehicle dial-a-ride problem with time windows. American Journal of Mathematical and Management Sciences, v.6, p.301-325.
- DESROSIERS, J. DUMAS, SALIVÉ, M., SOUMIS, F. 1988. Lagrangian Relaxation Methods for Solving the Minimum Fleet Size Multiple Traveling Salesman Problem with Time Windows. Management Science, v. 34, n. 8, p. 1005-1022.
- FAUSETT, L. 1994. Fundamentals of Neural Networks. New Jersey: Prentice Hall.
- FISHER, M. L. 1985. An applications oriented guide to lagrangian relaxation. Interfaces, v. 15, n. 2, p. 10-21.
- FONSECA, C. H. F. 2002. Alocação de atendimentos de coleta no transporte de remessas expressas em grandes centros urbanos. São Paulo: EPUSP, Departamento de Engenharia de Transportes. 91p. (Dissertação de Mestrado).
- FONSECA, C. H. F. e CUNHA, C. B. 2004. Alocação de atendimentos de coleta no transporte de remessas expressas em grandes centros urbanos. XVIII ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, v. 2, p. 1062-1073.
- FU, L. 2001. An adaptive routing algorithm for in-vehicle route guidance systems with real-time information. Transportation Research, v. 35B, p. 749-765.
- HAYKIN, S. 1999. Neural Networks: A Comprehensive Foundation. New Jersey: Prentice Hall.
- HALL, R.W e PARTYKA, J.G. 2008. On the Road Mobility. OR/MS Today. Fevereiro, 2000. Disponível em: <http://www.lionhrtpub.com>. Acesso em: 04/06/2008.
- HELD, M., KARP, Richard M. 1970. The traveling-salesman problem and minimum spannig trees. Operations Research, v. 18, p. 1138-1162.
- HELD, M., KARP, Richard M. 1971. The traveling-salesman problem and minimum spannig trees: Part II. Mathematical Programing, v. 6, p. 62-88.
- JAILLET, P. 1998. The probabilistic vehicle routing problem, in GOLDEN, B. L. e ASSAD, A. A. (edit.), Vehicle routing: methods and studies, Elsevier, Reino Unido, 1998.
- JAW, J. J., ODONI A. R., PARAFITS, H. N., WILSON, N. H.M. 1986. A heuristic algorithm for the multi-vehicle advance request dial-a-ride problem with time windows. Transportation Research B, v. 20, n. 3, p. 243-257.
- LAPORTE, G. 1992. The Vehicle Routing Problem: An overview of Exact and Approximate Algorithms. Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal, Publication 745.
- LAPORTE, G. 1993. Recent Algorithmic Developments for the Travelling Salesman Problem and the Vehicle Routing Problem. Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal, Publication 932.
- LAPORTE, G., GENDREAU, M., POTVIN, J. Y. e SEMET, F. 2000. Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem. International Transactions in Operational Research, v. 7, n. 4/5, p. 285-300.
- LIN, S. e KERNIGHAN, B. W. 1973. An effective heuristic algorithm for the traveling - Salesman Problem. Operations Research, v. 21, p. 498-516.
- POTVIN, J. Y., ROSSEAU, J. M. 1993. A parallel route building algorithm for the vehicle routing and scheduling problem with time windows. European Journal of Operational Research, v. 66, p. 331-340.
- POTVIN, J. Y., ROSSEAU, J. M. 1995. An exchange heuristic for routing problems with time windows. Journal of Operational Research Society, v. 46, n. 12 p. 1433-1446.
- POTVIN, J. Y. 2008. A Review of Bio-Inspired Algorithms for Vehicle Routing. Centre interuniversitaire de recherché sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport, CIRRELT-2008-30.
- REEVES, C. R. 1993. Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems. John Wiley & Sons, Inc. New York, Toronto.
- ROMARIZ, A. R. S., A. 2005. Sistemas Inteligentes. Apostila desenvolvida para curso de Introdução aos Sistemas Inteligentes, UnB.
- SANTOS, R. L. e LEAL, J. E. 2007. Solução de um problema de roteirização com janelas de tempo através de

- um algoritmo de múltiplas colônias de formigas. TRANSPORTES, v. XV, n. 2, p. 5-16.
- SIQUEIRA, P. H. 2005. Uma nova abordagem na resolução do problema do caixeiro viajante. Curitiba: UFPR, Setor de Ciências Exatas. 116p. (Tese de Doutorado).
- SOLOMON, M. M. 1987. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time windows constraints. Operations Research, v. 35, n. 2, p. 254-265.
- TAILLARD, É., D., LAPORTE, G. e GENDREAU, M. 1996. Vehicle routing with multiple use of vehicle. Journal of Operational Research Society. v. 47, n. 8, p. 1065-1070.
- YEUN, L. C., ISMAIL, W. R., OMAR K. e ZIROUR M. 2008. Vehicle Routing Problem: Models and Solutions. Journal of Quality Measurement and Analysis – JQMA, v. 4(1), p. 205-218.