

APLICANDO O ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA DE FORMIGAS E OS MAPAS AUTO-ORGANIZÁVEIS DE KOHONEN NA ROTEIRIZAÇÃO E PROGRAMAÇÃO DE VEÍCULOS

Ricardo Pinto Ferreira

Universidade Nove de Julho
São Paulo - Brasil

kasparov@uninove.edu.br

Renato José Sassi

Universidade Nove de Julho
São Paulo - Brasil

sassi@uninove.br

Flávio Moreira da Costa

Universidade Nove de Julho
São Paulo - Brasil

flavio.costa@iduo.com.br

Aleister Ferreira

Universidade Nove de Julho
São Paulo - Brasil

aleisterferreira@hotmail.com

André da Silva Souza

Universidade Nove de Julho
São Paulo - Brasil

a.ndresouza@hotmail.com

Resumo: Com o crescimento da economia brasileira, aliado à expansão do comércio eletrônico no país, deu-se um novo impulso ao setor de encomendas. Este novo cenário provocou profundas mudanças no mercado de distribuição de encomendas expressas, tornando a distribuição complexa e competitiva afetando diretamente a eficiência deste serviço. Diversas técnicas e *softwares* são utilizados para roteirização de veículos, inclusive técnicas baseadas em Inteligência Artificial. Neste artigo foram aplicadas, duas técnicas da Inteligência Artificial combinadas, o algoritmo de otimização por colônia de formigas e uma rede neural artificial do tipo mapa auto-organizável. O objetivo deste artigo é roteirizar aplicando o algoritmo de otimização por colônia de formigas a partir de agrupamentos gerados pela rede SOM. Os resultados apontam que a aplicação da combinação das duas técnicas é positiva. Dessa forma, pode-se afirmar que, a roteirização e programação de veículos conforme proposta nesse artigo permite aumentar a eficácia na distribuição de encomendas expressas.

Palavras-chave: Encomendas expressas; Roteirização e programação de veículos; Algoritmo de otimização por colônia de formigas; Mapas auto-organizáveis.

Abstract: With the growth of Brazilian economy, coupled with the expansion of electronic commerce in the country, gave a new impetus to the sector orders. This new scenario has caused profound changes in the distribution market for express parcels, making the complex and competitive distribution directly affect the efficiency of this service. Several techniques and software are used for vehicle routing, including techniques based on Artificial Intelligence. In this paper we applied two techniques of Artificial Intelligence combined, the algorithm of ant colony optimization and artificial neural network-type self-organizing map. This article is routing applying optimization algorithm ant colony from clusters generated by SOM. The results indicate that application of the combination of both techniques is positive. Thus, it can be stated that the vehicle routing and scheduling as proposed in this paper allows for increased efficiency in the distribution of express parcels.

Keywords. Express parcels, Routing and scheduling of vehicles; algorithm ant colony optimization, self-organizing maps.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento do *e-commerce* e das transações *business-to-consumer* (B2C) e *business-to-business* (B2B) deve provocar o aumento do peso e do valor das encomendas transportadas, tais mudanças exigem um novo perfil na distribuição de encomendas expressas no Brasil [1].

Assim, o problema de roteirização de veículos ganha maior importância, tendo em vista a qualidade na distribuição. A roteirização de veículos consiste em definir itinerários, fazendo com que minimizem o custo total de transporte e atendimento. Com isso, visam que os trajetos iniciem e terminem no depósito ou base dos veículos, assegurando que cada ponto seja visitado exatamente uma vez e a demanda, em qualquer rota, não exceda a capacidade do veículo que a atende [2, 3, 4].

O Problema de Roteirização de Veículos (PRV) é de grande importância para o gerenciamento das atividades de coleta e distribuição, e, por isso, tornou-se um dos mais estudados. Mesmo em sua forma padrão [5], o PRV pode ser classificado como um problema do tipo *NP-hard*, o que significa que possui uma ordem de complexidade exponencial [2].

Em termos práticos, isto significa que não é possível resolver de forma ótima um problema real pertencente à classe *NP-hard*. Consequentemente, os métodos de solução aplicados às instâncias reais são, em geral, heurísticos, isto é, não asseguram a obtenção da solução ótima do ponto de vista matemático [6].

O algoritmo de otimização por colônia de formigas são modelos matemáticos baseados no comportamento das formigas, é um termo que representa uma classe de meta-heurísticas bio-inspiradas baseadas no comportamento das formigas [7].

As redes neurais artificiais são modelos constituídos por unidades de processamento simples, chamados de neurônios artificiais, que calculam funções matemáticas. Estes modelos são inspirados na estrutura do cérebro e têm como objetivo simular o comportamento humano, tais como: aprendizagem, associação, generalização e abstração quando submetidas a treinamento. As RNAs são particularmente eficientes para o mapeamento entrada/saída de sistemas não lineares e para realizar processamento paralelo, além de simular sistemas complexos [8].

