

## **ANÁLISE DE CURVAS HORIZONTAIS DE RODOVIAS, PARA MELHORAMENTO DE PROJETO E OPERAÇÃO, UTILIZANDO REDES NEURAIS ARTIFICIAIS**

**Hélio Carlos Madalozo**

Departamento de Eng. Civil, Universidade Estadual de Ponta Grossa

**Andrea Sell Dyminski**

Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná

**Eduardo Parente Ribeiro**

Departamento de Eng. Elétrica, Universidade Federal do Paraná

### **RESUMO**

Neste trabalho, foram desenvolvidos modelos através de redes neurais artificiais, procurando prever a ocorrência de acidentes em curvas horizontais rodoviárias. O conjunto de dados usado para tal tarefa foi extraído de 421 curvas de dois trechos de rodovias federais do interior do Paraná, onde ocorreram 2762 acidentes de trânsito em um período de 5 anos e seis meses. Foram treinadas e testadas redes neurais com diferentes arquiteturas e diversas combinações de entradas, compreendendo informações a respeito da geometria das curvas (raio, ângulo central, desenvolvimento total, comprimento de transição, e superelevação existente), velocidade operacional, volume de tráfego e a condição climática de quando ocorreu cada acidente. Os resultados obtidos pelas redes neurais foram comparados com modelos estatísticos do tipo linear e de Poisson, demonstrando seu bom desempenho.

### **ABSTRACT**

In this work, the models were developed through artificial neural networks, aiming to foresee the occurrence of accidents in highway horizontal curves. The gathered data was extracted from 421 curves in two sections of federal highways, and includes 2762 traffic accidents within a period of five years and six months. Several networks with different architectures and several combinations of inputs were trained and tested. These input variables were related to the geometry of the curves (radius, central angle, total development, transition length, and real superelevation), operational speed, traffic flow and the weather conditions when each accident happened. The results obtained by the neural networks were compared with linear and Poisson statistical models, demonstrating their good performance.

### **1. INTRODUÇÃO**

A redução do número de acidentes de trânsito em rodovias deve ser considerada uma meta constante do governo, órgãos rodoviários e da sociedade. O número de acidentes numa rodovia é relacionado com o comportamento e desempenho dos motoristas, que por sua vez é influenciado por fatores humanos, características físicas da via, tráfego, veículos e fatores ambientais (Santos, 1998).

Muitos estudos têm sido desenvolvidos para investigar a relação entre o projeto geométrico de rodovias e a ocorrência de acidentes. Nestes estudos, geralmente são utilizados modelos matemáticos para a previsão de acidentes. Porém, a grande dificuldade na construção de um modelo é justamente a escolha da metodologia adequada para tal, pois mesmo com a correta calibração dos parâmetros livres do mesmo, não é possível estabelecer uma relação precisa entre as variáveis consideradas no modelo matemático. Ainda existe a possibilidade de que variáveis importantes e a maneira pela qual encontram-se correlacionadas não tenham sido consideradas, dificultando ainda mais a tarefa de se chegar a uma modelagem ideal para este caso.

Tendo-se em vista os fatos descritos anteriormente, neste trabalho é apresentado um modelo matemático obtido através de redes neurais, para prever o número de acidentes em curvas horizontais, onde foram utilizadas informações sobre dois trechos rodoviários do estado do Paraná. A opção pelo estudo de curvas decorreu pelo fato de que as mesmas são os elementos

geométricos de rodovias que apresentam a maior probabilidade de ocorrência de acidentes, conforme pode-se observar no item 2., na sequência deste trabalho.

## **2. ACIDENTES EM RODOVIAS**

Normalmente concorda-se que acidentes de trânsito são eventos complexos que geralmente envolvem a interação de muitos fatores contribuintes. Diversos autores citam como fatores que influem na ocorrência de acidentes as características e geometria da via, o meio ambiente, as condições do tempo e de iluminação, o tráfego, fatores humanos e as condições do veículo (Gold, 2002; Miaou e Lum, 1993; Nogueira, 1995; Santos, 1998; Vogt e Bared, 1997). Enfatizando-se apenas o que diz respeito a características da rodovia propriamente dita, os elementos que contribuem de forma mais significativa para a ocorrência de acidentes são: largura da pista de rolamento, raio e grau das curvas horizontais, extensão e declividade das rampas, distância de visibilidade, volume de tráfego, velocidade de projeto, taludes laterais, pontes (principalmente a largura), características do canteiro central, zonas de escape (área lateral adjacente à pista e acostamento) (Santos, 1998).

