

Universidade Federal do Paraná
Programa de Pós-graduação em Construção Civil

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

CURITIBA
2003

(lombada)

M.Sc

HÉLIO CARLOS MADALZO

2003

HÉLIO CARLOS MADALOZO

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA DE ANÁLISE DE CURVAS
HORIZONTAIS DE RODOVIAS, PARA MELHORAMENTO DE
PROJETO E OPERAÇÃO, UTILIZANDO REDES NEURAIAS
ARTIFICIAIS**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

**Orientador: Prof.^a Dr.^a Andréa Sell
Dyminski**

**Co-Orientador: Prof. Dr. Eduardo
Parente Ribeiro**

CURITIBA

2003

TERMO DE APROVAÇÃO
HÉLIO CARLOS MADALOZO

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

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof.^a Dr.^a Andréa Sell Dyminski (Doutorado – PUC-RJ)
Programa de Pós-Graduação em Construção Civil - UFPR

Co-Orientador: Prof. Dr. Eduardo Parente Ribeiro (Doutorado – PUC-RJ)
Departamento de Engenharia Elétrica – UFPR

Prof.^a Dr.^a Maria Teresinha Arns Steiner (Doutorado UFSC)
Departamento de Matemática - UFPR

Prof. Dr. José Geraldo Maderna Leite (Doutorado UFPR)
Departamento de Transportes - UFPR

Curitiba, 17 de outubro de 2003.

Dedico este trabalho aos meus pais Helio e Ingeborg (*in memoriam*) e avós Alfredo (*in memoriam*) e Maria Helena (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo.

Aos meus pais Helio e Ingeborg (*in memoriam*) e avós Alfredo (*in memoriam*) e Maria Helena (*in memoriam*) que me incentivaram e me proporcionaram estudo.

À minha namorada Giovana, pelo apoio incondicional e carinho.

Às minhas filhas Michelle e Fernanda, pela compreensão pelos fins de semana prejudicados.

Aos professores Andrea e Eduardo, pela orientação e co-orientação neste trabalho.

A Marcelo pela iniciação ao programa Matlab e participação na confecção das primeiras redes neurais.

Aos professores do PPGEC, e à Maristela, Ziza e Eliseu.

A todos os meus professores e ex-professores pelos conhecimentos a mim transmitidos.

Aos colegas do DNIT e antigo DNER, de Ponta Grossa, de Londrina e de Guarapuava, pelo apoio e auxílio na coleta de dados.

À biblioteca da UEPG, em especial à Cristina Maria, pelo auxílio com o material bibliográfico e referências.

A Sergio Luiz pela pré-classificação e organização dos dados.

À Ana Paula e Michelle pela digitação de planilhas de dados.

A Amauri pelo auxílio junto às atividades na UEPG, durante o período do curso.

Aos profissionais que auxiliaram na obtenção de dados técnicos das curvas, de tráfego ou de acidentes, pertencentes aos seguintes órgãos ou empresas: Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes, Delegacia 7/3 da Polícia Rodoviária Federal (Ponta Grossa), 2ª Companhia de Polícia Rodoviária Estadual (Ponta Grossa), 5ª Companhia de Polícia Rodoviária Estadual (Londrina), Rodonorte, Caminhos do Paraná, Rodovia das Cataratas, Consórcio Vega Conspel (Vega Engenharia e Consultoria Ltda e Conspel Consultoria e Projetos de Engenharia Ltda), Dalcon Engenharia de Consultoria Ltda.

A UEPG e ao Centro de Estudos de Engenharia Civil (CESEC-UFPR), pela oportunidade e pelos conhecimentos transmitidos.

A todos que contribuíram, de uma forma ou de outra, para a consecução deste trabalho, e que não foram aqui mencionados.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 GENERALIDADES	1
1.2 OBJETIVO	4
1.3 JUSTIFICATIVA	5
1.4 LIMITAÇÕES DESTA DISSERTAÇÃO	7
1.5 ESTRUTURA E CONTEÚDO DESTA DISSERTAÇÃO	7
2 A SEGURANÇA EM RODOVIAS	10
2.1 ACIDENTES RODOVIÁRIOS E SUAS CAUSAS	10
2.2 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES SOBRE ACIDENTES EM RODOVIAS.....	22
2.3 PONTO NEGRO	28
2.4 MODELOS ESTATÍSTICOS DE PREVISÃO DE ACIDENTES EM RODOVIAS	31
2.5 PREVISÃO DE ACIDENTES EM RODOVIAS UTILIZANDO REDES NEURAS	40
3 DESENVOLVIMENTO DE MODELO PARA PREVISÃO DE ACIDENTES EM CURVAS RODOVIÁRIAS	45
3.1 INTRODUÇÃO	45
3.2 CONJUNTO DE DADOS	45
3.3 MODELO UTILIZANDO REDES NEURAS	57
3.3.1 Técnica de redes neurais	57
3.3.2 Modelo desenvolvido	64
3.4 MODELOS ESTATÍSTICOS.....	69
3.4.1 Regressão linear múltipla	70

3.4.2 Modelo de Poisson.....	72
4 RESULTADOS DA MODELAGEM.....	74
4.1 MODELO POR REDES NEURASIS	74
4.2 MODELOS ESTATÍSTICOS	85
4.3 COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO DOS MODELOS	93
5 MELHORIAS NA SEGURANÇA DE PROJETOS DE CURVAS	
HORIZONTAIS DE RODOVIAS.....	97
6 CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES	
PARA ESTUDOS FUTUROS.....	104
6.1 CONCLUSÕES.....	104
6.2 RECOMENDAÇÕES.....	105
6.3 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	106
REFERÊNCIAS	108
ANEXOS	114

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DOS TRECHOS ESTUDADOS E CIDADES.....	47
FIGURA 2 - MODELO NÃO-LINEAR DE UM NEURÔNIO.....	58
FIGURA 3 - FUNÇÕES DE ATIVAÇÃO DOS NEURÔNIOS.....	59
FIGURA 4 - EXEMPLO DE REDE NEURAL MULTI-CAMADAS FEEDFORWARD, TOTALMENTE CONECTADA	61
FIGURA 5 - TREINAMENTO VERSUS CAPACIDADE DE GENERALIZAÇÃO DA RN	63
FIGURA 6 - HISTOGRAMA DA REDE 8E5n100 - CONJUNTO DE TREINAMENTO	78
FIGURA 7 - HISTOGRAMA DA REDE 8E5n100 - CONJUNTO DE TESTE	79
FIGURA 8 - GRÁFICO DE ACIDENTES (REAL X PREVISTO) DA REDE 8E3-3-3n50 - CONJUNTO DE TREINAMENTO.....	80
FIGURA 9 - GRÁFICO DE ACIDENTES (REAL X PREVISTO) DA REDE 8E3-3-3n50 – CONJUNTO DE TESTE	81
FIGURA 10 - GRÁFICO DE ACIDENTES (REAL X PREVISTO) DA REDE 6E8n50 – CONJUNTO DE TREINAMENTO.....	82
FIGURA 11- GRÁFICO DE ACIDENTES (REAL X PREVISTO) DA REDE 6E8n50 – CONJUNTO DE TESTE	82
FIGURA 12 - HISTOGRAMA DO MODELO P8E – CONJUNTO DE TREINAMENTO	88
FIGURA 13 - HISTOGRAMA DO MODELO P8E – CONJUNTO DE TESTE.....	88
FIGURA 14 - GRÁFICO DE ACIDENTES (REAL X PREVISTO) DO MODELO L8E – CONJUNTO DE TREINAMENTO.....	89
FIGURA 15 - GRÁFICO DE ACIDENTES (REAL X PREVISTO) DO MODELO L8E – CONJUNTO DE TESTE	90
FIGURA 16 - GRÁFICO DE ACIDENTES (REAL X PREVISTO) DO MODELO P8E – CONJUNTO DE TREINAMENTO	90
FIGURA 17 - GRÁFICO DE ACIDENTES (REAL X PREVISTO) DO MODELO P8E – CONJUNTO DE TESTE	91