A rede SOM é uma rede neural artificial de aprendizagem competitiva organizada em duas camadas, a primeira camada representa o vetor dos dados de entrada, a segunda corresponde a uma grade de neurônios, geralmente bidimensional, totalmente conectada aos componentes do vetor de entrada. Cada neurônio possui um vetor de código associado [9].

A rede SOM foi desenvolvida pelo pesquisador finlandês Teuvo Kohonen no início da década de 80. A rede SOM é o modelo de redes neurais artificiais competitivas em maior uso, e tem sido utilizada em diversas aplicações, incluindo agrupamento e visualização de dados multidimensionais [9, 10].

O artigo está organizado após essa seção introdutória da seguinte forma: a seção 2 é apresentado os fundamentos básicos de roteirização e programação de veículos, na seção 3 é apresentado os mapas auto-organizáveis de Kohonen, na seção 4 é apresentado o algoritmo de otimização por Colônia de Formigas, na seção 5 é apresentada metodologia do artigo, na seção 6 é apresentado os resultados computacionais, na seção 7 o artigo é encerrado com as Considerações Finais.

2. FUNDAMENTOS BÁSICOS DE ROTEIRIZAÇÃO E PROGRAMAÇÃO DE VEÍCULOS

Segundo Bodin [2] a roteirização pode ser inicialmente classificada em três grupos de problemas principais: Roteirização de Veículos (PRV), Programação de Veículos e Tripulação (PVT) e Roteirização e Programação de Veículos (RPV).

No problema de roteirização de veículos, as condicionantes temporais não são consideradas na geração dos roteiros, sendo que em alguns casos pode-se considerar a restrição de comprimento máximo do roteiro.

A programação de veículos envolve: quantidade de veículos, capacidade de cada veículo (cubagem em m³), pontos de paradas para coleta ou entrega, tempo necessário para cada parada, alocação da tripulação, jornada de trabalho, etc.

A montagem da rota ou programação de veículos é o problema encontrado para direcionar veículos através de uma rede de logradouros. O movimento pode ser feito pela mínima distância, mínimo tempo, máxima economia, caminho mais fácil ou por uma combinação destes [11].

No problema de programação de veículos e tripulação, as condicionantes temporais devem ser consideradas, ou seja, as restrições adicionais relacionadas aos horários em que as atividades serão executadas devem ser consideradas no tratamento do problema, entre outras restrições como janela de atendimento, restrições de circulação, restrições da dimensão do veículo, os dois últimos bastante comuns nas grandes cidades.

As decisões operacionais mais importantes relacionadas ao transporte na cadeia de suprimentos dizem respeito às rotas (roteirização) e aos cronogramas (programação) de coletas e entregas [12].

3. MAPAS AUTO-ORGANIZÁVEIS DE KOHONEN OU REDE SOM

A rede SOM é um tipo de rede neural artificial baseada em aprendizado competitivo e não-supervisionado, sendo capaz de mapear um conjunto de dados, de um espaço de entrada multidimensional, num conjunto finito de neurônios organizados em um arranjo normalmente unidimensional ou bidimensional [13].

O algoritmo de aprendizado da rede SOM é composto por três fases: competição, cooperação e adaptação:

a) **Competição.** Para cada padrão de entrada, os neurônios da grade calculam seus respectivos valores de uma função discriminante. Esta função discriminante fornece a base para a competição entre os neurônios. O neurônio com o maior valor da função discriminante é declarado vencedor da competição [8].

O princípio para o processo de aprendizado competitivo é a concorrência entre os neurônios, com o objetivo de determinar o vencedor da competição, pois o processo é não supervisionado, ou seja, não tem a saída desejada [14].

O prêmio para o neurônio vencedor da competição é o ajuste dos seus pesos, proporcionalmente aos valores do padrão de entrada apresentado, visando melhorar o seu estado para a próxima competição, se todas as conexões laterais deste neurônio vencedor forem nulas, implica que somente os seus pesos serão ajustados e assume-se a estratégia do vencedor leva tudo. Por causa disso, este tipo de rede é também chamado de rede do tipo o vencedor leva tudo ou (*winner-takes-all*) [14, 15].

b) **Cooperação.** O neurônio vencedor determina a localização espacial de uma vizinhança topológica de neurônios excitados, fornecendo assim a base para a cooperação entre os neurônios vizinhos.

c) **Adaptação Sináptica.** Este último mecanismo permite que os neurônios excitados aumentem seus valores individuais da função discriminante em relação ao padrão de entrada através de ajustes adequados aplicados a seus pesos sinápticos. Os ajustes feitos são tais que a resposta do neurônio vencedor à aplicação subsequente de um padrão de entrada similar é melhorada [8].

Para cada dado apresentado à rede haverá uma competição entre todos os neurônios pelo direito de representá-lo. Vence a competição o neurônio que tiver o vetor de pesos mais próximo do vetor de dados. A Figura 1 mostra um modelo da rede SOM.