Os elementos geométricos de uma rodovia que podem ser associados com o número de acidentes são normalmente referentes às variáveis do traçado em planta, em perfil ou da seção transversal. A curva pode ser considerada um ponto chave no traçado da rodovia, pois a ocorrência de acidentes na mesma, em geral, é bem maior do que em trechos retos. Em seus estudos, Glennon *et al.* (1985) *apud* Zegeer *et al.* (1992), afirmam que a taxa de acidentes em curvas é de 1,5 a 4 vezes maior que a taxa de acidentes nas tangentes similares. Para rodovias rurais americanas, Lamm *et al.* (1992) *apud* Gibreel *et al.* (1999), estimaram que mais de 50% dos acidentes ocorrem em seções curvas, que representam as regiões mais críticas das rodovias rurais quando se analisa a segurança. Brinkman (1984) *apud* Choueiri *et al.* (1994), também observou que a probabilidade de ocorrência de acidentes em rodovias rurais de duas faixas nos EUA é maior nas curvas horizontais, interseções e nas pontes. Pérez Pérez (2002) concluiu que a variável geométrica mais significativa do ponto de vista da segurança viária é o grau da curva.

A velocidade dos veículos também é um elemento fundamental na determinação de outras características de projeto. O raio mínimo de curvas horizontais, a superelevação, a superlargura e as distâncias de visibilidade, por exemplo, dependem da velocidade, além de outras variáveis. A velocidade de projeto e a velocidade operacional dos veículos foram usadas por Lamm *et al.* (1995) e por Santos (1998) na aplicação do método módulo de segurança para a determinação da consistência de rodovias.

O método módulo de segurança prevê a análise da rodovia sob os três critérios: verificação da uniformidade das velocidades operacionais dos veículos, verificação da harmonia entre as velocidades de projeto e operacional dos veículos e verificação da taxa de variação da curvatura (TVC) da rodovia em conjunto com a diferença entre o coeficiente de atrito definido e esperado nas curvas. A partir dessas três classificações prévias, é definida a avaliação final da consistência, que pode ser: geometria “boa”, “razoável” ou “ruim”. Glennon & Harwood (1978) *apud* Santos (1992), definem consistência de uma rodovia como “o grau de concordância e compatibilidade entre os elementos da geometria da rodovia com as solicitações físicas necessárias ao controle dos veículos, do ponto de vista da habilidade requerida dos motoristas ao dirigir e controlar o veículo”.

### 3. PREVISÃO DE ACIDENTES RODOVIÁRIOS ATRAVÉS DE MODELOS MATEMÁTICOS

A análise de acidentes pode ser feita através de modelos matemáticos tradicionalmente desenvolvidos com auxílio da estatística, desde a técnica de regressão pelo método dos mínimos quadrados até a técnica de modelagem baseada em distribuições de probabilidades. Os modelos resultantes normalmente são múltiplos, tendo-se em vista que muitas variáveis influem no número de acidentes.

Dentre os modelos estatísticos desenvolvidos com o intuito de se prever o número de acidentes em rodovias, podem ser citados os trabalhos de Golias (1992), Benekohal e Hashmi (1992), Miaou e Lum (1993) e Pérez Pérez (2002). Modelos lineares generalizados foram propostos por Mountain *et al.* (1996) e Greibe (2003). Zegeer *et al.* (1992) estudaram os acidentes em 10900 curvas horizontais e os relacionaram com a geometria da curva, volume de tráfego e variáveis da faixa de domínio, através de modelagem estatística com múltiplas variáveis. Com isso, propuseram melhoramentos, principalmente em curvas horizontais, com os quais determinaram a redução da taxa de acidentes.

A regressão baseada em árvore hierárquica (HTBR) é um método de análise não paramétrica de dados e foi adotada por Karlaftis e Golias (2002), para estudar os efeitos da geometria da rodovia e do volume de tráfego nas taxas de acidentes de rodovias rurais e suas previsões. Concluiu-se que o fator mais significativo para elevar a taxa de acidentes é o volume de tráfego. Segundo os autores, os dois maiores fatores, subseqüentes ao volume de tráfego, que influem na taxa de acidentes são o projeto geométrico e as condições do pavimento.

O modelo binomial negativo, em suas formas clássica e estendida, foi utilizado para estudar a frequência de acidentes em rodovias por Shankar *et al.* (1995), Vogt e Bared (1997) e Abdel-Aty e Radwan (2000).

Mais recentemente, pode ser citada também a previsão de incidentes e de acidentes em rodovias através de modelos baseados em redes neurais artificiais (RNA's ou RN's). Estudos quanto à ocorrência de incidentes rodoviários, utilizando abordagem com redes neurais, foram desenvolvidos por Abdulhai e Ritchie (1999) e Adeli e Karim (2000). Já Awad e Janson (1997) usaram três tipos diferentes de modelagem com RN's para explicar acidentes com caminhões em acessos de interseções a auto-estradas, no Estado de Washington, EUA.

### 4. MODELAGEM PROPOSTA

Para o desenvolvimento dos modelos de previsão de acidentes em curvas rodoviárias utilizando a técnica de redes neurais, propostos neste trabalho, foram realizadas diversas etapas: coleta de informações sobre o problema em estudo, treinamento e teste de RN's com diferentes configurações e comparação do desempenho do modelo neural adotado com modelos estatísticos linear e de Poisson.

