

A INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA PREVISÃO DO COMPORTAMENTO DO TRÁFEGO VEICULAR URBANO NA CIDADE DE SÃO PAULO: UMA PROPOSTA DE MELHORIA NA DISTRIBUIÇÃO FÍSICA

Ricardo Pinto Ferreira
Universidade Nove de Julho
São Paulo - Brasil
kasparov@uninove.edu.br

Carlos Affonso
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Itapeva - Brasil
affonso.unesp@gmail.com

Renato José Sassi
Universidade Nove de Julho
São Paulo - Brasil
sassi@uninove.br

RESUMO

O aumento do consumo das famílias brasileiras, fruto da estabilidade econômica experimentada no país nos últimos anos, resultou na ampliação do volume de itens, que devem ser coletados ou distribuídos diariamente na cidade de São Paulo. Este cenário provocou profundas mudanças no mercado de distribuição e coleta de encomendas, tornando a distribuição altamente complexa e afetando diretamente a eficiência deste serviço. As condições de fluidez e segurança do trânsito da cidade de São Paulo dependem diretamente de algumas ocorrências como caminhão quebrado, manifestações em vias, falta de energia elétrica, queda de árvore, acidentes com ou sem vítimas etc, chamadas de ocorrências notáveis. Existem três níveis de roteirização que devem ser analisados: o Nível Operacional, neste nível encontram-se os métodos de roteirização de veículos; o Nível Tático, neste nível encontra-se a Roteirização Dinâmica de Veículos, que oferece em tempo real alternativas para reduzir o tempo improdutivo em trechos interrompidos ou com lentidão acentuada devido a alguma ocorrência notável e o Nível Estratégico, neste nível encontra-se a previsão do comportamento do tráfego veicular urbano no início do roteiro. Diversas técnicas e softwares são utilizados para prever o comportamento do tráfego veicular urbano na cidade de São Paulo, inclusive técnicas baseadas em Inteligência Artificial. Assim sendo, neste artigo foram aplicadas, para a previsão do comportamento deste tráfego, duas técnicas da Inteligência Artificial combinadas, a Lógica *Fuzzy* ou Lógica Difusa e as Redes Neurais Artificiais, que unidas formam uma rede chamada de Neuro *Fuzzy*. O objetivo deste artigo foi prever o comportamento do tráfego veicular urbano durante uma semana na cidade de São Paulo, usando uma Rede Neuro *Fuzzy*. Os resultados apontam que a aplicação da Rede Neuro *Fuzzy* na previsão do comportamento do tráfego veicular urbano na cidade de São Paulo é positiva. Dessa forma, pode-se afirmar que, a roteirização dinâmica de veículos combinada à previsão do comportamento do tráfego, possibilita aumentar a eficácia da roteirização em uma cidade como São Paulo.

PALAVRAS CHAVE. Rede Neuro *Fuzzy*; Roteirização de Veículos; Previsão do Comportamento do Tráfego.

ABSTRACT

In recent years, the increase in consumption of Brazilian families, result of economic the stability experienced in the country, has resulted in a high volume of items that should be collected or distributed daily in São Paulo city. This scenario has caused profound changes in the market of distribution and collected orders, making the distribution highly complex and directly affecting the efficiency of this service. The conditions of traffic flow and safety, of the city of São Paulo, depends directly on some issues such as: broken trucks, manifestation on roads, lack of energy, tree falling, accidents with or without victims and other occurrences. There are three levels of routing to be examined: the Operational Level, at this level we consider the methods for vehicle routing; Tactical Level, this level is the Dynamic Vehicle Routing, that offers real-time alternatives to reduce unproductive time in stretches, with slow or interrupted, due to some accentuated remarkable occurrence and the Strategic Level, this level is the prediction of the behavior of urban vehicular traffic at the beginning of the script. Many techniques and software are used to predict the behavior of vehicular traffic in a week in the São Paulo city, including techniques based on Artificial Intelligence. Thus, this work was applied to predict the behavior of traffic, two Artificial Intelligence techniques combined: Fuzzy Logic or Diffuse Logic and Artificial Neural Networks, which together form a network called Neuro Fuzzy. This paper aims to predict the behavior of city vehicular traffic in the city of São Paulo using a Neuro Fuzzy Network. The results indicate a positive impact to application of Neuro Fuzzy Network for predicting the behavior of urban vehicular traffic in São Paulo. It can be stated that the dynamic routing of vehicles combined with the prediction of traffic behavior possible to increase the efficacy of the routing in a city like São Paulo.

KEYWORDS. Neuro Fuzzy Network; Routing of Vehicle; Prediction of Traffic Behavior.

1. Introdução

Os novos hábitos de consumo dos brasileiros trouxeram ao mercado produtos com ciclo de vida mais curto e, conseqüentemente, volumes crescentes de itens coletados ou distribuídos todos os dias (TODAY, 2009).

O problema de 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 (BODIN *et al.*, 1983; CUNHA, 1997; LAPORTE *et al.*, 2000).