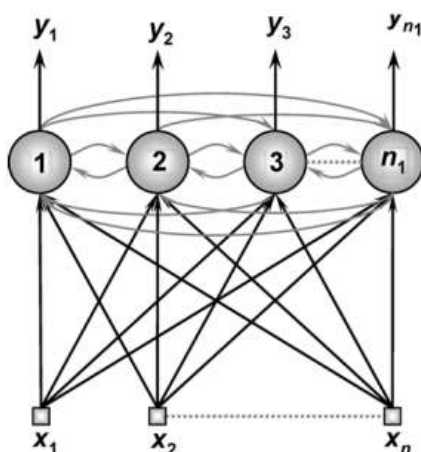


FIGURA 1 – Modelo da rede SOM adaptado de [14]

As conexões laterais entre os neurônios da Figura 1 revela o papel que um neurônio pode influenciar na resposta de saída produzida por outro neurônio.

Embora a rede SOM seja utilizada para diversas aplicações em diferentes áreas do conhecimento; Descoberta de Conhecimento em Bases de Dados [16], Categorização de Imagens Médicas [17], Identificação e Prevenção do Absenteísmo [18] os trabalhos mais

bem difundidos tratam sobre problemas que envolvem classificação de padrões e agrupamento de dados ou clusterização [14].

4. ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA DE FORMIGAS

O primeiro algoritmo de colônia de formigas *Ant Colony Optimization* (ACO) foi inspirado na observação de colônias de formigas que são capazes de encontrar o caminho mais curto entre seus ninhos e as fontes de alimento [19].

As formigas quando em busca de alimento exploram aleatoriamente o ambiente em torno de seu ninho de uma forma aparentemente desordenada. Ao percorrerem esse trajeto as formigas liberam uma substância química chamada feromônio. Ao mesmo tempo, as formigas são influenciados pela presença de feromônios no ambiente e tem uma tendência probabilística a seguir na direção em que a concentração de feromônios é mais forte, pois deve-se escolher um arco entre todos os outros existentes a partir da sua posição atual. A Figura 2 ilustra de forma simplificada esse comportamento na sequência (a, b, c, d, e).

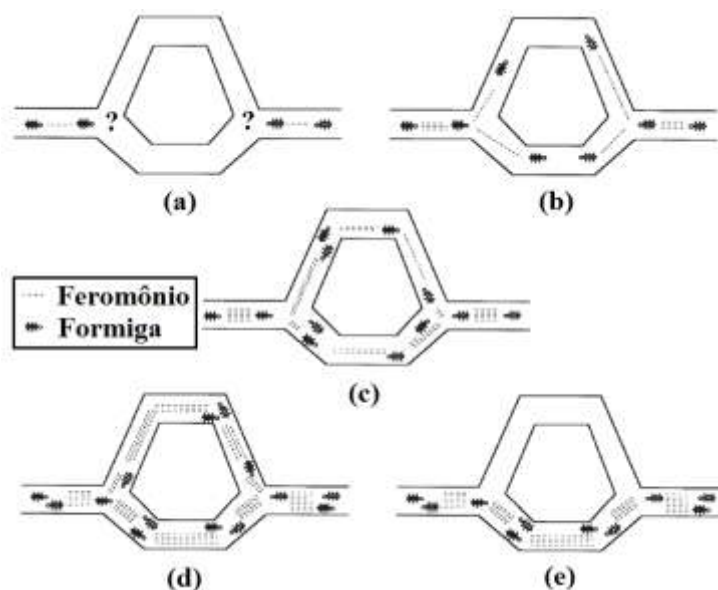


FIGURA 2 – Trajeto das formigas adaptado de [20]

Essa escolha baseia-se na quantidade de feromônios acumulado no caminho das formigas precedentes e na distância existente em cada arco. Para esses valores é atribuído um peso diferente através dos parâmetros do algoritmo: *alfa* (α) e *beta* (β), respectivamente [21].

Esses parâmetros servem para determinar a influência do feromônio e da informação heurística. A atratividade de cada arco pode ser descrito conforme a equação:

$$a_{ij}(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in N_i} [\tau_{il}(t)]^\alpha [\eta_{il}]^\beta} \quad (1)$$

A partir da equação 1 é calculada a atratividade $a_{ij}(t)$ para uma formiga que esta em um nó i qualquer, e para todo nó j pertencente a N_i , em que N_i é o conjunto dos nós adjacentes ao nó i . A variável τ_{ij} representa a quantidade de feromônio acumulada no arco ij , e a variável η_{ij} é igual ao inverso do comprimento do arco ij . O parâmetro t , indica que os valores estão variando a cada iteração.

Após o cálculo de todos os valores dos arcos incidentes a_i , calcula-se a probabilidade de uma formiga k escolher percorrer o arco ij . A equação 2 descreve essa probabilidade:

$$p_{ij}^k(t) = \frac{a_{ij}(t)}{\sum_{l \in N_i^k} a_{il}(t)} \quad (2)$$

Na equação 2, N_i^k é o subconjunto de N_i que apresenta apenas os nós que ainda não foram visitados pela formiga k .