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - EXTENSÃO DE RODOVIAS DA REDE NACIONAL	2
TABELA 2 - CUSTO DOS ACIDENTES EM US\$	6
TABELA 3 - ELEMENTOS DA CURVA QUE SÃO POTENCIAIS CANDIDATOS PARA O ESTUDO DA RELAÇÃO DO PROJETO GEOMÉTRICO E A SEGURANÇA	14
TABELA 4 - RESUMO DOS TRECHOS ESTUDADOS	48
TABELA 5 - VMD POR ANO E POR PRAÇA DE PEDÁGIO	56
TABELA 6 - LOCALIZAÇÃO DAS INTERSEÇÕES E DAS PRAÇAS DE PEDÁGIO	56
TABELA 7 - TIPOS DE REDES NEURAIS E ENTRADAS ADOTADAS	65
TABELA 8 - CONFIGURAÇÃO DAS REDES E QUANTIDADE	69
TABELA 9 - RMSE'S DAS MELHORES REDES	75
TABELA 10 - OCORRÊNCIA DE CASOS POR FAIXA DE ERRO NO CONJUNTO DE TREINAMENTO DAS REDES	77
TABELA 11 - OCORRÊNCIA DE CASOS POR FAIXA DE ERRO NO CONJUNTO DE TESTE DAS REDES	77
TABELA 12- COMPARAÇÃO DO TOTAL REAL DE ACIDENTES COM O TOTAL PREVISTO PELAS REDES	84
TABELA 13 - RMSE'S DOS MODELOS ESTATÍSTICOS	85
TABELA 14 - OCORRÊNCIA DE CASOS POR FAIXA DE ERRO NO CONJUNTO DE TREINAMENTO DOS MODELOS ESTATÍSTICOS	86
TABELA 15 - OCORRÊNCIA DE CASOS POR FAIXA DE ERRO NO CONJUNTO DE TESTE DOS MODELOS ESTATÍSTICOS	87
TABELA 16 - COMPARAÇÃO DO TOTAL REAL DE ACIDENTES COM O TOTAL PREVISTO PELOS MODELOS ESTATÍSTICOS	92
TABELA 17 - PARÂMETROS DA CURVA 282	99
TABELA 18 - NÚMERO PREVISTO DE ACIDENTES PARA A CURVA 282	100
TABELA 19 - CURVA DE PROJETO "A" E PREVISÃO DE ACIDENTES PELA REDE 8Et5n100	101
TABELA 20 - CURVA DE PROJETO "B" E PREVISÃO DE ACIDENTES PELA REDE 8Et5n100	103

LISTA DE SIGLAS

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC - Ângulo Central
BO – Boletim de Ocorrência
CAD - Computer Aided Design
CT - Condições do Tempo
D - Desenvolvimento total da curva
DER – Departamento de Estradas de Rodagem
DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes
e - Superelevação existente
FHWA - Federal Highway Administration
Fuzzy ART - Fuzzy Adaptive Resonance Theory
GEIPOT – Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes
GPS - Global Positioning System
HSIS – Highway Safety Information System
HTBR – Hierarchical tree-based regression
lc - Comprimento de transição
LM - Levenberg-Marquadt
MAAP - Microcomputer Accident Analysis Package
MLF – Multilayer feedforward
mse - mean squared error
PNN - Probabilistic Neural Network
PRE – Polícia Rodoviária Estadual
PRF – Polícia Rodoviária Federal
RDB - Road Data Base
rmse – raiz quadrada do mean squared error
R - Raio
RN – Rede neural
RAT – Relatório de acidente de trânsito
SAT - Sistema de Acidentes de Trânsito
SIG - Sistema de Informações Geográficas
TIGRE – Processamento de Informações Geográficas e Eventos em Rodovias
TRL - Transportation Research Laboratory
V₈₅ - Velocidade operacional
VMD – Volume (de tráfego) médio diário (anual)

RESUMO

Muitos estudos têm sido desenvolvidos através de modelos matemáticos para investigar a relação entre o projeto geométrico de rodovias e a ocorrência de acidentes de trânsito, visando-se uma melhoria da segurança da rodovia ao seu usuário. 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, e de 2762 acidentes de trânsito em um período de 5 anos e seis meses. Foram utilizadas redes com 4 a 8 parâmetros de entrada, 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. A saída esperada das redes foi o número de acidentes, para cada curva, em determinada condição climática. Utilizando o mesmo conjunto de dados dos modelos por RN's, foram desenvolvidos 10 modelos estatísticos do tipo linear e de Poisson. O desempenho das redes e dos modelos estatísticos foi avaliado através da raiz quadrada do erro médio quadrático (rmse) e pela frequência de casos com menores erros. Nas redes de melhor desempenho, os erros ficaram em patamares aceitáveis (abaixo de 10%) na grande maioria dos casos (80%). Comparados com as melhores redes, os modelos estatísticos apresentaram rmse pouco superior e frequência de casos com erros menores, pouco inferior. Com estes resultados, observou-se que a técnica de redes neurais pode ser utilizada com relativo sucesso na previsão de acidentes em curvas horizontais de rodovias. Tomando-se uma das redes que apresentou bom desempenho, foram feitas simulações envolvendo uma curva real (em operação) e duas curvas em projeto, onde seus parâmetros geométricos foram alterados, verificando-se uma melhoria na segurança das mesmas, através da diminuição do número de acidentes previstos. Estes modelos de RN's poderão ser bastante úteis tanto na fase de projeto de rodovias, onde os parâmetros das curvas poderão ser adequadamente ajustados, quanto na fase de operação e manutenção das mesmas, onde correções da geometria poderão ser realizadas, procurando-se minimizar o número de acidentes previstos para patamares aceitáveis e, desta forma, aumentando-se a segurança da rodovia ao seu usuário.

Palavras-chave: Rodovias; Curvas horizontais; Redes neurais; Segurança; Acidentes.

ABSTRACT

Many studies have been developed through mathematical models, to investigate the relationship between geometric project of highways and occurrence of traffic accidents, to improve highway safety. Often, there are difficulties in the formulation of the mathematical model to be used in this task and in the choice of the variables to be included, and many times it cannot produce the expected forecast results. 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 were tested and the number of inputs varied from 4 to 8. 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 output of the networks was the expected number of accidents for each curve. Linear and poisson statistical models were also tested for comparison by using the same data. The performances of the models were evaluated through the square root of the mean square error (rmse) and frequency of cases with small errors. Best neural network models exhibited mistakes in acceptable levels (below 10%) for the great majority of the cases (80%). Statistical models presented a little higher rmse and lower frequency of cases with small mistakes. Based on these results it is concluded that the technique of neural networks can be used with relative success in the forecast of accidents in horizontal curves of highways. Once a good model was selected, simulations were carried out with a real curve (in operation) and two new curves in project, where their geometric parameters were altered. It was verified an improvement in the safety of these curves, through the decrease of the number of predicted accidents. These models can be quite useful in the project phase of highways, where the parameters of the curves can be appropriately adjusted or in highway operation and maintenance, where geometry corrections could be implemented, trying to minimize the number of foreseen accidents to acceptable levels leading to an increase in the safety of the highway.

Keywords: Highways; Horizontal curves; Neural networks; Safety; Accidents.

1 INTRODUÇÃO

1.1 GENERALIDADES

O Brasil, com uma área territorial de 8.514.876,599 km² (IBGE, 2003a), tem uma população de 169.799.170 habitantes segundo dados do censo de 2000 (IBGE, 2003b). As pessoas e os bens produzidos pela economia necessitam de transporte para se deslocar, que pode ser feito por vias terrestres, aquáticas ou aéreas. As rodovias e ferrovias se destacam no âmbito do transporte terrestre. O desenvolvimento das rodovias no Brasil começou com a criação do Fundo Rodoviário dos Estados e Municípios pelo Decreto-Lei 2.615 de 21 de setembro de 1940. Entretanto, seu progresso se acentuou após o Decreto-Lei 8.463 de 27 de dezembro de 1945, conhecido como “Lei Joppert”. Esta lei criou o Fundo Rodoviário Nacional, reorganizou o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), atualmente Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (DNIT), e possibilitou a criação dos Departamentos de Estradas de Rodagem estaduais (DER's) (COSTA e FIGUEIREDO, 2001). Por volta da década de 50, com a elaboração do Plano Rodoviário Nacional, o investimento rodoviário se tornou mais ordenado e, na década seguinte, tomou forte impulso, em detrimento do desenvolvimento da rede ferroviária (DNER, 1999).