Nas regiões urbanas, devido a diversas alternativas de rota, é possível abrir mão de alguma vantagem quanto à distância mínima para obtenção de menor tempo de deslocamento (BALLOU, 2011).

Quando a definição dos roteiros envolve não só aspectos espaciais ou geográficos, mas também temporais, tais como restrições de horários de atendimento nos pontos a serem visitados, esses problemas são então denominados roteirização e programação de veículos (CUNHA, 1997).

A roteirização dinâmica de veículos consiste em alterações das rotas iniciais conforme fluidez de tráfego, oferecendo em tempo real rotas alternativas que minimizem o tempo improdutivo de espera em congestionamentos.

O trânsito caótico, presenciado na cidade de São Paulo é formado por diversas ocorrências notáveis (ON), que são destacadas pela central de operações da Companhia de Engenharia de Tráfego (CET), pois interferem, ou podem vir a alterar, as condições de fluidez e de segurança do tráfego na cidade (CET, 2011).

Essas ocorrências são registradas durante o dia e formam os congestionamentos que impedem a eficiência do transporte urbano, além de causar prejuízos consideráveis.

O artigo está organizado após essa seção introdutória da seguinte forma: a seção 2 é apresentada a metodologia do artigo, na seção 3 é apresentada a justificativa do artigo, na seção 4

é apresentado os Fundamentos Básicos da Roteirização e Programação de Veículos, na seção 5 é apresentado a Roteirização Dinâmica de Veículos (RDV), na seção 6 é apresentada as Redes Neurais Artificiais, na seção 7 é apresentada a Aplicação de uma Rede Neuro *Fuzzy* no nível estratégico da roteirização de veículos, na seção 8 o artigo é encerrado com as Considerações Finais.

2. Metodologia

A metodologia adotada na estruturação deste artigo foi definida como bibliográfica, e experimental.

A realização da pesquisa deste artigo esta embasada em consultas às fontes bibliográficas e de referencial teórico como: artigos, livros, teses, dissertações, *websites* com conteúdos sobre Roteirização e Programação de Veículos (RPV), RNAs, Lógica *Fuzzy* e RNFs.

Utilizou-se, neste artigo, uma RNF obtida através da combinação da Lógica *Fuzzy* com uma Rede Neural Artificial do tipo MLP (*Multilayer Perceptron*), sendo que a camada de entrada da RNF MLP foi composta pelas ocorrências notáveis de trânsito obtidos no *website* (<http://www.cetsp.com.br>) da Companhia de Engenharia de Tráfego (CET) com as informações sobre as ocorrências notáveis de trânsito na cidade de São Paulo.

A coleta dos dados não seguiu nenhum planejamento de experimento pré-definido. Os dados foram coletados de segunda a sexta-feira nos dias 14, 15, 16, 17 e 18 de Dezembro de 2009.

3. Justificativa

Segundo Ballou (2001) e Bowersox e Closs (2010), as empresas que forem capazes de desenvolver eficazmente seu sistema logístico, terão a vantagem de serem extremamente importantes no futuro. A tecnologia de transmissão de informações de trânsito *Traffic Massage Channel* (TMC) permite a comunicação embarcada com os roteirizadores e aparelhos de GPS, que podem reconstruir a rota inicial a todo o momento. Assim que um ponto de interrupção é informado, o roteirizador estabelece outras rotas, evitando os bolsões congestionados.

Segundo Santos, Felix e Vieira (2009), as ferramentas de Inteligência Artificial (IA) surgem como alternativas de apoio ou substituição dos métodos tradicionais de processamento e tomada de decisão na logística de distribuição física.

O cenário apresentado justifica a preocupação em otimizar o tempo de utilização de veículos, as restrições de circulação e o rodízio de veículos, fatores que reduzem a produtividade diária, que, em operação livre, devem ter seu potencial maximizado, buscando economia de tempo e combustível.

Assim, o desafio de prever o comportamento do tráfego veicular urbano na cidade de São Paulo para que auxilie adequadamente na construção das rotas para os diversos tipos de veículos, leves e pesados, inclusive motocicletas nas regiões metropolitanas de São Paulo, justifica este estudo.

Como fator principal, a redução dos congestionamentos impulsiona a aplicação da Rede Neuro *Fuzzy* MLP desenvolvida neste artigo, para que se possa receber e enviar informações durante todo trajeto inicialmente definido e alterá-lo quando necessário.

4. Fundamentos Básicos da Roteirização e Programação de Veículos

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. Segundo Cordeau *et al.* (2002), mesmo em sua forma padrão, o PRV pode ser classificado como um problema do tipo NP-hard, o que significa que possui uma ordem de complexidade exponencial (BODIN *et al.*, 1983).

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 (CUNHA, BONASSER e ABRAHÃO, 2002).

A roteirização, envolvendo muitas paradas e veículos, permite um número muito grande de itinerários. Por isso, boas soluções podem ser muito úteis, tendo em vista que o tempo para a

montagem das rotas ou programação dos veículos é curto principalmente em regiões urbanas (CUNHA, 1997).