A formiga k seleciona um arco entre todas as possíveis alternativas através do cálculo da probabilidade acumulada a partir das probabilidades de cada arco p_{ij} e sorteia-se um número aleatório no intervalo entre 0 e 1. O arco escolhido será aquele em que o número sorteado possuir valor maior ou igual à $p_{ij}-1$ e menor que p_{ij} . Uma vez que todas as formigas k percorreram os arcos, o feromônio é atualizado em todos os arcos de acordo com [20]. Esta atualização consiste na evaporação dos feromônios e na deposição de novos feromônios.

Arcos mais curtos com feromônio elevado têm maior probabilidade de seleção [22]. A Figura 3 ilustra a seleção baseada nesse critério.

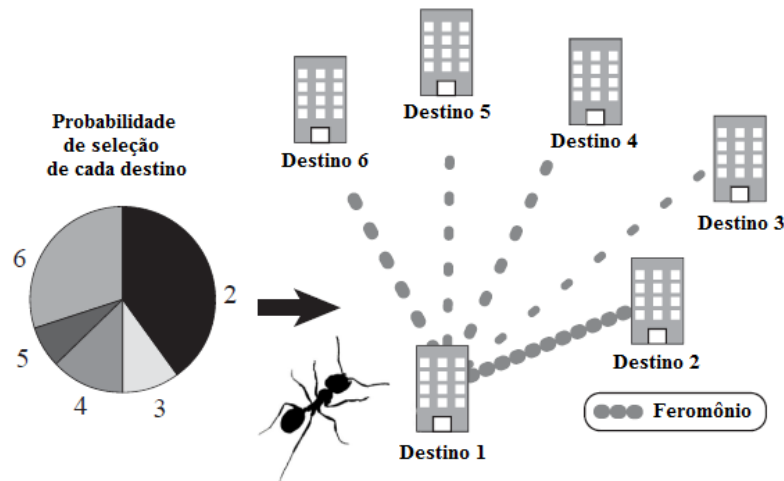


FIGURA 3 – Exemplo da probabilidade de seleção adaptado de [23]

A equação 3 descreve a atualização dos feromônios:

$$\tau_{ij}(t) \leftarrow (1 - \rho)\tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t) \quad (3)$$

Na equação 3, o parâmetro ρ representa o nível de evaporação dos feromônios, que atua como um coeficiente de decaimento. O somatório representa todas as contribuições individuais de cada formiga k que tenha passado pelo arco ij na atual iteração e m é o número de formigas [24].

O $\Delta\tau_{ij}^k$ é a quantidade de feromônios que a formiga k deposita no arco ij , e é definida como o inverso do comprimento total do percurso L_k que a formiga k percorreu [25]. Quanto mais formigas passarem ao longo de um arco, mais feromônios serão depositados no arco, e o tamanho destas deposições é proporcional à qualidade das soluções encontradas. A expressão a seguir descreve isso:

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{1}{L_k(t)} se(ij) \in percurso_feito_pela_formiga_k_na_iteração_t \\ \{zero(0), caso_contrário \end{cases} \quad (4)$$

Outra meta-heurística desenvolvida tendo como base o *Ant Colony Optimization*, conhecida como *Ant Colony System*, consiste no aprimoramento do ACO.

5. METODOLOGIA

A metodologia adotada na estruturação deste artigo foi definida como bibliográfica, e experimental. A realização da pesquisa desse artigo esta embasada em consultas às fontes bibliográficas e de referencial teórico como: artigos, livros, teses, dissertações e *websites* com conteúdos sobre roteirização e programação de veículos, colônia de formigas, redes neurais artificiais e rede SOM.

Utilizou-se, neste artigo, um algoritmo de otimização por colônia de formigas e uma rede neural artificial do tipo SOM.

A base de dados utilizada na rede SOM foi coletada através de registros da distribuição de encomendas expressas em uma empresa de *courier* que atua na da cidade de São Paulo e região da grande São Paulo.

Os atributos foram: quantidade de tripulantes, forma de acondicionamento/transbordo da carga (manual ou mecânizada/paletizada), dificuldade de atendimento (tempo de espera, identificação do entregador etc.), distância do depósito em quilômetros, média de carga mensal por ponto, média de carga diária por ponto, média de volumes transportados por dia, ocupação média do veículo (%) e tipo de veículo utilizado.

Os dados geográficos foram registrados através de um sistema de posicionamento global (GPS), do original inglês *Global Positioning System*. A Tabela 1 mostra as coordenadas utilizadas no experimento com o algoritmo de otimização por colônia de formigas. O primeiro ponto representa o depósito.