A extensão da malha rodoviária nacional, constante no Plano Nacional de Viação 2001 (atualizado em 2000), é de 1.724.929 km, incluindo estradas federais, estaduais e municipais, pavimentadas ou não pavimentadas. Na tabela 1 pode-se observar alguns tipos de rodovias componentes da malha nacional e suas extensões correspondentes (GEIPOT, 2003).

TABELA 1 - EXTENSÃO DE RODOVIAS DA REDE NACIONAL

Tipo de rodovia	Extensão (km)
Federal pavimentada	56.097
Federal não pavimentada	14.524
Estadual Transitória pavimentada	15.933
Estadual Transitória não pavimentada	8.211
Estadual pavimentada	75.974
Estadual não pavimentada	107.912
Municipal pavimentada	16.993
Municipal não pavimentada	1.429.296
Total de rodovias pavimentadas	164.988
Total de rodovias	1.724.929

FONTE: GEIPOT, 2003

Nestas rodovias, circula uma frota com 35.727.635 veículos registrados até 31 de dezembro de 2002 nos Departamentos de Trânsito Estaduais (Detran's), com a seguinte composição: 65,05% de automóveis, 13,25% de bicíclós e tricíclós, 9,71% de veículos comerciais leves, 5,65% de veículos importados de todos os tipos, 5,14% de veículos de transporte de carga e 1,20% de veículos de transporte coletivo (GEIPOT, 2003).

As rodovias têm como objetivo facilitar a vida do homem, proporcionando a circulação de pessoas e bens, expandindo o progresso e todos os benefícios decorrentes deste. Porém, muitos acidentes têm ocorrido com os veículos e pedestres que circulam nestas vias. A redução do número de acidentes de trânsito nas rodovias pode ser considerada uma meta constante do Governo, órgãos rodoviários e da sociedade, pois esta sofre com as conseqüências dos mesmos.

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).

Medidas preventivas de acidentes implantadas em projetos ou na execução de obras rodoviárias, tais como a sinalização horizontal e vertical, e ainda providências geométricas, algumas previstas em normas técnicas, tais como limites de alguns parâmetros (por exemplo: raio de curvas, superelevação, declividade longitudinal das rampas, distância mínima de visibilidade etc.), visam minimizar o potencial de ocorrência de acidentes.

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 da determinação de um modelo é justamente a escolha do tipo de modelo, pois mesmo com o correto ajuste dos seus parâmetros, não é possível estabelecer uma relação precisa entre as variáveis consideradas no mesmo. Ainda existe a possibilidade de que variáveis importantes não tenham sido consideradas.

A técnica de redes neurais consiste em um método computacional alternativo aos demais que se baseiam em equações matemáticas bem definidas e pré-programadas. A rede neural possui uma estrutura paralela distribuída, que tem a habilidade de capturar informações de exemplos apresentados à mesma e então, através de generalização dos conhecimentos adquiridos, produzir respostas razoáveis a problemas de mesma natureza, mas diferentes dos anteriores, propostos a ela.

Neste trabalho é apresentado um modelo matemático obtido através de redes neurais, para prever a taxa (número) de acidentes nas curvas horizontais, que são os elementos geométricos da rodovia que apresentam a maior probabilidade de ocorrência de acidentes, conforme pode-se observar no item 2.2, na seqüência deste trabalho. Para o desenvolvimento deste modelo são utilizados dados de 2762 acidentes em 421 curvas horizontais circulares simples e circulares com transição, de dois segmentos de rodovias federais de pista simples, entre janeiro de 1997 a julho de 2002. O primeiro segmento é da BR-376, trecho Apucarana – Caetano com 230,8 km de extensão, e o segundo segmento é da BR-277, trecho Relógio – Três Pinheiros com extensão de 100,9 km.

1.2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é gerar uma ferramenta através de um modelo matemático para auxiliar o desenvolvimento de projetos mais seguros de curvas horizontais de rodovias, baseado na análise de acidentes já ocorridos em curvas existentes de rodovias em operação. Esta ferramenta também poderá auxiliar projetos de melhoramentos de curvas onde estejam acontecendo acidentes, de modo a minimizar a ocorrência destes.

Para atingir este objetivo, este modelo deve relacionar as diversas variáveis envolvidas no problema, utilizando para tal diferentes técnicas numéricas. Uma das maneiras de se realizar esta tarefa é através do desenvolvimento de modelo utilizando a técnica de redes neurais artificiais, procurando-se prever um número ou

índice que represente o potencial de ocorrência de acidentes ao longo do desenvolvimento de uma curva, ou bem próximo ao seu início ou término.

1.3 JUSTIFICATIVA

Conhecendo-se o número que represente a previsão de ocorrência de acidentes relativos a cada curva horizontal na fase de projeto de rodovia, pode-se identificar aquelas cujo valor ultrapassa o limite da segurança aceitável, permitindo que o projetista faça as alterações necessárias nos parâmetros geométricos destas curvas, enquadrando-as então como seguras.

Em rodovias já em operação, pode-se determinar o número potencial de acidentes de suas curvas horizontais e promover correções ou melhoramentos daquelas que ultrapassam o limite desejável de segurança. Estas modificações podem ser simples, tais como reforço de sinalização, correção do coeficiente de atrito da superfície, correção da superelevação, do greide, ou até modificações mais onerosas, tais como alteração de raio, ângulo central, tipo de curva (circular para transição), que implicam em alteração do traçado. Cabe nestas situações uma análise de custo-benefício para se verificar a viabilidade do investimento (DNER, 1982; DNER, 1994a; DNER, 1996; DNER, 1999a; DNER, 1999b).

A Tabela 2 mostra o custo dos acidentes rodoviários, que podem ser utilizados para a análise de custo-benefício dos investimentos em melhoramentos de rodovias.

TABELA 2 – CUSTO DOS ACIDENTES EM US\$

Tipo de acidente	EUA	Brasil*
	1988	1988
Só danos materiais	4.490	3.600
Com ferido	69.590	59.300
Com morto	2.722.550	1.536.200

- Com o acréscimo de US\$ 50.000 para acidentes com feridos para compensar o tempo para o restabelecimento do ferido e de US\$ 1.500.000 para compensar a dor dos que ficam em relação aos mortos.

FONTE: DNER (1994c)

Depois de projetada a modificação de uma determinada curva, pode-se testá-la no modelo matemático proposto, determinando um novo número que represente a previsão de ocorrência de acidentes para confirmar se o investimento será eficaz. Este procedimento poderá ser repetido, alterando-se o projeto de modificação da curva, tantas vezes quantas necessárias, até que esta se enquadre abaixo do limite de número de acidentes considerado aceitável.

Segurança e economia são objetivos primários da prática e pesquisa da engenharia. Por isso, a segurança rodoviária é um importante aspecto de planejamento e projeto de rodovias, visto que, pesquisas em segurança de rodovias têm sido feitas por muitas décadas (VOGT e BARED, 1997).

Existe muito interesse em se estimar a taxa de acidentes nas rodovias e identificar os vários fatores que afetam esta taxa. Porém, muitos trabalhos se concentraram principalmente em identificar os fatores que influem nestas taxas, e a sua previsão ficou em segundo plano (KARLAFTIS e GOLIAS, 2002).

1.4 LIMITAÇÕES DESTA DISSERTAÇÃO

Para a realização deste trabalho, foram coletadas muitas informações, porém somente uma parte das mesmas foi utilizada na modelagem proposta. Variáveis como: (1) classificação do acidente com relação às vítimas (sem vítimas, feridos leves, feridos graves e com morte); (2) existência de sinalização vertical; (3) condições da sinalização horizontal; (4) condições da pista; (5) condições do acostamento; (6) condições de luz; (7) condição do motorista e/ou pedestre; e (8) condição do veículo, não foram consideradas neste trabalho que tem o intuito de enfatizar a relação das características de projeto da rodovia com sua segurança.