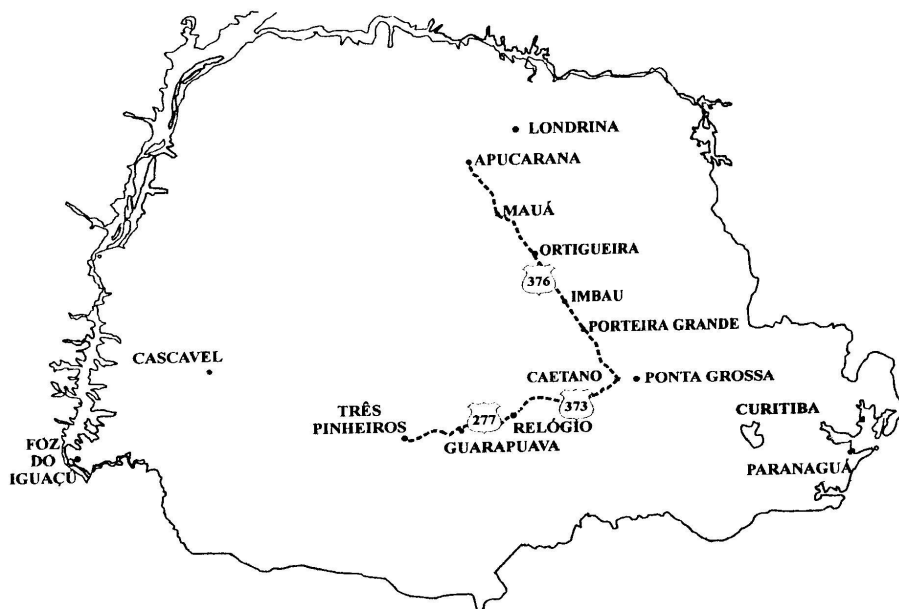
#### 4.1. Conjunto de dados

Foram escolhidos para este estudo dois segmentos de rodovias federais de pista simples. Destes trechos, foram utilizadas as curvas horizontais circulares simples e circulares com transição e os acidentes nelas ocorridos. O primeiro segmento é a BR-376, trecho Apucarana – Caetano, e o segundo segmento é a BR-277, trecho Relógio – Três Pinheiros. Estes trechos das duas rodovias são de classe I-B. Porém, a BR-376, entre Apucarana e Ortigueira, foi

duplicada na região denominada Serra do Cadeado, em uma extensão de 12,5 km, envolvendo 25 curvas existentes, entre janeiro de 2001 a novembro de 2001. Estas 25 curvas foram mantidas no conjunto pesquisado porque os dados de acidentes utilizados foram da época em que a pista era simples.

A Figura 1 mostra um mapa do estado do Paraná com a localização dos trechos de rodovias e cidades envolvidas neste trabalho. A Tabela 1 apresenta um resumo dos trechos estudados com extensão, número de curvas e de acidentes, órgão responsável pelo policiamento e a empresa concessionária administradora de cada trecho.

Os dados de acidentes em curvas foram coletados no intervalo de tempo entre 1º de janeiro de 1997 até 30 de junho de 2002 (cinco anos e meio), com exceção para as 25 curvas do trecho duplicado, das quais foram utilizados dados de acidentes somente até dezembro de 2000, visto que após esta data foi iniciada a duplicação.



**Figura 1:** Localização dos trechos estudados e cidades

Para cada acidente atendido, a Polícia Rodoviária Federal (PRF) ou a Polícia Rodoviária Estadual (PRE), responsável pelo trecho, elabora um boletim de ocorrência (BO), que é um documento interno e não deve ser retirado do órgão policial onde foi confeccionado. Para possibilitar a utilização dos dados de acidentes neste trabalho, o conteúdo dos 2762 BO's (2762 acidentes) foram transcritos para planilhas eletrônicas.

**Tabela 1: Resumo dos trechos estudados**

Rodo- via	Trecho	Extensão (km)	Nº de curvas	Nº de acidentes	Policiamento	Conces- sionária
BR-376	Apucarana- Ortigueira	105,9	166	835	PRE (Londrina)	Rodonorte
BR-376	Ortigueira- Caetano	124,9	178	1637	PRE (P. Grossa)	Rodonorte
BR-277	Relógio- Guarapuava	45,95	56	194	PRF (P. Grossa)	Caminhos do Paraná
BR-277	Guarapuava-Três Pinheiros	54,95	21	96	PRF (P. Grossa)	Rodovia das Cataratas
Totais		331,7	421	2762		

As características geométricas das curvas como raio, ângulo central, desenvolvimento e ângulo central foram obtidas no Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (DNIT), através de consulta aos projetos geométricos correspondentes a cada trecho. O grau de cada curva foi calculado para a corda correspondente de 20 metros. A superelevação existente foi medida em cada curva no trecho, e os volumes de tráfego foram obtidos dos dados dos postos de pedágio das rodovias ou de levantamentos feitos pelas próprias concessionárias que administram estas rodovias ou pelas empresas que fornecem consultoria às concessionárias.