TABELA 1 – Coordenadas geográficas (18 pontos)

Pontos	<i>x</i> (S) - <i>y</i> (O) -		Pontos	<i>x</i> (S) - <i>y</i> (O) -	
	23°	46°		23°	46°
1	23.52852°	46.73748°	10	23.52385°	46.69796°
2	23.43318°	46.32793°	11	23.67492°	46.70868°
3	23.60356°	46.87112°	12	23.52949°	46.62739°
4	23.50504°	46.82323°	13	23.54517°	46.63364°
5	23.49946°	46.82633°	14	23.48792°	46.94238°
6	23.64358°	46.58365°	15	23.67460°	46.58700°
7	23.55309°	46.77783°	16	23.69264°	46.57101°
8	23.68261°	46.69009°	17	23.50642°	46.84928°
9	23.64013°	46.66134°	18	23.49830°	46.84241°

6. RESULTADOS COMPUTACIONAIS

A plataforma de *hardware* utilizada nos experimentos foi um computador com processador Intel® Core™ 2 Duo CPU T6600 de 2,20 GHz com 4,00 GB de memória RAM DDR3, 320 GB de disco rígido e sistema operacional Windows 7 com 64 *bits*.

Para a tabulação da base de dados tanto para utilização na rede SOM quanto no algoritmo de otimização por colônia de formigas foi utilizado o MS Excel. Com relação ao *software* utilizado para gerar os Mapas Auto-Organizáveis, foi utilizado, o *software* Viscovery® SOMine versão 5.2.2 e para gerar os roteiros com o algoritmo de otimização por colônia de formigas foi utilizado o *software* Matlab versão 7.8.0.

6.1 Resultados Computacionais com a rede SOM

A base de dados do experimento com a rede SOM é composta por 9 atributos e 162 dados, os parâmetros utilizados na estrutura da rede SOM são os seguintes:

- Dimensões: número de neurônios nos experimentos $8 \times 8 = 64$ neurônios.
- Vizinhança topológica: hexagonal.
- Função de vizinhança topológica: gaussiana.

Os parâmetros de treinamento utilizados na rede SOM são os seguintes:

- Número de épocas igual a 1000.
- Taxa de aprendizagem igual $a = 0,5$ na fase inicial de treinamento e na fase de convergência a taxa foi de $= 0,05$ [26].

A Figura 4 mostra os *clusters* gerados pela rede SOM com toda a base de dados, observam-se as características de cada veículo utilizado no atendimento aos 18 pontos de distribuição.

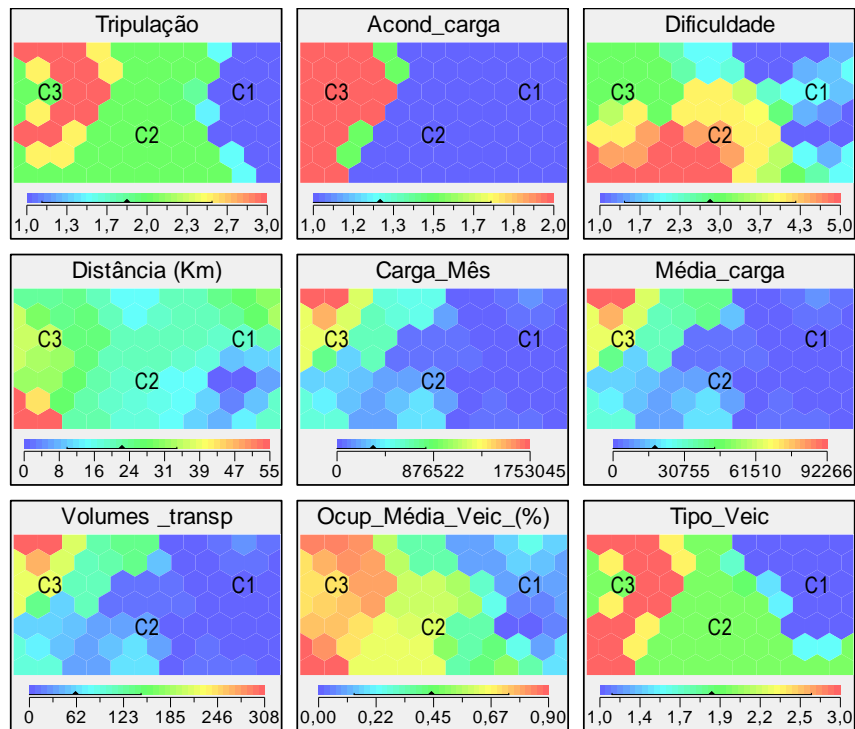


FIGURA 4 – Clusters gerados pela rede SOM

A Figura 5 mostra os agrupamentos (*clusters*) do atributo (tipo de veículo) gerada pela rede SOM, esse atributo foi o atributo de decisão para a roteirização com o algoritmo de otimização por colônia de formigas. Foram utilizados três tipos de veículos: (1=C1) com capacidade de até 0,7 tonelada, (2=C2) com capacidade até 1,5 tonelada e (3=C3) com capacidade até 3 toneladas, no experimento foi utilizado um veículo de cada tipo para atender todos os pontos.