1.5 ESTRUTURA E CONTEÚDO DESTA DISSERTAÇÃO

O capítulo 1 apresenta a introdução do trabalho composta por breve histórico e por alguns dados rodoviários brasileiros, considerações sobre acidentes de trânsito e sobre estudos que têm sido desenvolvidos para investigar a relação entre a geometria da rodovia e a ocorrência de acidentes. Em seguida é apresentado o objetivo do trabalho e justificativa de sua importância, descrevendo a forma como ele pode ser aplicado beneficiando a sociedade com a redução do número de acidentes que ocorrem nas rodovias.

No capítulo 2 é feita uma abordagem sobre a ocorrência de acidentes de trânsito e são citados alguns dados estatísticos da situação em que se encontram as rodovias brasileiras. Inicialmente, procura-se estabelecer quais os elementos entre

fatores humanos, via, clima e tráfego, que mais contribuem para a ocorrência dos acidentes, conforme revisão de trabalhos de outros autores.

Em seguida, são relacionados os elementos geométricos da rodovia que têm maior influência na ocorrência de acidentes, visto que o foco deste trabalho envolve as curvas horizontais. Diversas observações e conclusões sobre a relação de acidentes com curvas horizontais são citadas, e é abordada a conceituação de diversos tipos de velocidades que são aplicadas na avaliação da consistência das rodovias.

São comentadas as dificuldades e recomendações apresentadas por diversos autores no que diz respeito à obtenção dos dados das rodovias e de acidentes.

Logo após, é abordado o termo “ponto negro” de uma rodovia e um método para a determinação do índice de acidentes em um trecho de rodovia.

O capítulo 3 inicialmente descreve o conjunto de dados utilizados. São citados os trechos das rodovias que foram estudadas, o número de curvas, o período de tempo e o número de acidentes considerados. São abordados os elementos geométricos, de tráfego, e de acidentes que fizeram parte deste trabalho, suas fontes de obtenção, bem como as planilhas originadas com estes dados.

É feita uma introdução à técnica de redes neurais com uma breve revisão sobre neurônios, arquitetura, número de camadas e treinamento das redes.

Os modelos de previsão de acidentes por RN's desenvolvidos neste trabalho são relatados conforme as diversas arquiteturas de rede experimentadas, variáveis de entradas utilizadas, tipos de neurônios, número de iterações, e outros detalhes.

Também são abordadas as modelagens por regressão linear múltipla e de Poisson, que foram implementadas com os mesmos dados, para modelar previsão de acidentes em curvas horizontais de rodovias.

O capítulo 4 apresenta os resultados dos modelos desenvolvidos por RN's e dos modelos estatísticos como o linear e de Poisson. Inicialmente é estabelecida a forma de avaliar o desempenho dos modelos e os melhores são destacados conforme o erro apresentado e a frequência de casos por faixa de erro. São mostrados histogramas e gráficos de alguns modelos comparando a previsão com a situação real. Finalmente, chegam-se às conclusões preliminares e são discutidos os resultados obtidos, onde são feitas comparações entre os diversos modelos.

O capítulo 5 trata da aplicação do modelo de previsão de acidentes para se obter curvas horizontais mais seguras. São apresentados três casos, sendo o primeiro referente à melhoria de uma curva pertencente ao conjunto de dados de teste, portanto existente e em operação. Os outros dois casos são exemplos de melhorias de projetos geométricos de rodovias, onde os parâmetros das curvas são alterados, gerando duas opções para cada curva, com intenção de melhoria de sua segurança.

O capítulo 6 se refere às conclusões desta dissertação, recomendações e sugestões tanto para futuros estudos quanto para ações visando facilitar trabalhos neste campo, no que se refere à precisão e obtenção dos dados necessários, principalmente de acidentes.

2 A SEGURANÇA EM RODOVIAS

2.1 ACIDENTES RODOVIÁRIOS E SUAS CAUSAS

“Os acidentes de trânsito são um dos problemas sócio-econômicos mais graves nos países em desenvolvimento” (GOLD, 2002).

O ato de dirigir é uma tarefa difícil e complexa. Uma pesquisa realizada nos Estados Unidos concluiu que o motorista comete um erro a cada dois minutos, envolvendo-se em uma situação perigosa a cada uma ou duas horas (PETZHOLD¹, apud GEIPOT, 1987).

Nas rodovias federais brasileiras policiadas, no ano de 2000, ocorreram 110.387 acidentes de trânsito, tendo provocado 6.543 mortes, 20.620 vítimas com ferimentos graves, 39.916 vítimas com ferimentos leves e envolveram 460.501 pessoas que não sofreram ferimentos. Este número diminuiu paulatinamente desde o ano de 1997, quando foi criado o novo Código de Trânsito Brasileiro pela Lei nº 9.503 de 23 de setembro de 1997, até o ano de 2000 (GEIPOT, 2003).

As causas dos acidentes, conforme classificou o GEIPOT (1987), podem ser imediatas ou subjacentes (indiretas). As causas imediatas limitam-se ao contexto do acidente e se referem ao motorista, aos veículos ou à via, como por exemplo: em 1981, as estatísticas nacionais sobre a causa presumível de acidentes de trânsito com vítimas foram 51% atribuídas aos motoristas, 4% ao veículo, 2% à via, 15% ao pedestre e 28% a causas ignoradas. Os dados estatísticos de 1984 do Distrito Federal atribuem como causas dos acidentes, 98% aos motoristas, 1% a pedestres

¹ PETZHOLD, Mario F. **Uma abordagem sistêmica da dinâmica de segurança de trânsito**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1985. 1v.

e 1% a defeitos nos veículos. A via nem sequer é citada neste levantamento, e dentro da categoria motoristas, 73% foi atribuído a comportamento, 7% ao excesso de velocidade e 18% à perda do controle da direção. Estes dados ilustram a fragilidade das próprias estatísticas quanto à sua utilidade em orientar ações preventivas, principalmente na subcategoria comportamento do motorista. As causas indiretas são aquelas de ordem ambiental, tecnológica ou institucional, que criam situações propícias a acidentes ou agravam suas conseqüências, enquadrando-se o traçado viário neste grupo.

Normalmente concorda-se que acidentes de trânsito são eventos complexos que geralmente envolvem a interação de muito fatores contribuintes. Diversos autores citam como fatores que influem na ocorrência de acidentes as características e geometria da via, o meio ambiente, o tráfego, as condições do veículo, as condições do tempo e de iluminação e fatores humanos (GOLD, 2002, MIAOU e LUM, 1993, NOGUEIRA, 1995, SANTOS, 1998, VOGT e BARED, 1997).

A rodovia é um fator de reconhecida importância, e os seus 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).

Segundo GOLD (2002), a idéia de que 90% dos acidentes de trânsito são causados por falha humana (condutores e pedestres) não corresponde à verdade, pois, por exemplo, no caso de motoristas embriagados, estes provavelmente vão se acidentar mais quando estiverem sob a influência de deficiência da via, sinalização

ou manutenção inadequada do veículo. Para o autor desta dissertação, este exemplo não justifica a afirmação anterior, pois da mesma forma, motoristas lúcidos poderiam se acidentar menos, ou não se acidentar, quando percorrem vias que apresentam deficiências ou dirigem veículos deficientes. Mesmo existindo a deficiência da via ou veículo, a falha humana não deve ser ignorada, nem mesmo atenuada. Ainda, infere-se que os boletins de ocorrências podem ter uma tendência de não relatar condição de motorista sob efeito do uso do álcool e que não esteja visivelmente embriagado. Nesse caso, a real porcentagem do número de acidentes causados por falha humana pode ser até maior.

NOGUEIRA (1995) analisou a relação entre a geometria de rodovias e acidentes de trânsito com veículos de carga e afirmou que, no Brasil, 70% dos acidentes em rodovias ocorrem devido a falha humana, 20% pelas deficiências das estradas e apenas 10% por defeitos mecânicos dos veículos. Essa diferença nas porcentagens atribuída à via pode ser devido à forma com que os acidentes no Brasil são documentados, ou seja, amenizando a influência das vias e dos veículos nos acidentes.