Segundo Bodin *et al.* (1983) a roteirização pode ser inicialmente classificada em três grupos de problemas principais: Roteirização de Veículos (PRV), Programação de Veículos e Tripulação (PPVT) e Roteirização e Programação de Veículos (PRPV).

No Problema de Roteirização de Veículos (PRV), as condicionantes temporais não são consideradas na geração dos roteiros para coleta e/ou entrega, 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.

Segundo Ballou (2011), 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.

No Problema de Programação de Veículos e Tripulação (PPVT), 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.

Segundo Chopra e Meindl (2003), 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.

O Problema de Roteirização e Programação de Veículos (PRPV) é uma extensão do problema de roteirização de veículos, em que restrições realistas são incluídas, tais como janela de atendimento, precedência de tarefas e alocação da tripulação, etc.

Para Gomes (2004), a roteirização e programação de veículos é um problema de decisão definida em relação aos clientes. Alguns exemplos são listados a seguir com o objetivo de elevar o nível do serviço ou produto aos clientes, melhorar os roteiros dos veículos por meio das malhas disponíveis e baixar o custo operacional e de capital:

- alocação de clientes;
- recursos materiais e humanos;
- veículos;
- motoristas e ajudantes;
- sequenciamento das visitas.

Quanto às restrições, deve-se completar a rota com os recursos disponíveis, atendendo a todos os clientes, tempo e capacidade do veículo; obedecer a limites de jornada de trabalho dos motoristas e ajudantes; obedecer à velocidade máxima permitida; obedecer a restrição do tamanho de veículo permitido em vias públicas; obedecer os horários de carga e descarga, etc. A solução para este problema de coleta e distribuição está em encontrar um conjunto de rotas que respeite todas as restrições, minimizando o custo total de transporte e satisfazendo a demanda dos clientes.

Segundo Novaes (2007) há dois métodos de roteirização:

- Método de construção de roteiro;
- Método de melhoria.

Os métodos de construção de roteiro partem de um ou dois pontos e formam o roteiro através do acréscimo paulatino de pontos de distribuição e coleta.

Os métodos de melhoria do roteiro partem da solução obtida com o auxílio de outro método de construção e procuram aperfeiçoar o resultado assim obtido, utilizando, para isso, uma sistemática predefinida. Os dois métodos de melhoria mais utilizados são o 2-opt e o 3-opt. Atualmente, inúmeros métodos de melhoria foram desenvolvidos utilizando as mais diversas técnicas.

Conforme Cunha (1997), com relação ao ambiente de distribuição os problemas reais de roteirização podem ser divididos em dois grupos: roteirização urbana de veículos e roteirização intermunicipal ou interestadual.

Na roteirização urbana de veículos, tanto os pontos de atendimento quanto o centro de distribuição localizam-se na área urbana e os percursos do roteiro ocorrem predominantemente em vias urbanas.

Na roteirização intermunicipal ou interestadual, os atendimentos localizam-se em municípios e estados distintos do centro de distribuição e os percursos do roteiro ocorrem predominantemente em estradas e rodovias.

Em geral, os problemas de roteirização urbana de veículos tendem a ser mais complexos e apresentar maior número de variáveis.

Durante a última década, o número de artigos publicados para lidar com modelos de transporte dinâmico tem sido crescente. O problema de roteirização dinâmica de veículos é um subconjunto desses modelos (LARSEN, 2001).

A roteirização dinâmica de veículos pode ser uma alternativa eficiente para a maioria das aplicações reais, levando-se em consideração que as ocorrências notáveis de trânsito acontecem paralelamente aos roteiros que já estão em andamento, sendo que nem todas as informações relevantes para o planejamento dos roteiros são conhecidas logo no começo da roteirização, as ocorrências notáveis surgem no decorrer do dia, alterando a fluidez do tráfego e interrompendo temporariamente algumas vias (LARSEN, 2001; FERREIRA, 2011).

Com as informações das ocorrências notáveis de trânsito, é possível criar roteiros alternativos, evitando regiões e vias com baixa fluidez durante a realização do roteiro inicialmente planejado.

Nos últimos anos, o número de artigos publicados para lidar com modelos de roteirização dinâmica tem sido crescente (LARSEN, MADSEN e SOLOMON, 2002 e 2007; RADUAN, 2009; NOVAES, FRAZZON e BURIN, 2009; NOVAES e BURIN, 2010).

5. Roteirização Dinâmica de Veículos (RDV)

A Roteirização Dinâmica de Veículos consiste na inclusão e/ou exclusão de trechos do roteiro inicial, mediante informações em tempo real de ocorrências notáveis de trânsito, que interfiram no desempenho do roteiro inicial.

Todas as ocorrências notáveis de trânsito são entradas para a RDV, durante a operação os roteiros estão sujeitos a alterações. Por esse motivo, é essencial a atualização das informações em tempo real (LARSEN, 2001; FERREIRA e SASSI, 2010; NOVAES e BURIN, 2010; FERREIRA, AFFONSO e SASSI, 2011).