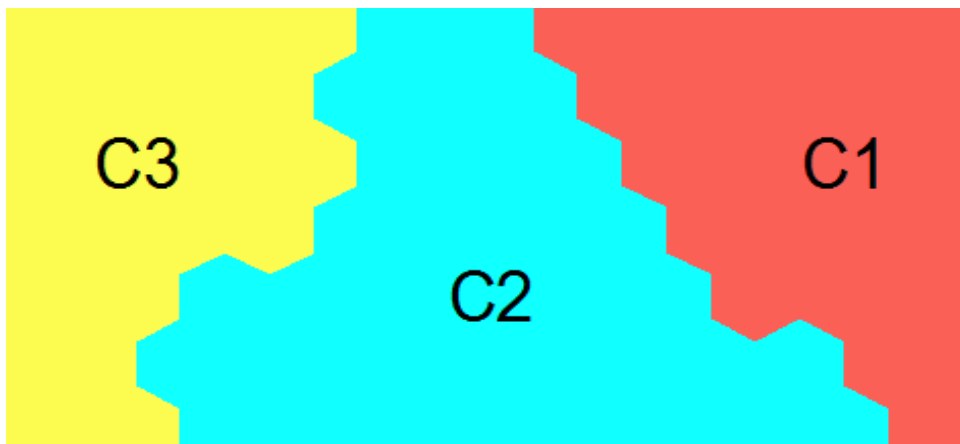


FIGURA 5 – Clusters gerados pela rede SOM (atributo: tipo de veículo)

6.2 Resultados Computacionais com o algoritmo de otimização por colônia de formigas

Os parâmetros utilizados para aplicação do algoritmo de otimização por colônia de formigas foi: $\alpha = 1$, $\beta = 5$, $\rho = 0,65$. O número máximo de iterações = 200 com $k = 20$ formigas cada uma. A Figura 6 mostra o roteiro gerado com 70,22 Km para o veículo 1 (0,7 tonelada, 5 pontos com pequena demanda e um tripulante).

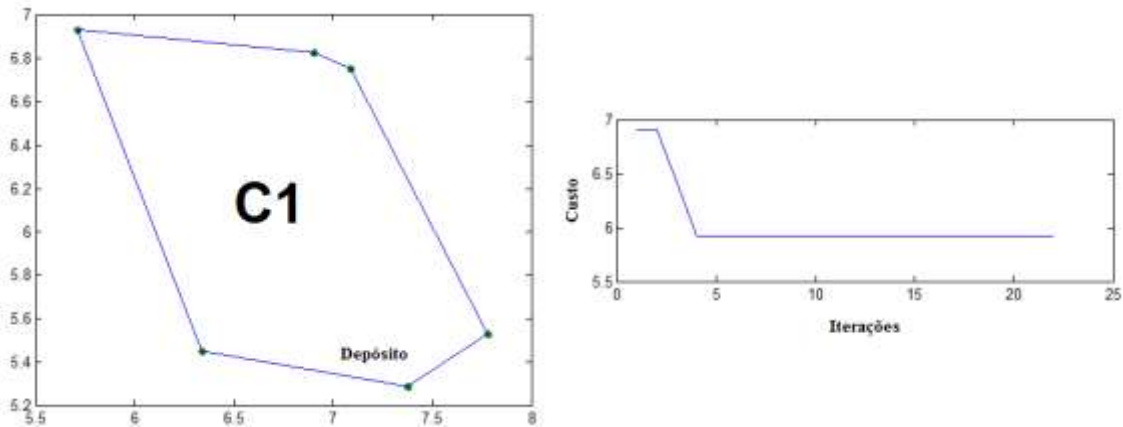


FIGURA 6 – Roteiro do veículo 1 (0,7 tonelada) versus Iterações e custo

A Figura 7 mostra o roteiro gerado com 70,33 Km para o veículo 2 (1,5 tonelada, 8 pontos com média demanda e dois tripulantes).

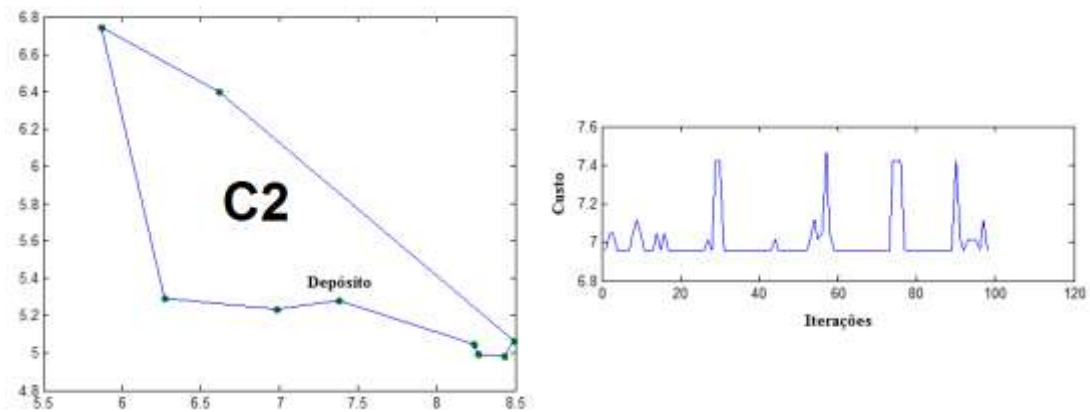


FIGURA 7 – Roteiro do veículo 2 (1,5 tonelada) versus Iterações e custo

A Figura 8 mostra o roteiro gerado com 122,51 Km para o veículo 3 (3 toneladas, 4 pontos com grande demanda e três tripulantes). O roteiro gerado para o veículo 3 apresentou maior quilometragem apesar de atender menos pontos, isso se deve a forma de acondicionamento da carga e a ocupação média do veículo ser alta.