Conforme SHINAR² apud SANTOS (1998), resultados de pesquisa realizada no estado de Indiana (EUA) indicaram que o fator humano representa 79,2% das causas dos acidentes, o fator via e ambiente é responsável por 25% e o fator veículo 7,5%. A soma dessas porcentagens é maior que 100% porque muitos acidentes são causados pela combinação de fatores.

Estes resultados também foram constatados por ROZESTRATEN³ apud SANTOS (1998) em que 79,2% correspondentes às causas humanas, 57% são

² SHINAR, D. **Psychology on the road: the human factor in traffic safety.** New York: J. Wiley, 1978.

³ ROZESTRATEN, R. J. A. **Psicologia do transito-conceitos e processos básicos.** São Paulo: USP, 1998. 154p.

devidas unicamente ao fator humano e os 43% restantes dos acidentes são devidos à combinação de causas humanas com causas provenientes da via ou veículo, os quais poderiam ter sido evitados se os problemas da via ou veículos tivessem sido corrigidos previamente. A combinação mais freqüente é a de fatores humanos com fatores da via e ambiente.

Outros autores estudaram a participação da via na ocorrência de acidentes e afirmaram que as características da via podem ser responsáveis por até 34,5% dos acidentes (TREAT⁴ et al., apud 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. PÉREZ PÉREZ (2002) concluiu que a variável geométrica mais significativa do ponto de vista da segurança viária é o grau da curva, que é uma variável de curva horizontal, sendo portanto, do traçado em planta.

Em rodovias rurais de duas faixas de trânsito, a segurança do tráfego e o comportamento dos motoristas são influenciados por muitos fatores mensuráveis. CHOUEIRI et al. (1994) relaciona os seguintes fatores:

- a) Fatores humanos, tais como o julgamento indevido da situação da rodovia à frente, no que diz respeito ao tráfego e à velocidade, dirigir sob a influência de álcool ou drogas, inexperiência (motoristas jovens), deficiência (especialmente para o segmento idoso dos motoristas), e sexo (LAMM, CHOUEIRI e MAILAENDER⁵ apud CHOUEIRI et al., 1994);

⁴ TREAT, J. R., et al. **Tri-level study of the causes of traffic accidents**. Report n. DOT-HS-034-3-535-77 (TAC). Indiana University, 1977.

⁵ LAMM, R.; CHOUEIRI, E. M.; MAILAENDER, T. Traffic safety on two continents: a ten year analysis of human and vehicular involvements. **Proc., Strategic Hwy. Res. Program (SHRP) and Traffic Safety on Two Continents**, 18-20, 1992.

- b) Características físicas do local, tais como alinhamentos horizontal e vertical, seção transversal combinada com o grau de desenvolvimento das margens
- c) da faixa de domínio e controle de acessos;
- d) Presença e ação do tráfego, tais como volume, composição e variações sazonais e diárias;
- e) Questões legais, tais como as leis obrigatórias federais e estaduais, tipo de dispositivos de controle de tráfego e grau de policiamento;
- f) Fatores ambientais, tais como clima e condições do pavimento;
- g) Deficiências dos veículos, tais como pneus e freios avariados e idade avançada.

Potenciais candidatos para o estudo da relação entre o projeto geométrico e a segurança na rodovia foram estudados no final da década de 80 (GLENNON, apud LOTTI, 2002), conforme a Tabela 3.

TABELA 3 – ELEMENTOS DA CURVA QUE SÃO POTENCIAIS CANDIDATOS PARA O ESTUDO DA RELAÇÃO DO PROJETO GEOMÉTRICO E A SEGURANÇA

Elemento	Descrição
Alinhamento Horizontal	Raio de curvatura
	Comprimento da curva
	Superelevação do comprimento de transição
	Distribuição da superelevação entre a tangente e a curva
	Presença de comprimento de transição
	Distância de frenagem da curva

continua

TABELA 3 – ELEMENTOS DA CURVA QUE SÃO POTENCIAIS CANDIDATOS PARA O ESTUDO DA RELAÇÃO DO PROJETO GEOMÉTRICO E A SEGURANÇA

	conclusão
Seção Transversal	Taxa de superelevação
	Largura da pista
	Largura do acostamento
	Declividade do acostamento
	Declividade da área adjacente ao acostamento
	Largura da área livre
Alinhamento Vertical	Distância de frenagem na aproximação
	Presença e comprimento das rampas adjacentes
	Presença e comprimento das curvas verticais adjacentes
Outros	Distância entre curvas adjacentes
	Distância da interseção mais próxima
	Presença e largura de pontes adjacentes
	Nível de atrito do pavimento
	Presença e tipo de dispositivos de controle de tráfego (como sinalização vertical e horizontal)
	Tipo de material do acostamento

FONTE: GLENNON⁶ apud LOTTI (2002)

A relação entre o número de acidentes e a via também foi constatada por NOGUEIRA (1995) em suas conclusões e recomendações. A análise dos resultados do estudo de caso realizado em seu trabalho mostrou que há fortes indícios de que existe uma relação entre acidentes envolvendo veículos de carga e a geometria da via. Também foi sugerido que seja investigada a relação de acidentes com a geometria das curvas horizontais, tanto quanto ao raio mínimo quanto à superelevação.

⁶ GLENNON, John C. Effect of alignment on highway safety: state of the art report 6. Relationships between safety and key highways features, **TRB**. 1987. p. 48-63.

Segundo a AASHTO⁷ apud SANTOS (1998), deve-se evitar a introdução de curvas reversas abruptamente. É recomendado que, entre duas curvas sucessivas, deva existir uma tangente de comprimento mínimo de 100 m, e a variação dos raios entre curvas sucessivas não deve ultrapassar 50%.

A taxa de acidentes em curvas é de 1,5 a 4 vezes maior que a taxa de acidentes nas tangentes similares (GLENNON⁸ et al., apud ZEGEER et al., 1992). Para rodovias rurais americanas, LAMM⁹ et al., 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. BRINKMAN¹⁰ 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.

Em um estudo envolvendo rodovias rurais de duas faixas sem canteiro central, VOGT e BARED (1997) concluíram que as mesmas são rodovias com taxas de acidentes mais altas em relação às rodovias com canteiro central. De acordo com GOLD (2002), a duplicação de rodovias com introdução de canteiro central tende a eliminar acidentes tipo colisão frontal, que normalmente resultam em vítimas fatais. Entretanto, em áreas de circulação de pedestres, a simples duplicação da pista, sem a implantação de outras melhorias como passarelas ou passagens inferiores, tende a aumentar a possibilidade de atropelamento.

⁷ AASHTO-AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **A policy on geometric design of highway and streets**. Washington, 1984. 1087p.

⁸ GLENNON, J. C. et al. **Safety and operational considerations for design of rural highway curves**. FHWA/RD-86/035. U.S. Department of Transportation, 1985.

⁹ LAMM, R.; CHOUEIRI, E. M.; MAILAENDER, T. Traffic safety on two continents: a ten year analysis of human and vehicular involvements. **Proc., Strategic Hwy. Res. Program (SHRP) and Traffic Safety on Two Continents**, 18-20, 1992.

¹⁰ BRINKMAN, C. P.; SMITH, S. A. Two-lane rural highway safety. **Public Roads**, v.48, n.2, p.48-53, 1984.

Um projeto consistente de rodovia assegura que os elementos geométricos ajam de modo coordenado, de forma que produzam um desempenho harmonizado do motorista, sem eventos “surpresa” para ele (GIBREEL et al., 1999).

Nas rodovias brasileiras mais antigas, é comum a existência de aclives acentuados e longos, que provocam atrito entre o tráfego pesado e o tráfego leve, induzindo o motorista a possíveis ultrapassagens perigosas e criando situações potenciais para a ocorrência de acidentes. Segundo CHOUERI et al., 1994, incrementos na declividade do greide de até 6% provocam leve aumento na taxa de acidentes, porém acima de 6%, provocam aumentos notáveis na taxa de acidentes.