Os roteiros estáticos não permitem otimizar todo o percurso do veículo e as regiões urbanas são férteis em ocorrências que influenciam diretamente no tempo e distância de percurso.

Assim, o tempo perdido em congestionamentos, além de aumentar o custo da viagem, proporciona maior queima de combustíveis. Com a roteirização dinâmica de veículos, as entregas continuam a ser realizadas e, após interrupção, o bolsão anteriormente congestionado pode ser atendido normalmente sem que haja prejuízo a todos os pontos de entrega ou coleta.

As Figuras 1, 2 e 3 ilustram passo a passo um exemplo na mudança da rota por ocasião de uma interrupção na via, onde seriam realizadas as entregas e a continuação das entregas em outros pontos já com a rota inicial alterada sem que haja prejuízo aos demais clientes. Assim que a interrupção acaba o veículo retoma as entregas no semi-arco não atendido na rota inicial.

A Figura 1 (A) mostra o trajeto improdutivo até o bolsão de distribuição (linha azul), os pontos a serem atendidos (ponto verde) e a rota inicial programada (linha vermelha).

A Figura 1 (B) mostra a interrupção de parte do trajeto dentro do arco de distribuição programado.

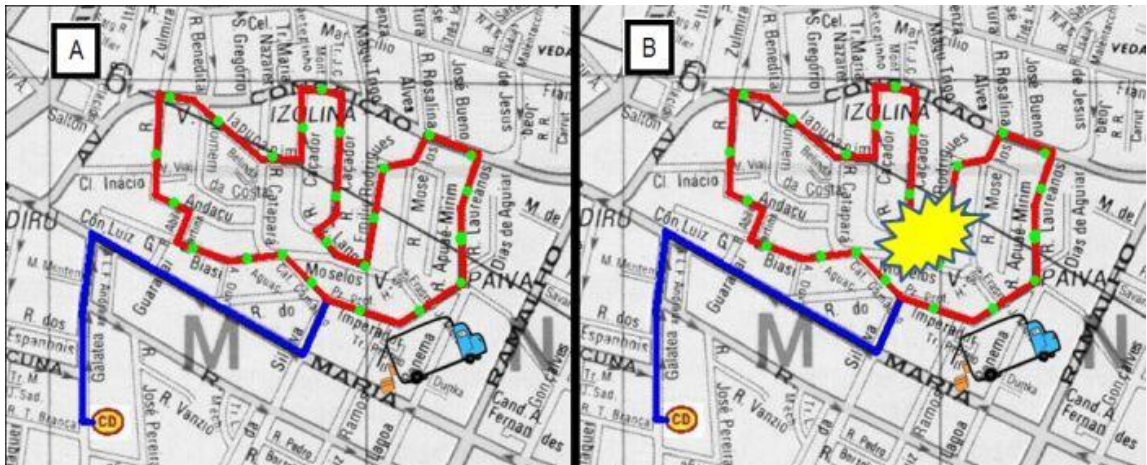


Figura 1 – Bolsão de distribuição (A e B)

A Figura 2 (C) mostra a rota alternativa (linha amarela), possibilitando que as entregas do mesmo bolsão de distribuição continuem sendo efetuadas. A Figura 2 (D) mostra o final da interrupção e os clientes que ainda não foram atendidos.

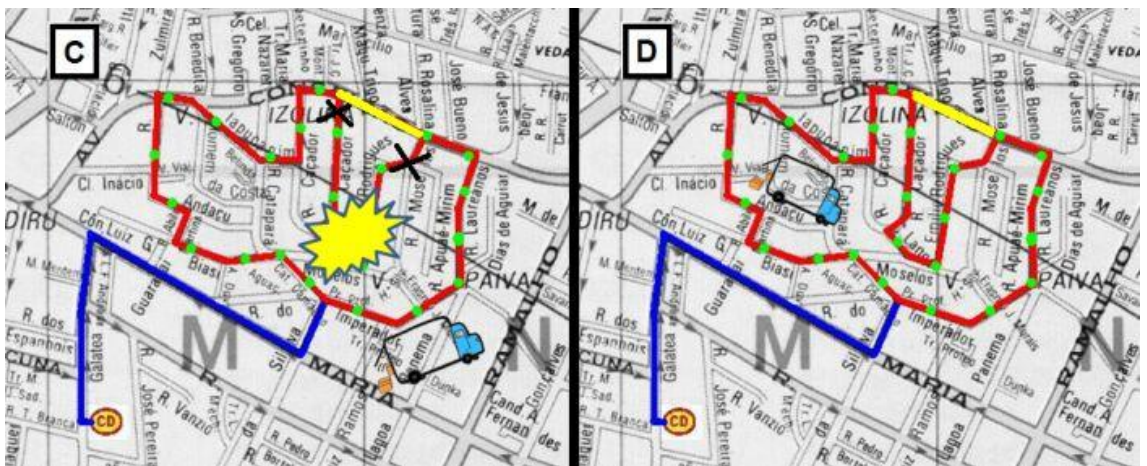


Figura 2 – Bolsão de distribuição (C e D)

A Figura 3 (E) mostra a nova rota alternativa (linha amarela), que atenderá os clientes do semi-arco não atendido na programação inicial.