#### 4.2. Redes neurais utilizadas

As redes neurais têm um potencial de aplicação muito vasto na área de transportes, como por exemplo: em estudos de comportamento de motoristas de veículos autônomos, estimação de parâmetros em pesquisas de fluxo de tráfego, manutenção de pavimentos, classificação/detecção de veículos, análise de modelos de tráfego, operações de frete, previsão de tráfego, política e economia de transporte, transporte aéreo, transporte marítimo, veículos submarinos, operação de metrô e controle de tráfego (Dougherty, 1995).

Neste trabalho, as RN's utilizadas foram do tipo multicamadas *feedforward* (MLF), com várias arquiteturas, com diferentes configurações de camadas escondidas de neurônios e diversas combinações de parâmetros de entrada.

Cada tipo de rede foi inicialmente classificado quanto ao número de parâmetros de entrada, que variava de 4 a 8. Apesar de se dispor de muitas informações a respeito de cada curva considerada neste estudo, somente alguns aspectos foram analisados nos modelos aqui propostos, dando-se especial atenção aos referentes ao projeto geométrico de curvas rodoviárias. Além da geometria da curva, a condição geral de tráfego da rodovia e a condição climática de ocorrência de acidentes também foram consideradas. As variáveis utilizadas como entradas das redes foram: raio (R), ângulo central (AC), desenvolvimento total da curva (D), comprimento de transição ( $l_c$ ), velocidade operacional ( $V_{85}$ ), superelevação existente (e), volume médio diário anual de tráfego misto (VMD), e as condições do tempo (CT) por ocasião dos acidentes nela registrados. Para as curvas circulares simples, a entrada  $l_c$  era registrada com valor zero. Nas condições do tempo foi adotado o valor +1 para representar tempo bom, e -1 para representar chuva, neblina, nublado ou temporal. A condição nublado

foi incluída no grupo -1 devido ao fato de não ser considerada condição climática boa, nos BO's das polícias rodoviárias Federal e Estadual. A Tabela 2 apresenta os tipos de redes segundo o número de entradas, com as respectivas variáveis de entrada marcadas por "X".

**Tabela 2:** Tipos de redes neurais e entradas adotadas

Nº de entradas das redes	Variáveis de entrada							
	R	AC	D	lc	V <sub>85</sub>	e	VMD	CT
4E	X	X			X			X
5E	X	X			X	X		X
6E	X	X			X	X	X	X
7E	X	X		X	X	X	X	X
8E	X	X	X	X	X	X	X	X

Como saída das redes, foi adotado o número de acidentes ocorridos em cada curva durante o período analisado (cinco anos e meio), na condição de tempo +1 e na condição de tempo -1, resultando num total de 842 casos (de 421 curvas) para cada rede experimentada.

O conjunto de dados foi dividido em dois subconjuntos: um conjunto de treinamento e um conjunto de teste, de forma que não apresentassem elementos em comum. O conjunto de treinamento foi composto por dados de 318 curvas (636 casos), incluindo aí as curvas que apresentaram os valores máximos e mínimos das variáveis e pela reunião de 3 em cada 4 curvas do conjunto de dados restante, ou seja, isento dos máximos e mínimos. O conjunto de teste foi formado pelas 103 curvas (206 casos) restantes no conjunto de dados, após ter sido retirado deste, o conjunto de treinamento.

As redes treinadas e testadas apresentavam uma, duas, ou três camadas ocultas, com número de neurônios variando de 1 a 18 nas redes de uma camada oculta, de 1 a 17 nas redes de duas camadas ocultas e de 1 a 11 nas redes de três camadas ocultas. Nos neurônios das camadas ocultas de todas as redes foi adotada função de ativação sigmoidal (*tansig*). A camada de saída de todas as redes foi composta por apenas um neurônio, apresentando função de ativação linear (*purelin*) ou sigmoidal (*tansig*).

#### 4.2.1 Treinamento das RNAs

A implementação das RN's foi realizada com auxílio do programa computacional Matlab versão 6.5, onde o treinamento das redes foi feito através do algoritmo de Levenberg-Marquadt (LM), que pode ser considerado uma otimização do algoritmo de *back-propagation*, sendo, em geral, mais eficiente que este último. O treinamento das redes foi do tipo supervisionado, adotando-se o número de 50 iterações de treinamento para metade das redes consideradas no estudo, e 100 iterações para a outra metade.

A previsão do número de acidentes pode ocorrer acima ou abaixo do valor esperado (real) devido ao erro intrínseco de cada modelo. As redes que apresentam o neurônio da camada de saída com função de ativação *purelin* podem, eventualmente, produzir resultados negativos. Para evitar essa incoerência de resultados, um artifício denominado de *clip* foi introduzido nessas redes através do programa computacional Matlab, cuja função foi automaticamente igualar a zero toda saída negativa. As redes com o neurônio da camada de saída com função *tansig*, não apresentam esse inconveniente.