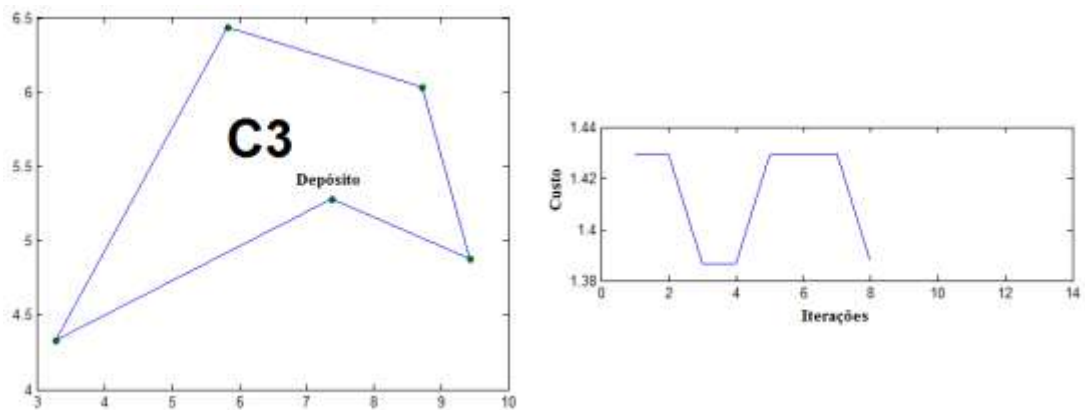


FIGURA 8 – Roteiro do veículo 3 (3 toneladas) versus Iterações e custo

Os três resultados computacionais com o algoritmo de otimização por colônia de formigas foram atingidos com menos de cem iterações o que indica que problemas com maior complexidade podem ser resolvidos.

7. Considerações Finais

Neste artigo o problema de roteirização e programação de veículos foi abordado com ênfase na escolha do tipo de veículo (capacidade em m³) e no melhor roteiro, tendo como segundo plano o acondicionamento e transbordo da carga, a dificuldade de atendimento (distância do depósito, trânsito, restrições legais, tempo de espera para identificação do entregador, efetivação da entrega etc.), volume transportado por dia e o número de tripulantes dos veículos.

Observa-se que os agrupamentos gerados pela rede SOM apresentam uma forma visual intuitiva para auxiliar na tomada de decisão quanto a programação de veículos e tripulação (PVT) e a roteirização e programação de veículos (RPV).

O algoritmo de otimização por colônia de formigas foi capaz de gerar bons roteiros, os resultados apontam que a aplicação da combinação das duas técnicas para a roteirização e programação de veículos é positiva e pode auxiliar na construção de cadeias de distribuição mais versáteis, eficientes e produtivas elevando o nível de serviço nas empresas de *courier*.

Como estudos futuros pretende-se integrar um sistema de roteirização por hierarquia como proposto em [27, 28] utilizando no nível operacional os algoritmos de colônia de formigas.

Referências

- [1] VALOR SETORIAL LOGÍSTICA. São Paulo: Valor Econômico, 2012.
- [2] BODIN, L. D.; GOLDEN, B.; ASSAD, A.; BALL, E.M. *Routing and scheduling of vehicles and crews: The state of the art. Computers and Operations Research*, v.10, n.2, p. 289-315, 1983.
- [3] CUNHA, C. B. Uma Contribuição para o Problema de Roteirização de Veículos Com Restrições Operacionais. 1997. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo. 222 p.
- [4] LAPORTE, G.; GENDREAU, M.; POTVIN, J.Y.; SEMET, E. F. *Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem, International Transactions in Operational Research*, v.7, n4/5, p. 285-300, 2000.
- [5] CORDEAU, J. F.; GENDREAU, M.; LAPORTE, G.; POTVIN, J. Y.; SEMET, F. *A Guide to Vehicle Routing Heuristics. Journal of the Operational Research Society*. v. 53, p. 512-522, 2002.
- [6] CUNHA, C. B.; BONASSER, U. O.; ABRAHÃO, F. T. M. Experimentos Computacionais com Heurísticas de Melhorias para o Problema do Caixeiro Viajante. Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes. XVI Congresso da Anpet, Natal, 2002.
- [7] DORIGO, M.; MANIEZZO, V.; COLORNI, A. *Positive feedback as a search strategy. Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, Italy, Technical Report 91-016*, 1991.
- [8] HAYKIN, S. *Redes Neurais – Princípios e Práticas*. Bookman. 2a edição. Porto Alegre, 2001.
- [9] KOHONEN, T. *Self-Organizing Maps*. New York. Springer. 3ª Edition, ISBN: 3-540-67921-9, 2001.
- [10] COSTA, J. A. F.; NETTO, M. L. A. Segmentação de Mapas Auto-Organizáveis com Espaço de Saída 3-D. *Revista Controle & Automação/Vol.18 n.2/abr, mai. e Jun.* 2007.
- [11] BALLOU, R. H. *Logística Empresarial: transportes, administração de materiais e distribuição física*. Tradução de Hugo T. Y. Yoshizaki. São Paulo: Atlas, 2011.