Aumentos na taxa de acidentes também ocorrem em curvas de pequeno raio situadas em segmentos com curvas de raio maior, ou até localizadas nas entradas e saídas de pontes. Alternativas para amenizar esses problemas, que na época da construção da rodovia não se mostravam tão evidentes, têm sido feitas com forte intensificação da sinalização. Mais recentemente, em muitas rodovias com estes casos de curvas horizontais deficientes, já houve correções de traçado. Como exemplo disso, podem ser citadas as rodovias BR-376 e BR-277, nos trechos que foram objeto de estudo neste trabalho: BR-277 – km 330,15 - variante do Rio das Pedras (correção de curvas e nova ponte), BR-277 – km 336,55 - variante do Rio das Mortes (correção de curvas e nova ponte), BR-277 – km 362,83 - ponte sobre o Rio Coutinho (alargamento de ponte), BR-376 – km 299,1 - variante da Serra do Cadeado (recuperação de aterro e correção de curvas), BR-376 – km 434,8 - variante do antigo km 165 (recuperação de aterro e correção de curvas), BR-376 – km 458,0 - variante do Rio Barrinha (correção de curva e nova ponte). BR-376 – km 295,5 ao km 308,0 - duplicação de 12,5 km Serra do Cadeado a partir de janeiro de 2001 (25 curvas existentes e mais duas novas curvas).

As intervenções na geometria das curvas identificadas como críticas da rodovia Presidente Dutra foram de correção ou aumento das superelevações e superlarguras e aumento da aderência do pavimento através de uma nova camada e/ou fresagem, sendo todas elas associadas à implantação de sinalização vertical e horizontal (REZK, 2002).

As interseções em nível, principalmente as situadas em locais de baixa distância de visibilidade, podem ser alguns dos locais potencialmente perigosos e agentes causadores de acidentes (NOGUEIRA, 1995).

Os acessos à rodovia, de propriedades particulares e de estabelecimentos comerciais, principalmente os irregulares, também podem ser considerados potenciais causadores de acidentes, especialmente aqueles situados em locais com distância de visibilidade insuficiente.

CHOUERI et al. (1994) consideram que os fatores causadores de acidentes de tráfego formam um complexo conjunto, e a rodovia por si só representa apenas um fator, porém muito importante. Os elementos escolhidos para seu estudo sobre rodovias rurais de duas faixas foram: largura do pavimento, raio/grau de curva horizontal, declividade de greide, distância de visibilidade, volume de tráfego e velocidade de projeto. Estes elementos foram escolhidos pela sua considerável influência e facilidade de medição. Os autores constataram também a interdependência entre estes parâmetros na influência sobre os acidentes.

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 rodovia Presidente Dutra, que apresentava mau estado de conservação, ao receber melhorias, teve seus usuários sentindo-se muito mais seguros e passando a abusar da velocidade, ocorrendo assim um aumento no número de acidentes (REZK, 2002).

A velocidade é considerada em diversos estudos sobre consistência de rodovias (GIBREEL et al., 1999; LAMM, GUENTHER e CHOUEIRI, 1995; LAMM, HAYWARD e CARGIN, 1986; MESSER, 1980; SANTOS, 1992; SANTOS, 1998).

Algumas definições de velocidades conforme a AASHTO¹¹, citadas em SANTOS (1992), são:

- Velocidade de projeto ou velocidade diretriz: é a velocidade máxima de segurança que pode ser mantida em um trecho específico de rodovia, quando as condições de tráfego são tão favoráveis que prevalecem as condições da via na escolha da velocidade de circulação;
- Velocidade no percurso ou velocidade no espaço: é a distância percorrida pelo tempo que o veículo esteve em movimento;
- Velocidade operacional: é a maior velocidade no espaço (de percurso) com que o motorista conduz o veículo em dado trecho da rodovia, sob condições favoráveis de tempo e características do tráfego, sem exceder a velocidade de segurança teoricamente limitada pela velocidade de projeto entre trechos da via.

A velocidade de percurso é uma função de diversas variáveis, dentre as quais, da geometria e da consistência da geometria da via (SANTOS, 1992).

¹¹ AASHTO-AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **A policy on geometric design of highway and streets.** Washington, 1984. 1087p.

Também pode ser definida a velocidade média no tempo ou velocidade média no ponto, como sendo a média aritmética das velocidades dos veículos observados passando em um ponto da rodovia (DNER, 1994b).

Segundo as normas alemãs para projetos de rodovias, a velocidade operacional (V_{85}) de uma rodovia é definida pela velocidade dos veículos em trânsito que não sofrem restrições por parte de outros usuários, e normalmente é representada pelo 85º percentil de velocidade (GIBREEL et al., 1999). Logo, a grande maioria dos veículos (85%) viaja a velocidades inferiores a V_{85} . Vários estudos realizados sobre a operação das estradas indicaram que esta velocidade operacional é aproximadamente 10 km/h superior à velocidade média de percurso dos veículos (SANTOS, 1998).

Muitos fatores afetam o valor de V_{85} , tais como: raio e comprimento de curvas horizontais, distância de visibilidade, taxa de superelevação, coeficiente de atrito lateral e condições do pavimento. Diversos modelos matemáticos já foram determinados através de regressão linear para o cálculo de V_{85} . A maioria deles é função basicamente do grau (ou raio) da curva ou da taxa de variação de curvatura do segmento de rodovia considerado (GIBREEL, 1999). Para o cálculo de V_{85} , através de modelos que são função do grau da curva, SANTOS (1998) observa que para as tangentes, deve-se adotar o valor zero para o grau da curva. Por outro lado, a taxa de variação de curvatura pode ser calculada para segmentos de rodovias que compreendam curvas horizontais e tangentes.

SANTOS (1998) ainda cita as expressões (1) e (2) para o cálculo da velocidade operacional:

$$V_{85} = 94,393 - 2,784.G \quad (1)$$

$$V_{85} = 96,147 - 2,448.G \quad (2)$$

em que: G = grau da curva para corda de 20 metros.

A equação (1) é válida para qualquer largura de faixa de trânsito e apresenta coeficiente de correlação $R^2 = 0,787$. A equação (2) é válida para largura de faixa de trânsito igual a 3,6 metros e apresenta coeficiente de correlação $R^2 = 0,824$.

Conforme GIBREEL et al. (1999), a consistência em um projeto geométrico de rodovia é uma característica muito importante para se atingir um tráfego de operação seguro e fluente.

GLENNON & HARWOOD¹² 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”.

O principal elemento para a avaliação da consistência de rodovias é a velocidade de operação, que é fortemente influenciada pelo raio das curvas horizontais (grau da curva). A consistência de um elemento isolado da rodovia é avaliada pela diferença de velocidades de operação e de projeto: quanto maior for esta diferença, menor é a consistência. E a consistência em elementos sucessivos da rodovia é baseada na diferença entre suas velocidades de operação: quanto maior for esta diferença, menor é a consistência (GIBREEL et al., 1999).

A consistência de uma rodovia pode ser associada à facilidade de controle

¹² GLENNON, J. C. ; HARWOOD, D. W. Highway design consistency and systematic design related to highway safety. **TRR. TRB.** 681. Washington, 1978. p.77-86.

do veículo pelo motorista, e esta habilidade é um dos principais elementos do conjunto de variáveis que influem no grau de segurança de uma estrada (SANTOS, 1992).

A velocidade de projeto e velocidade operacional dos veículos foram usadas por LAMM, GUENTHER e CHOUEIRI (1995) e por SANTOS (1998) na aplicação do método módulo de segurança para a determinação da consistência de rodovias.

2.2 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES SOBRE ACIDENTES EM RODOVIAS

Estudos que relacionam a freqüência de acidentes em rodovias com a curvatura horizontal e vertical e as rampas requerem grande quantidade de dados, o que os tornam onerosos e demorados. Outros fatores locais também podem influenciar nos acidentes e mascarar o efeito do alinhamento, além de que a relação acidente - alinhamento não é necessariamente simples (LUPTON, ZHANG e WRIGHT, 1999).

A grande dificuldade em se realizar estudos sobre a relação do número de acidentes de trânsito com a geometria da rodovia foi citada por LOTTI (2002) em seu trabalho, cujo principal objetivo foi apresentar um método de levantamento e sistematização dos dados necessários para o estudo da relação dos acidentes com as características físicas básicas da rodovia. Infelizmente não existe disponível, no Brasil, um banco de dados completo e informatizado, tanto das características da rodovia, quanto dos acidentes. Relacionar acidentes com geometria da via requer grande volume de dados para que se obtenham resultados estatísticos significativos.