Considerando o número de variáveis de entrada, o número de camadas ocultas, o número e função de ativação dos neurônios, e o número de iterações para o treinamento, foram experimentadas 438 diferentes configurações de redes.

### 4.3. Modelos estatísticos

Através do programa computacional Matlab 6.5, foram implementados dez modelos estatísticos tradicionais, para a previsão do número de acidentes nas curvas rodoviárias analisadas, sendo cinco lineares múltiplos e cinco de Poisson. As variáveis independentes adotadas em cada um destes modelos foram as mesmas utilizadas nas modelagens por redes neurais, ou seja, de 4 a 8 entradas, para que se pudesse fazer uma posterior comparação do desempenho das RN's com os modelos estatísticos. Pelo mesmo motivo, os dados dos conjuntos de treinamento e de teste foram mantidos inalterados. Conforme o número de entradas variando de 4 até 8, os modelos lineares múltiplos foram denominados de L4E, L5E, L6E, L7E e L8E; e os modelos de Poisson, de P4E, P5E, P6E, P7E e P8E.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Modelos de redes neurais

O desempenho das redes foi avaliado através da raiz quadrada do erro médio quadrático (*rmse*) de treinamento e de teste. Como as redes foram treinadas com os dados de entrada e saída normalizados para a faixa de intervalo -1 e 1, o erro médio quadrático (*mse*) foi dividido por 2 e o resultado, após a extração da raiz quadrada, foi multiplicado por 100, para se obter o valor percentual. Desta forma, o *rmse* representa a porcentagem de erro em relação à escala de acidentes cujos limites do intervalo de variação são o valor mínimo 0 e o valor máximo 45 acidentes, que ocorreu dentre os casos do conjunto de treinamento.

A Tabela 3 mostra os valores de erros *rmse* de três redes neurais que foram consideradas de melhor desempenho por apresentarem os menores erros, tanto de teste como de treinamento.

**Tabela 3:** Erros *rmse* das melhores redes

Rede	Nº de entradas	Nº de camadas escondidas	Nº de neurônios na camada escondida	Nº de iterações no treinamento	<i>rmse</i> (%)	
					Treinamento	Teste
4Ec5-5n50	4	2	5	50	9,95	9,83
6Et7n50	6	1	7	50	8,05	8,83
8Et5n100	8	1	5	100	9,02	8,24

Dividindo-se o erro percentual em faixas, foi determinada para as redes 4Ec5-5n50, 6Et7n50 e 8Et5n100, a frequência de casos por faixa de erro, tanto para treinamento como para teste. Os resultados para os conjuntos de treinamento e de teste são mostrados nas Tabelas 4 e 5 respectivamente, onde se pode verificar que nestas três redes, a frequência de casos com erro até 5% é maior que 62% para treinamento e maior que 55% para teste. E a frequência de casos com erro até 10% é maior que 87% para treinamento e maior que 80% para teste.

**Tabela 4:** Ocorrência de casos por faixa de erro no conjunto de treinamento das redes

Rede Erro de trein.	4Ec5-5n50		6Et7n50		8Et5n100	
	Nº de casos	%	Nº de casos	%	Nº de casos	%
0% a 5%	396	62,3	448	70,4	428	67,3
>5% a 10%	162	25,5	124	19,5	139	21,9
>10% a 20%	46	7,2	27	4,3	42	6,6
>20% a 50%	30	4,7	32	5,0	23	3,6
>50%	2	0,3	5	0,8	4	0,6
Total	636	100	636	100	636	100

**Tabela 5:** Ocorrência de casos por faixa de erro no conjunto de teste das redes

Rede Erro de teste	4Ec5-5n50		6Et7n50		8Et5n100	
	Nº de casos	%	Nº de casos	%	Nº de casos	%
0% a 5%	114	55,3	126	61,2	122	59,2
>5% a 10%	57	27,7	40	19,4	51	24,8
>10% a 20%	24	11,7	23	11,2	28	13,6
>20% a 50%	11	5,3	14	6,8	5	2,4
>50%	0	0	3	1,4	0	0
Total	206	100	206	100	206	100

## 5.2. Modelos estatísticos

O desempenho dos modelos estatísticos foi verificado através do valor do *rmse*, para facilitar a comparação com os modelos obtidos por RN's. Para o desenvolvimento dos modelos estatísticos deste trabalho, foi utilizado o mesmo conjunto de treinamento das RN's. Em seguida, o mesmo conjunto de teste das RN's foi utilizado para testar os modelos estatísticos obtidos. A Tabela 6 apresenta os *rmse*'s dos modelos obtidos por regressão linear e de Poisson, com 4, 5, 6, 7 e 8 entradas, que correspondem às mesmas variáveis utilizadas para as RN's já descritas anteriormente. Os valores dos *rmse*'s de todos os modelos constantes na Tabela 6 ficaram próximos uns dos outros, porém com pequena vantagem para os modelos com um número maior de variáveis de entrada.