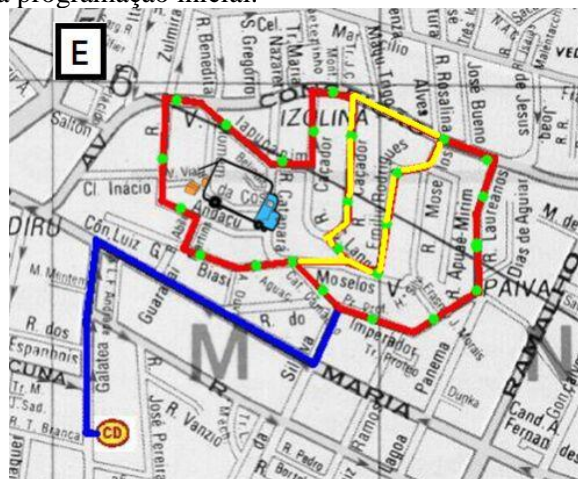


Figura 3 – Bolsão de distribuição (E)

A roteirização dinâmica de veículos representa nesse artigo o nível tático da roteirização.

6. Redes Neurais Artificiais

As Redes Neurais Artificiais são modelos constituídos por unidades de processamento simples, chamados de neurônios artificiais, que calculam funções matemáticas. As Redes Neurais Artificiais são modelos inspirados na estrutura do cérebro tendo como objetivo simular o comportamento humano como: aprendizagem, associação, generalização e abstração (HAYKIN, 2001).

Atualmente, existe grande interesse nos modelos de redes neurais para resolver problemas não convencionais, nos últimos anos às redes neurais artificiais têm surgido como alternativa para inúmeras aplicações.

A seguir serão discutidos os princípios básicos empregados neste artigo sobre Lógica *Fuzzy* e Redes Neuro *Fuzzy*.

6.1 Lógica *Fuzzy*

A Lógica *Fuzzy* ou Lógica Nebulosa foi desenvolvida a partir de 1965 com os trabalhos do professor Zadeh (1965) para representar o conhecimento incerto, impreciso e vago. A Lógica *Fuzzy* é uma teoria matemática, que tem como principal objetivo modelar o raciocínio humano, imitando a habilidade humana de tomar decisões em ambientes de incerteza e de imprecisão, expressa por um conjunto de variáveis linguísticas (GOLDSCHMIDT e PASSOS, 2005; PACHECO e VELLASCO, 2007).

Utiliza-se o conceito de Lógica *Fuzzy* como sendo o ferramental matemático necessário para o tratamento das operações lógicas e algébricas realizadas no universo dos conjuntos *Fuzzy* (PASSINO e YURKOVICH, 1998).

Neste caso, foi utilizada a nomenclatura dos conjuntos *Fuzzy* definindo-os como uma classe de objetos de variáveis contínuas. Tais conjuntos são caracterizados por funções de pertinência, as quais assinalam para cada elemento um grau de pertinência de 0 a 1 (NICOLETTI e CAMARGO, 2004).

6.2 Redes Neuro *fuzzy*

Segundo Goldschmidt e Passos (2005), algumas técnicas podem ser combinadas para gerar os chamados sistemas híbridos ou arquiteturas híbridas. A grande vantagem desse tipo de sistema deve-se ao sinergismo obtido pela combinação de duas ou mais técnicas. Este sinergismo reflete na obtenção de um sistema mais poderoso (em termos de interpretação, de aprendizado, de estimativa de parâmetros, de treinamento, dentre outros) e com menos deficiências.

Uma combinação muito interessante e que em geral dá bons resultados é associar uma RNA com a Lógica *Fuzzy* (AFFONSO, 2010; PACHECO e VELLASCO, 2007; SASSI, 2006). O objetivo desta combinação é obter boa capacidade de aprender e de se adaptar às necessidades para a resolução de problemas do mundo real, ideais para aplicações como: identificação, predição, classificação e controle (RUTKOWSKI, 2008).

Neste artigo, a MLP foi combinada à Lógica *Fuzzy*, formando um sistema híbrido denominado Rede Neuro *Fuzzy* MLP (RNF MLP).

Segundo Nauck *et al.* (1996), o termo RNF é usado para abordagens que apresentam as seguintes propriedades:

- São baseadas em Lógica *Fuzzy* e são treinadas por um algoritmo de aprendizado derivado de uma das RNAs. O procedimento de aprendizado (heurística) opera em informações locais, e causa apenas modificações locais no fundamento da RNF;

- Possuem três camadas onde a primeira camada representa as variáveis de entrada, a camada do meio (escondida) representa as regras de inferência e a terceira camada representa as variáveis de saída;

- Podem ser sempre interpretadas como um mecanismo de inferência. Sendo que, nem todos os modelos especificam procedimentos de aprendizagem para criação de regras *Fuzzy*;

- O procedimento de aprendizagem de uma RNF transforma as propriedades semânticas de um sistema *Fuzzy* em um conjunto de descrições. Isto resulta em restrições que podem tornar-se

modificações aplicáveis aos parâmetros do sistema, entretanto, nem todas as abordagens em uma RNF possuem esta propriedade;

- Aproximam uma função n-dimensional que é parcialmente definida pelo treinamento dos dados.