Normalmente em questões de análise sobre acidentes de trânsito e segurança viária em geral, faltam informações a respeito da situação anterior à implantação de projetos propostos e dos prováveis efeitos decorrentes de sua eventual implantação (GOLD, 2002).

Os dados são de fundamental importância para as pesquisas. Dificuldades em sua obtenção são comuns e falta de detalhes ou até incorreções nos dados podem falsear os resultados dos estudos e levar os pesquisadores a conclusões indevidas. SACOMMANO¹³ et al. apud LOTTI (2002) encontraram os seguintes problemas ao desenvolver um modelo de risco de acidentes no Canadá:

- natureza diversa dos riscos considerados (por exemplo: veículo envolvido no acidente, danos à propriedade e ao meio ambiente);
- grande número de bases de dados, freqüentemente administradas por órgãos diferentes para diversos propósitos (gerenciamento de tráfego, manutenção de rodovias) com vários formatos e sistema de codificação;
- ligações inconsistentes entre os bancos de dados, o que impede a união de informações para o estudo do risco de acidentes; sistema de referência espacial inadequado para a rede viária considerada;
- necessidade de se contabilizar vários fatores de controle do risco para explicar as experiências com acidentes em diferentes locais e clima (por exemplo geometria da rodovia, composição do tráfego, condições do tempo).

¹³ SACOMMANO , F. F., et al. Geographic information system platform for road accident risk modeling. **Transportation Research Record**, v.1581, p18-26, 1997.

Uma eficaz análise de acidentes em rodovias depende dos dados disponíveis sobre os acidentes de trânsito, sendo necessários adequado detalhamento e correção dos levantamentos. Em geral, a fonte original destas informações é o boletim de ocorrência (BO) ou relatório de acidente de trânsito (RAT) elaborado pela polícia rodoviária que efetua o atendimento do acidente. Observa-se que no Brasil não há uniformidade entre os boletins de acidentes, pois o RAT apresentado por NOGUEIRA (1995), que é usado pela Polícia Militar Rodoviária do Estado de São Paulo, o BO usado pela Polícia Rodoviária Estadual do Paraná e o BO usado pela Polícia Rodoviária Federal são diferentes. Com estas informações, pode-se inferir que a não uniformidade dos BO's é generalizada no Brasil.

Outra observação a ser feita é que, nos BO's, só é registrado como vítima fatal aquela que falece no local do acidente. A ABNT classifica como vítimas fatais de acidentes aquelas cujo falecimento ocorra até trinta dias após o acidente que os feriu (SANTOS, 1992). Evidentemente, esse controle das vítimas até trinta dias após o acidente acarretaria um esforço adicional considerável. A subestimação do número de vítimas nos acidentes de trânsito no Brasil, em 1987, foi comprovada por NASSI & TRIDADE JR¹⁴ apud SANTOS (1992). Devido a este fato, alguns dados sobre o número de mortos, oriundos dos BO's e utilizados neste trabalho, podem não ser absolutamente precisos.

Outro dado fundamental e constante nos BO's é a localização exata da ocorrência do acidentes, que é dada pela indicação do quilômetro da rodovia com aproximação de metros. Esta localização depende da correta demarcação

¹⁴ NASSI, C. D.; TRINDADE JR. **Proposta para a classificação da gravidade do acidente de trânsito.** In: Anais. II Encontro Nacional da ANPET. São Paulo, 1988. V.1, p.265-275.

quilométrica da rodovia e, toda vez que se faz correções nesta quilometragem, introduzem-se dificuldades para correlacionar acidentes e suas localizações, ocorridos antes e após à alteração mencionada. O mesmo ocorre em relação à localização de elementos geométricos da rodovia, como curvas, rampas, pontes, e outros, que devem evidentemente ter a mesma referência de localização que os acidentes.

Outro problema bem conhecido em análise de segurança é o registro somente de acidentes com relativa gravidade, o que pode prejudicar os estudos estatísticos de acidentes menos graves, com ciclistas ou motociclistas, por exemplo, que não são registrados pela polícia rodoviária (GREIBE, 2003).

A utilização do volume médio diário anual (VMD) de tráfego na análise de acidentes também pode conduzir a erros, visto que o volume de tráfego pode sofrer grande variação conforme o mês, o dia ou mesmo a hora (por exemplo, altíssimo volume de tráfego em feriados prolongados). Por outro lado, a determinação do volume horário de tráfego, quando ocorre o acidente, pode se tornar uma difícil tarefa, cuja viabilização somente seja possível com a disponibilidade de um complexo banco de dados.

Muitos departamentos estaduais de transporte nos Estados Unidos já estão tomando medidas para melhorar os registros de seus acidentes de trânsito, onde estão sendo incluídos outros fatores relacionados aos veículos, motoristas, faixa de domínio, tráfego e condições do tempo antes e depois de um acidente (AWAD e JANSON, 1997).

A partir de 1997, a Nova Dutra – Concessionária da Rodovia Presidente Dutra S. A. - tem registrado os dados de acidentes em boletins internos, que por sua vez alimentam um complexo banco de dados, o qual apresenta diversas facilidades

de consultas e pesquisas. Este banco de dados possibilitou a identificação das curvas críticas e os tipos de acidentes mais comuns em cada caso (REZK, 2002).

A importância dos dados em análise de acidentes é reforçada por NOGUEIRA (1995) em algumas de suas conclusões e recomendações:

- O banco de dados do Sistema de Acidentes de Trânsito – SAT do DER-SP gerado pelos RAT's é deficiente e precisa ser melhorado;
- Sugere-se que seja feito um *as built* da geometria da via representada por um modelo de CAD (*Computer Aided Design*), previamente alimentado por levantamento através de GPS (*Global Positioning System*) de navegação;
- É necessário inserir nos RAT's novos campos com dados de veículos de carga;
- É necessário melhorar a qualidade do preenchimento dos RAT's através de treinamento dos policiais.

Nos Estados Unidos, através de pesquisas realizadas pelo *Federal Highway Administration* (FHWA), foi criado o sistema de informações sobre segurança de rodovias (HSIS – *Highway Safety Information System*), que é um banco de dados unificado com informações sobre acidentes e rodovias de vários estados americanos. Inicialmente, em 1987, participaram do HSIS cinco estados e, de acordo com o FHWA, em 2000 já eram oito estados. O HSIS tem a função de auxiliar os pesquisadores e administradores, fornecendo dados que podem ser facilmente combinados e analisados. O FHWA tem realizado diversas pesquisas sobre segurança em rodovias (LOTTI, 2002).

VOGT e BARED (1997) utilizaram dados do HSIS dos estados de Minnesota e Washington que serviram para seus estudos sobre modelos de

acidentes em rodovias rurais de duas faixas de trânsito, tanto para trechos entre interseções, quanto para interseções (LOTTI, 2002).

MIAOU e LUM (1993) também usaram dados do HSIS quando estudaram quatro modelos de regressão para analisar as relações entre acidentes com veículos e projeto geométrico de rodovias.

De acordo com LOTTI (2002), a maioria dos departamentos estaduais de transporte dos EUA já dispõe de um banco de dados com as características físicas das rodovias correspondentes aos seus estados. Normalmente, esses bancos de dados fornecem a geometria da rodovia, sinalização, existência de semáforos, qualidade e marcação do pavimento, objetos existentes às margens da rodovia entre o acostamento e o limite da faixa de domínio, pontes e acessos.

Além dos Estados Unidos, outros países já contam com banco de dados desenvolvido para fornecer elementos fundamentais para análise de acidentes. No Reino Unido, os dados de acidentes são armazenados segundo o modelo STATS 19. O *Transportation Research Laboratory* (TRL), baseado no STATS 19, desenvolveu o programa computacional MAAP (*Microcomputer Accident Analysis Package*), que permite armazenar e analisar os dados e as características comuns dos acidentes. O MAAP está sendo utilizado no Zimbábue, Colômbia e Caribe, além do Reino Unido. A Alemanha conta com um sistema próprio de informações de rodovias (VSIS), que é baseado na Base de Dados de Rodovias (RDB- *Road Data Base*). A versão atual do RDB utiliza um banco de dados *Oracle*. A França possui o TIGRE – Processamento de Informações Geográficas e Eventos em Rodovias. O TIGRE utiliza *UriaH* como sua ferramenta de SIG (Sistema de Informações Geográficas), que consiste em duas bases de dados, de eventos e geográficos, e pode ser utilizado em medidas de controle de tráfego, de previsão e de informação.