**Tabela 6:** Erros *rmse* dos modelos estatísticos

Número de entradas	<i>rmse</i> (%)			
	Modelo linear		Modelo de Poisson	
	Treinamento	Teste	Treinamento	Teste
4E	10,75	9,91	10,82	9,95
5E	10,75	9,91	10,82	9,95
6E	10,41	9,23	10,21	8,99
7E	10,41	9,22	10,21	8,99
8E	10,41	9,22	10,21	8,99

Dividindo-se o erro percentual em faixas, foi determinado para o modelo linear de 8 entradas (L8E) e para o modelo de Poisson de 8 entradas (P8E), a frequência de casos por faixa de erro, tanto para o conjunto de treinamento como para o de teste. Os resultados do conjunto de treinamento e de teste são mostrados nas Tabelas 7 e 8 respectivamente, onde se pode verificar que nestes dois modelos, a frequência de casos com erro até 5% é maior que 54% para treinamento e maior que 49% para teste. E a frequência de casos com erro até 10% é maior que 86% para treinamento e maior que 84% para teste.



**Tabela 7:** Ocorrência de casos por faixa de erro no conjunto de treinamento dos modelos estatísticos

Modelo Erro de trein.	L8E		P8E	
	Nº de casos	%	Nº de casos	%
0% a 5%	347	54,6	390	61,3
>5% a 10%	208	32,7	158	24,8
>10% a 20%	51	8,0	55	8,7
>20% a 50%	25	3,9	28	4,4
>50%	5	0,8	5	0,8
Total	636	100	636	100

**Tabela 8:** Ocorrência de casos por faixa de erro no conjunto de teste dos modelos estatísticos

Modelo Erro de teste	L8E		P8E	
	Nº de casos	%	Nº de casos	%
0% a 5%	101	49,0	114	55,3
>5% a 10%	72	35,0	61	29,6
>10% a 20%	26	12,6	24	11,7
>20% a 50%	7	3,4	7	3,4
>50%	0	0	0	0
Total	206	100	206	100

### 5.3. Comparação de desempenho dos modelos

Foram utilizadas 438 arquiteturas de redes neurais, 5 modelos de regressão linear e 5 modelos de Poisson para a previsão do número de acidentes em curvas horizontais. Conforme os valores dos *rmse*'s das redes de melhor desempenho apresentados na Tabela 3 e pelos *rmse*'s dos modelos estatísticos apresentados na Tabela 6, pode-se comparar o desempenho destes modelos. Observa-se que todas as redes da Tabela 3 estão com *rmse* de treinamento e de teste menores do que os correspondentes *rmse*'s dos modelos estatísticos linear e de Poisson, com qualquer número de entradas.

Além do *rmse*, que se refere ao erro médio do modelo, a determinação da frequência de casos por faixa de erro percentual de cada modelo também indica o desempenho do mesmo. Evidentemente, é preferível uma maior a frequência de casos em que esse erro é menor e menor frequência de casos em que esse erro é maior. As redes 4Ec5-5n50, 6Et7n50 e 8Et5n100 são exemplos de modelos de RN's que superaram os modelos estatísticos lineares e de Poisson de 8 entradas (L8E e P8E). Conforme as Tabelas 4, 5, 7 e 8, observa-se que a frequência de casos com erro até 5%, tanto para o conjunto de treinamento como para o conjunto de teste destas três redes é superior à frequência correspondente dos modelos L8E e P8E. Prosseguindo com esta comparação para a faixa de erro entre 0 e 10%, as três redes superam os dois modelos estatísticos quanto ao conjunto de treinamento, mas são inferiores quanto ao conjunto de teste.

## 6. MELHORIAS NA SEGURANÇA DE PROJETOS DE CURVAS HORIZONTAIS DE RODOVIAS

As características geométricas de curvas horizontais deveriam ser melhoradas quando o número de acidentes previstos através de um modelo supera um determinado limite, mesmo antes de se conhecer o futuro número real de acidentes. Para curvas horizontais em fase de projeto, basta que se escolham parâmetros geométricos de curvas que resultem em um número de acidentes previstos pelo modelo adotado, menor do que um acidente por ano (Mak *et al.*, 1988 *apud* Nogueira, 1995; Setti, 1985 *apud* Nogueira, 1995), ou seja, nos modelos

desenvolvidos neste trabalho, menor do que 5,5 acidentes. No caso de curvas horizontais existentes, pode-se trabalhar com a previsão do número de acidentes, tal como na fase de projeto.

A utilização de um dos modelos desenvolvido por RN's para melhorar a segurança de curvas em operação pode ser exemplificado pela curva número 282, que pertence ao conjunto de dados de teste e apresenta elevado número de acidentes. A Tabela 9 mostra as características originais da curva e de quatro alterações feitas em seus parâmetros. A Tabela 10 mostra o número real de acidentes ocorridos na curva e as previsões feitas pela rede 8Et5n100, para a situação original e para as quatro alterações da curva.