7. Aplicação de uma Rede Neuro Fuzzy no nível estratégico da roteirização de veículos

A Tabela 1 apresenta os tipos de ocorrências notáveis registradas que foram utilizadas como entradas na Rede Neuro Fuzzy.

Tabela 1 – Ocorrências Notáveis. Fonte: (Adaptado de CET, 2009).

Ocorrências Notáveis	
Ônibus imobilizado na via	Falta de energia elétrica
Caminhão quebrado	Incêndio
Veículo com excesso	Alagamento
Acidente com vítima	Manifestações
Atropelamento	Defeito na rede de trólebus
Incêndio em Veículos	Queda de árvore
Ocorrência envolvendo carga	Semáforo apagado
Ocorrência envolvendo carga perigosa	Semáforo embandeirado

Para modelar as funções de pertinência correspondentes às ocorrências notáveis foram utilizadas funções Gaussianas, conforme mostrado na Equação (1) a seguir:

$$\mu^{\alpha}(x) = e^{-\frac{1}{\sigma}(x-c_{\alpha})^2} \quad (1)$$

Onde:

c_{α} : centro da função Gaussiana

σ_{α} : dispersões da função

α : rótulo lingüístico (alto, médio, baixo)

A figura 4 mostra uma das dezesseis funções de pertinência calculadas pela Equação (1).



Figura 4 – Funções de pertinência (Ônibus imobilizado na via)

O algoritmo de treinamento usado na MLP (*Multilayer perceptrons*) foi o *error*

backpropagation (HAYKIN, 2001) funciona da seguinte maneira: apresenta-se um padrão à camada de entrada da rede, este padrão é processado, camada por camada, até que a saída forneça a resposta processada, f_{MLP} , calculada como mostrado a seguir, na Equação (2). Onde v_l e w_{lj} são pesos sinápticos; b_{l0} e b_0 são os *biases*; e φ a função de ativação.

$$f_{MLP}(x) = \varphi \left(\sum_1^{Non} v_l \cdot \varphi \left(\sum w_{lj} x_l + b_{l0} \right) + b_0 \right) \quad (2)$$

A Figura 5 mostra a resposta da Rede Neuro *Fuzzy* (Yrede) comparados aos informados pela CET (Yreal) durante a semana de 14 a 18 de Dezembro de 2009.

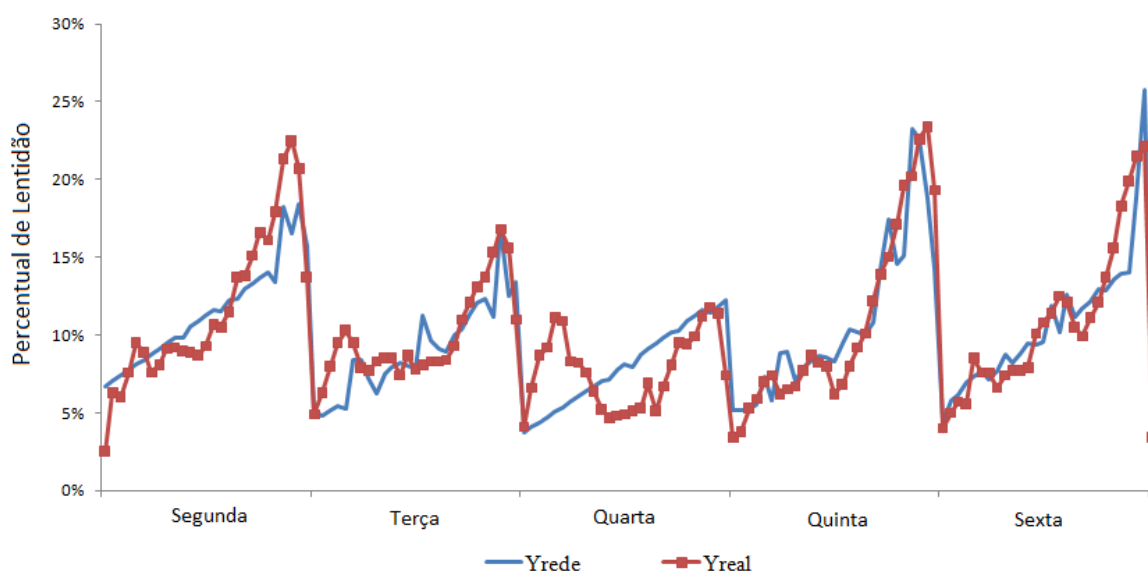


Figura 5 – Resposta da RNF MLP na previsão do comportamento do tráfego durante os dias 14 a 18 de Dezembro de 2009

Com os resultados iniciais observa-se que a rede obteve um bom resultado do problema proposto, podendo apoiar a tomada de decisão quanto às janelas de atendimento que devem ser evitadas e que apresentam comportamento que comprometam a distribuição física. A previsão do comportamento do tráfego (percentual de lentidão) calculado pela Rede Neuro *Fuzzy* representa o nível estratégico da roteirização.