- [12] CHOPRA, S.; MEINDL, P. Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos. Tradução Claudia Freire; revisão técnica Paulo Roberto Leite. – São Paulo: Prentice Hall, 2003.
- [13] VESANTO, J.; ALHONIEMI, E. *Clustering of the Self-Organizing Map. IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 11, nº 2, p. 586-600, 2000.
- [14] SILVA, I. N.; SPATTI, D. H.; FLAUZINO, R. A. Redes Neurais Artificiais para Engenharia e Ciências Aplicadas. SP: Artliber, ISBN: 978-85-88098-53-4, 2010.
- [15] BRAGA, A. P.; CARVALHO, A. C. P. L. F.; LUDERMIR, T. B. Redes Neurais Artificiais: Teoria e Aplicações. Rio de Janeiro. Ed. LTC, 2ª ed. Rio de Janeiro. ISBN: 978-852-161564-4, 2011.
- [16] SASSI, R. J. Uma Arquitetura Híbrida para Descoberta de Conhecimento em Bases de Dados: Teoria dos *Rough Sets* e Redes Neurais Artificiais Mapas Auto-Organizáveis. 2006. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Elétrica, São Paulo. 169 p. São Paulo, 2006.
- [17] SILVA, L. A. Categorização de Imagens Médicas para Sistemas de Recuperação de Imagens por Conteúdo Baseada em Transformada Wavelet e Mapas Auto-Organizáveis. 2009. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Elétrica, São Paulo. 99 p. São Paulo, 2009.
- [18] MARTINIANO, A. S.; FERREIRA, R. P.; SASSI, R. J. O Uso de Mapas Auto-Organizáveis de Kohonen para Identificar e Prevenir o Absenteísmo. In: XVIII Simpósio de Engenharia de Produção - SIMPEP, 2011, Bauru. Sustentabilidade na Cadeia de Suprimentos. v. XVIII. p. 1-12, 2011.
- [19] DORIGO, M.; STÜTZLE, T. *Ant Colony Optimization*. Bradford Book, 2004.
- [20] DORIGO, M.; GAMBARDELLA, L. M. *Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem. IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v. 1, n. 1, p. 53-66, 1997.
- [21] SANTOS, R. L.; LEAL, J. E. Solução de um problema de roteirização com janelas de tempo através de um algoritmo de múltiplas colônias de formigas. Transportes (Rio de Janeiro), v. XV, n. 2, p. 5-16, 2007.
- [22] HAUPT, R. L.; HAUPT S. E. *Practical genetic algorithms*. Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004.
- [23] YOSHIKAWA, M.; OTANI, K. *Ant Colony Optimization Routing Algorithm with Tabu Search. Proceedings of the Internacional MultiConference of Engineers and Computer Scientists*, 2010. V. III. IMECS 2010. Hong Kong, 2010.
- [24] SILVA JUNIOR, O. S.; LEAL, J. E. Roteirização dinâmica de veículos com janelas de tempo usando de um algoritmo de colônias de formigas. In: XXIII ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2009, Vitória. XXIII ANPET. Anais Eletrônicos. VITORIA : ANPET, 2009.
- [25] DORIGO, M.; MANIEZZO, V.; COLORNI, A. *The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics–Part B*, v.26, n.1, p.1-26, 1996.
- [26] KASKI, S.; KOHONEN, T. *Winner-Takes-All Networks. Triennial Report 1994 – 1996, Neural Networks Research Centre & Laboratory of Computer and Information Science, Helsinki University of Technology, Finland*, p. 72-75, 1997.
- [27] FERREIRA, R. P. Combinação de Técnicas da Inteligência Artificial para Previsão do Comportamento do Tráfego Veicular Urbano na Cidade de São Paulo. 2011. Dissertação (Mestrado) – Universidade Nove de Julho, Engenharia de Produção, São Paulo. 107 p. São Paulo, 2011.
- [28] FERREIRA, R. P.; AFFONSO, C. O.; SASSI, R. J. Aplicação de uma Rede Neuro *Fuzzy* na previsão do comportamento do tráfego urbano da Cidade de São Paulo. *IEEE Proceedings: 5ª Conferencia Ibérica de Sistemas y Tecnologías de Información (CISTI - 2010)*, Santiago de Compostela. v. II. p. 82-85, 2010.