**Tabela 9: Parâmetros da curva 282**

Curva 282 Parâmetros	Alteração				
	Curva original	1ª	2ª	3ª	4ª
Raio (m)	229,25	229,25	286,479	327,404	381,972
Ângulo central (°)	65,8	65,8	65,8	65,8	65,8
Desenvolvimento (m)	343,45	343,45	429,52	541,27	618,98
Comprimento de transição (m)	80	80	100	110	120
Velocidade operacional (km/h)	82,19	82,19	84,81	86,11	87,42
Superelevação (%)	6,50	9,93	9,29	8,71	7,97
VMD (v/d)	4758	4758	4758	4758	4758

**Tabela 10: Número previsto de acidentes para a curva 282**

Rede 8Et5n100 Cond. de tempo	Nº real de acidentes	Número previsto de acidentes				
		Curva Original	1ª	2ª	3ª	4ª
+1	10	6,10	7,25	3,52	3,06	3,06
-1	20	18,33	18,31	13,58	9,33	9,33

Analisando os resultados constantes na Tabela 10, pode-se observar que na condição de tempo -1, a previsão do número de acidentes foi diminuindo à medida que se foi melhorando as características da geometria da curva, até a terceira alteração. Na condição de tempo +1, houve um acréscimo não esperado no número previsto de acidentes, da situação original para a primeira modificação. Porém, comparando o número real de acidentes (situação original da curva) com o número previsto de acidentes para a primeira alteração, observa-se que houve uma esperada redução do número de acidentes. Ainda na condição de tempo +1, a partir da primeira alteração e à medida que as características da geometria da curva foram melhoradas, obteve-se a esperada redução no número previsto de acidentes, até a terceira alteração. Nas duas condições de tempo (+1 e -1), os números previstos de acidentes se mantiveram constantes da terceira para a quarta alteração da curva 282. Pode-se concluir que o acréscimo do raio, e conseqüente modificação das características que dependem do raio, feitos na quarta alteração da curva, não provocaram melhoria na sua segurança.

## 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Através deste trabalho, conclui-se que a técnica de redes neurais pode ser utilizada com relativo sucesso na previsão do número de acidentes em curvas horizontais de rodovias. Os erros de treinamento e de teste de generalização das redes de melhor desempenho ficaram em patamares aceitáveis (menores que 10%) na grande maioria dos casos (acima de 80%). Os modelos estatísticos desenvolvidos neste trabalho apresentaram erros um pouco superiores

aos erros das redes, porém a frequência de casos com menores erros foi inferior nos modelos estatísticos.

Os modelos aqui desenvolvidos por RN's poderão ser bastante úteis tanto na fase de projeto de curvas rodoviárias, onde os parâmetros geométricos poderão ser adequadamente ajustados, quanto na fase de operação e manutenção de rodovias, onde correções de geometria poderão ser realizadas, sempre visando a diminuição do número potencial de acidentes da curva analisada, ou seja, melhorando sua segurança.

É fundamental para o bom desenvolvimento de estudos de acidentes em rodovias, dispor-se de dados adequados, precisos e em grande quantidade, tanto da rodovia como dos acidentes. Portanto, é recomendável que haja uma consciência dos órgãos responsáveis sobre a importância da precisão dos dados de acidentes e da padronização nacional dos boletins de ocorrência de acidentes, para a sua utilização em estudos de previsão de acidentes em rodovias. Se as informações sobre acidentes forem armazenadas eletronicamente em banco de dados, tomando-se o cuidado de se uniformizar a localização de cada acidente (usando um GPS, por exemplo), certamente haverá uma disponibilidade maior de opções de sua utilização, tanto em tipo de informação, que contribuirá com mais variáveis de entrada para o modelo, quanto à quantidade e qualidade de informações.

#### **Agradecimentos**

A realização deste trabalho só foi possível graças à colaboração de Órgãos e Empresas que forneceram os dados técnicos das curvas e os dados de acidentes, e a permissão de uso dos computadores para o treinamento das redes, que agradecemos e citamos a seguir: Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes, Delegacia 7/3 da Polícia Rodoviária Federal, 2ª Companhia de Polícia Rodoviária Estadual, 5ª Companhia de Polícia Rodoviária Estadual, Centro de Estudos de Engenharia Civil (CESEC-UFPR), Rodonorte, Caminhos do Paraná, Rodovia das Cataratas, Consórcio Vega Conspe, Dalcon Engenharia de Consultoria Ltda. Também agradecemos ao graduando Marcelo Miquelto (do CESEC) e aos colegas do DNIT e do extinto DNER, que colaboraram na seleção e classificação prévia dos dados e preenchimento das planilhas.