De acordo com Goldberg e Luna (2000), um sistema de roteirização pode ser considerado um conjunto organizado de meios, que objetivam o atendimento de demandas localizadas nos arcos ou vértices de alguma rede de distribuição física, o sistema de roteirização, como qualquer outro sistema operacional, pode ser decomposto em três partes:

- Nível Operacional: neste nível estão os métodos de roteirização de veículos;
- Nível Tático: neste nível está a Roteirização Dinâmica de Veículo, que oferece em tempo real, alternativas que reduzam o tempo improdutivo em trechos interrompidos ou com lentidão acentuada devido alguma ocorrência notável;
- Nível Estratégico: neste nível de roteirização está a previsão do comportamento do tráfego veicular urbano no início do roteiro.

Com os três níveis hierárquicos de roteirização, é possível considerar não apenas os fatores básicos de roteirização, métodos de roteirização, como também os fatores externos, ocorrências relevantes (ocorrências notáveis de trânsito), que influenciam diretamente no nível de fluidez do

tráfego nas grandes cidades. A Figura 6 ilustra a hierarquia proposta para a roteirização apoiada pelos três níveis.

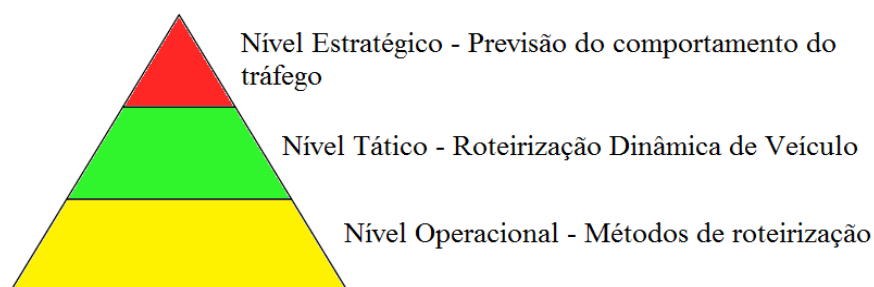


Figura 6 – Hierarquia de roteirização

A previsão do comportamento do tráfego ou percentual de lentidão representa o nível estratégico da roteirização, a roteirização dinâmica de veículos representa o nível tático e os métodos de roteirização o nível operacional.

8. Considerações Finais

Neste artigo o problema de roteirização de veículos urbanos foi abordado por nível de hierarquia tendo como dados principais as ocorrências notáveis de trânsito que servem para o nível estratégico e tático da roteirização conforme propõe o artigo. A aplicação da Rede Neuro *Fuzzy* no nível estratégico apresentou um resultado razoável que motiva novos estudos. A roteirização proposta no nível estratégico e tático pode ser uma excelente alternativa para auxiliar a distribuição física favorecendo a efetividade e produtividade na distribuição e coleta em regiões urbanas como São Paulo. Os desvios inteligentes no nível tático visam à redução do tempo em trânsito, mesmo quando a distância percorrida for um pouco maior, existindo ainda a economia de tempo e combustível, conclui-se que as novas técnicas são decisivas para a criação de alternativas inovadoras de roteirização.

A combinação da Lógica *Fuzzy* e das Redes Neurais Artificiais, conforme proposto neste artigo, mostrou-se bastante interessante para resolução deste tipo de problema, pois a Lógica *Fuzzy* fornece ferramentas matemáticas capazes de capturar ambigüidades associadas ao processo cognitivo humano, e por outro lado as Redes Neurais Artificiais mostraram-se adequadas para identificação de padrões.

A previsão do comportamento do tráfego permite escolher as melhores janelas de atendimento de maneira a evitar horários em que a previsão do tráfego aponte para níveis de lentidão que comprometam o atendimento.

Sugere-se a aplicação da RNF MLP desenvolvida neste artigo em áreas de extrema importância para a vida humana como a Logística da Captação de Múltiplos Órgãos para transplantes, na Logística de Distribuição dos Órgãos para transplantes e na Logística de Material e Medicamento Cirúrgico de Urgência ou Emergência.

Pretende-se também substituir a MLP por uma outra Rede Neural Artificial do tipo *Radial Basis Function* (RBF) na associação com a Lógica *Fuzzy*, chamada RNF RBF, contrastando resultados com a RNF MLP desenvolvida neste artigo.

Agradecimentos

À Universidade Nove de Julho pela bolsa de estudos no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

Ao Professor orientador Dr. Renato José Sassi, por sua incansável dedicação e paciência em compartilhar seu conhecimento durante o curso de Mestrado em Engenharia de Produção.

Referências

- AFFONSO, C.** Aplicação de Redes Neuro *Fuzzy* ao Processamento de Polímeros na Indústria Automotiva. 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade Nove de Julho, Engenharia de Produção, São Paulo. 111 p.
- BALLOU, R. H.** Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: planejamento, organização e logística empresarial. Tradução de Elias Pereira. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.
- BALLOU, R. H.** Logística Empresarial: transportes, administração de materiais e distribuição física. Tradução de Hugo T. Y. Yoshizaki. São Paulo: Atlas, 2011.
- 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.
- BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J.** Logística Empresarial: o processo de integração da cadeia de suprimento. Tradução de Equipe CEL e Adalberto Ferreira Neves. São Paulo: Atlas, 2010.
- CET - Companhia de Engenharia de Tráfego.** Disponível em: <<http://www.cetsp.com.br>>. Acesso em: 21 Abr. 2011.
- CET - Companhia de Engenharia de Tráfego.** Disponível em: <<http://www.cetsp.com.br>>. Acesso em: 14 a 18 Dez. 2009.
- CHOPRA, S.; MEINDL, P.** Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos. Tradução Claudia Freire; revisão técnica Paulo Roberto Leite. – São Paulo: Prentice Hall, 2003.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- FERREIRA, R. P.; AFFONSO, C. O.; SASSI, R. J.** *Dynamic Routing Combined to Forecast the Behavior of Traffic in the City of Sao Paulo Using Neuro Fuzzy Network. Journal of Computer Technology and Application (JCTA)*, v. 2. n.1. p. 36-41, 2011.
- FERREIRA, R. P.; SASSI, R. J.** *A proposal for dynamic routing of vehicles in the city of Sao Paulo using intelligent routing. 3rd International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain. ILS 2010 – Casablanca (Morocco)*, v. 3, p. 1-13, 2010.
- GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L.** Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos. 3.ed. Rio de Janeiro: Campus, 2000.
- GOLDSCHMIDT, R.; PASSOS, E.** *Data mining: um guia prático*, Elsevier, 2005.
- GOMES, C. F. S.; RIBEIRO, P. C. C.** Gestão da Cadeia de Suprimentos Integrada à Tecnologia da Informação. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004.
- HAYKIN, S.** Redes Neurais – Princípios e Práticas. Bookman. 2a edição. Porto Alegre, 2001.
- 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.
- LARSEN, A.; MADSEN, O.; SOLOMON, M.** *Classification of Dynamic Vehicle Routing Systems. In: Zaimpekis, V., Tarantilis, C.D., Giaglis, e G., Minis, I. (eds.) Dynamic Fleet Management. Springer, New York*, 2007.
- LARSEN, A.; MADSEN, O.; SOLOMON, M.** *Partially Dynamic Vehicle Routing-Models and Algorithms. Journal of the Operational Research Society*, v. 53, p. 637-646, 2002.

- LARSEN, A.** *The Dynamic Vehicle Routing Problem. Ph.D. thesis – Technical University of Denmark, Lyngby*, 2001.
- NAUCK, D.; KLAWONN, F.; KRUSE, R.** *Foundations of Neuro Fuzzy Systems*. Willey & Sons, 1996.
- NICOLETTI, M. C.; CAMARGO, H. A.** *Fundamentos da Teoria de Conjuntos Fuzzy*, Edusfscar, 2004.
- NOVAES, A. G.; BURIN, P. J.** Um Problema de Roteirização Dinâmica de Veículos. *Revista Transportes*, 2010.
- NOVAES, A. G.; FRAZZON, E. M.; BURIN, P. J.** *Dynamic Vehicle Routing in Over Congested Urban Areas*, in: LDIC 2009 - *International Conference on Dynamics in Logistics*, Bremen, 2009.
- NOVAES, A. G.** *Logística e Gerenciamento da Cadeia de Distribuição: Estratégia, Operação e Avaliação*. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.
- PACHECO, M. A. C.; VELLASCO, M. M. B. R.** (org) *Sistemas inteligentes de apoio à decisão: análise econômica de projetos de desenvolvimento de campos de petróleo sob incerteza*. Rio de Janeiro: Ed. PUC-Rio: Ed. Interciência, 2007.
- PASSINO, K. M.; YURKOVICH, S.** *Fuzzy Control, Addison Wesley Longman, Inc.* 1998.
- RADUAN, A. C.** Roteirização parcialmente dinâmica aplicada a serviços de campo. 2009. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo. 121 p.
- RUTKOWSKI, L.** *Computational Intelligence – Methods and Techniques. Berlin, Heidelberg: Springer*, 2008.
- SANTOS, A. V. N.; FELIX, L. B.; VIEIRA, J. G. V.** Estudo da logística de distribuição física de um laticínio utilizando lógica *fuzzy*. V – EMEPRO, ENCONTRO MINEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. Viçosa: 2009.
- 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.
- TODAY** *Logistics & Supply Chain*. São Paulo: Cecilia Borges, Ano III, n. 38, 2009.
- ZADEH, L. A.** *Fuzzy Sets, Information and Control*, v.8. p. 338-353, 1965.