#### **REFERÊNCIAS**

- Abdulhai, B. e Ritchie, S. G. (1999) Enhancing the universality and transferability of freeway incident detection using a bayesian-based neural network. *Transportation Research*. Part C, v.7, p.261-280.
- Abdel-Aty, M. A. e Radwan, A. E. (2000) Modeling traffic accident occurrence and involvement. *Accident Analysis and Prevention*. v.32, p.633-642.
- Adeli, H. e Karim, A. (2000) Fuzzy-wavelet RBFNN model for freeway incident detection. *Journal of Transportation Engineering*, v.126, n.6, p.464-471.
- Awad, W. H. e Janson, B. N. (1997) Prediction models for truck accidents at freeway ramps in Washington State using regression and artificial intelligence techniques. *Transportation Research Record*, 1635, p.30-36.
- Benekohal, R. F. e Hashmi, A. M. (1992) Procedures for estimating accident reductions on two-lane highways. *Journal of Transportation Engineering, ASCE*, v.118, n.1, p.111-129.
- Choueiri, E. M.; Lamm R.; Kloeckner J. H. e Mailaender T. (1994) Safety aspects of individual design and their interactions on two-lane highways: international perspective. *Transportation Research Record*, 1445, p.34-46.
- Dougherty, M. S. (1995) A review of neural networks applied to transport. *Transportation Research C*, v.3, n.4, p.247-260.
- Gibriel, G. M.; Easa S. M.; Hassan Y. e El-Dimeery I. A. (1999) State of art of highway geometric design consistency. *Journal of Transportation Engineering*, v.125, n.4, p.305-313.
- Gold, P. A. (2002) Segurança rodoviária. In: *SIMPÓSIO SOBRE OBRAS RODOVIÁRIAS, 2., 2002, São Paulo. Anais...* São Paulo: ABGE. p.7-11.
- Golias, J. C. (1992) Establishing relationship between accidents and flows at urban priority road junctions. *Accid. Anal. & Prev.* v.24, n.6, p.689-694.
- Greibe, P. (2003) Accident prediction models for urban roads. *Accidents Analysis and Prevention*, v.35, p.273-285.

- Karlaftis, M. G.; Golias, I. (2002) Effects of road geometry and traffic volumes on rural roadway accident rates. *Accident Analysis and Prevention*, v.34, p.357-365.
- Lamm, R. ; Guenther, A. K. e Choueiri, E. M. (1995) Safety module for highway geometric design. *Transportation Research Record*, 1512, p.7-15.
- Miaou, S. e Lum, H. (1993) Modeling vehicle accidents and highway geometric design relationships. *Accident Analysis and Prevention*. v.25, n.6, p.689-709.
- Mountain, L.; Fawaz, B. e Jarret, D. (1996) Accident prediction models for roads with minor junctions. *Accident Analysis and Prevention*. v.28, n.6, p.695-707.
- Nogueira, A. A. R. (1995) *Análise da relação da geometria de rodovias e acidentes envolvendo veículos de carga*. São Carlos. 101f. Dissertação (Mestrado em Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos.
- Pérez Pérez, I. (2002) Experiencia norteamericana en modelos que relacionan el número de accidentes y las variables del proyecto geométrico de las carreteras convencionales. *Rutas Revista de la Asociación Técnica de Carreteras*, n.88, p.13-25.
- Santos, B. J. R. (1992) *Consistência da geometria de rodovias*. São Carlos. 60p. Dissertação (Mestrado em Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos.
- Santos, B. J. R. (1998) *A consistência da geometria de rodovias: principais metodologias e contribuição ao método do módulo de segurança*. São Carlos. 252p. Tese (Doutor em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Shankar, V.; Mannering, F. e Barfield, W. (1995) Effect of roadway geometrics and environmental factors on rural freeway accident frequencies. *Accident Analysis and Prevention*. v.27, n.3, p.371-389.
- Vogt, A. e Bared, J. (1997) Accident models for two-lane rural segments and intersections. *Transportation Research Record*, 1635, p.18-29.
- Zegeer, C. V.; Stewart R.; Council F. M.; Reinfurt D. W. e Hamilton E. (1992) Safety effects of geometric improvements on horizontal curves. *Transportation Research Record*, 1356, p.11-19.

**Endereço dos autores:**

<sup>1</sup> Universidade Estadual de Ponta Grossa

Av. Carlos Cavalcanti, 4748, Uvaranas, CEP 84030-900, Ponta Grossa , PR, Brazil.

E-mail: [hcmadalozo@uepg.br](mailto:hcmadalozo@uepg.br)

<sup>2</sup> Universidade Federal do Paraná

Centro Politécnico, CEP 81531-990, Curitiba, PR, Brasil.

E-mail: [andrea@cesec.ufpr.br](mailto:andrea@cesec.ufpr.br)

<sup>3</sup> Universidade Federal do Paraná

Centro Politécnico, CEP 81531-990, Curitiba, PR, Brasil.

E-mail: [edu@eletrica.ufpr.br](mailto:edu@eletrica.ufpr.br)