A Itália dispõe de Relatórios Estatísticos de Acidentes, cujos dados forneceram subsídios para MUSSONE¹⁵ et al. desenvolverem um modelo de análise de acidentes através de redes neurais (LOTTI, 2002).

2.3 PONTO NEGRO

A repetição de acidentes em um mesmo local indica um problema na via, sendo que “um trecho é considerado perigoso, quando, nele tem-se ao menos um acidente por ano, independente do seu volume diário médio” (MAK¹⁶ et al. apud NOGUEIRA, 1995, p.9). Reafirmando ainda, um local de uma rodovia é considerado potencialmente perigoso quando ocorre ao menos um acidente por ano (SETTI (1985) apud NOGUEIRA, 1995).

O DNIT usa o termo “segmento crítico” ou “ponto negro” para locais ou trechos perigosos da rodovia. A definição destes locais é através do cálculo do índice de acidentes e índice crítico, que levam em consideração o tráfego (TOLOMEI e MELLO, 1986).

TOLOMEI e MELLO (1986) utilizaram um modelo baseado em cálculo estatístico e probabilístico, cujo resultado é a obtenção de um índice crítico de segurança para um certo segmento homogêneo da rodovia. Se o cálculo do índice de acidentes do segmento analisado for superior ao índice crítico, então o local em

¹⁵ MUSSONE, Lorenzo; REITANI, Giuseppe; RINELLI, Savino. **Vehicular flow analysis to estimate accident probability by artificial neural networks.** Proceedings of 4th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management, Melbourne, July. 1995, v.1, p.361-368.

¹⁶ MAK, K. K., et al. Assessment of existing general purpose data bases for highway safety analysis. Washington: **TRB. TRR.** 1172, 1988. p.1-10.

questão é considerado segmento crítico (ou seção crítica ou ponto negro). A determinação do índice de acidentes e do índice crítico de acidentes é função principalmente do número de acidentes, mas depende também da extensão do segmento, volume de tráfego e período de tempo. Este método é utilizado atualmente para a determinação de segmentos críticos.

O estudo do índice de acidentes e índice crítico foram analisados de uma forma prática por PROTOS (1986), onde foram apresentadas as expressões matemáticas (3) e (4), propostas por TOLOMEI e MELLO (1986):

$$I_A = \frac{10^6 \cdot A}{(VMD) \cdot PT \cdot E} \quad (3)$$

$$I_c = \bar{I}_A + k \sqrt{\frac{I_A}{m}} \quad 0,5.m \quad (4)$$

em que:

I_A = índice de acidentes do segmento;

A = número de acidentes ocorridos no segmento;

VMD = volume médio diário anual (veículos/dia) do segmento;

PT = período de tempo considerado (usualmente 365 dias);

E = extensão do segmento (variável de 1,0 a 1,9 km);

I_c = índice crítico para o segmento considerado;

\bar{I}_A = índice médio para o tipo de segmento considerado, calculado em função de todos os segmentos do mesmo tipo;

$k = 2,576$ (para grau de confiança = 99,5%);

$k = 1,645$ (para grau de confiança = 95%, normalmente aceitável);

$k = 1,282$ (para grau de confiança = 90%);

$m = \text{VMD} \cdot \text{PT} \cdot E \cdot 10^{-6}$ sendo VMD e E referentes ao segmento considerado e PT o período de tempo adotado (usualmente 365 dias).

Inicialmente, TOLOMEI e MELLO (1986) tentaram utilizar o custo dos acidentes como uma variável, porém esta se mostrou inviável tendo-se em vista a dificuldade, senão a impossibilidade muitas vezes, de se apurar um valor preciso do custo hospitalar, no caso de acidentes com feridos.

Na análise da geometria de uma rodovia aplicando o método do módulo de segurança, SANTOS (1998) sugeriu a adoção de um quarto critério para este método, onde considerou o índice de acidentes criado por TOLOMEI e MELLO (1986).

Conhecendo-se esta relação entre os acidentes de trânsito e os elementos geométricos da rodovia, como alinhamentos horizontal e vertical, largura das faixas de trânsito e do acostamento, interseções, pontes, entre outros, é possível otimizar as intervenções nas rodovias em operação, de modo a torná-las mais seguras. Também é possível direcionar os projetos de rodovias de forma a maximizar a segurança da futura rodovia, evitando alguns acidentes e seus ônus.

Muitos locais de ocorrência de acidentes necessitam ser investigados, sendo importante ter à disposição uma ferramenta confiável que facilite este trabalho.

2.4 MODELOS ESTATÍSTICOS DE PREVISÃO DE ACIDENTES EM RODOVIAS

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 os modelos de distribuição exponenciais, onde se incluem os modelos de Poisson e o binomial negativo. Podem ser lineares ou não lineares, e normalmente são múltiplos, tendo-se em vista que muitas variáveis influem no número de acidentes, como tem sido exposto neste trabalho. As distribuições de Poisson e binomial negativa têm sido muito utilizadas por diversos autores, conforme será descrito na seqüência deste item. Os modelos mais simples são os lineares.

GOLIAS (1992) estudou a relação entre número de acidentes e fluxo de tráfego em cruzamentos de rodovias preferenciais urbanas. Um número médio de acidentes para cada cruzamento considerado foi obtido por regressão linear, sendo o índice de exposição a acidentes adotado como variável independente. Dentre os modelos resultantes, o de melhor desempenho atingiu um coeficiente de correlação de 0,89, ou seja, 78% da variação do número de acidentes no cruzamento foi explicado pelo modelo. Foram usados dados de acidentes coletados num período de cinco anos, para 43 cruzamentos de quatro ramos. Neste trabalho, foi proposto um novo índice de exposição a acidentes, função do fluxo de tráfego no cruzamento interagindo com os sub-fluxos em cada ramo.

MOUNTAIN et al. (1996) propuseram um modelo geral linear para estimar o número esperado de acidentes para seis categorias de rodovias com cruzamentos secundários, e o procedimento Bayesiano para melhorar a estimativa de acidentes.

Entretanto, os acidentes em seções da rodovia mostraram-se ser uma função não linear da exposição e freqüência de cruzamentos secundários.

Quatro modelos matemáticos obtidos por regressão, para prever o número de acidentes por milha por ano em rodovias rurais de duas faixas de trânsito, foram utilizados por BENEKOHAL e HASHMI (1992). Esses modelos foram aliados ao estudo de antes e depois da execução de melhoramentos na rodovia, sendo que os dados de acidentes referiam-se a dois anos antes e dois anos depois dos melhoramentos executados na rodovia. Um dos modelos matemáticos adotados era linear e os outros três eram multiplicativos (não lineares). As variáveis eram o tráfego médio diário, a largura da faixa de trânsito e a largura do acostamento. A análise estatística dos quatro modelos revelou que a correlação entre o número de acidentes, o tráfego e a geometria da rodovia é mais forte no modelo linear do que nos modelos multiplicativos, para VMD de 500 a 5000 veículos. Em outras situações de tráfego, todos os modelos mostraram-se igualmente adequados, contrariando estudos anteriores de ZEGEER et al (1987) e BOYCE¹⁷ et al. apud BENEKOHAL e HASHMI (1992), cuja conclusão foi que modelos multiplicativos eram melhores que os lineares, porém sem levar em consideração o VMD.

Diversos modelos que relacionam o número de acidentes com as características geométricas das estradas são tratados por PÉREZ PÉREZ (2002). A maioria destes modelos é obtida por regressão múltipla, e um deles é exponencial e envolve procedimentos probabilísticos.

Estudo desenvolvido por ZEGEER et al. (1992), envolvendo 10900 curvas horizontais de rodovias de duas faixas de tráfego, com os correspondentes

¹⁷ BOYCE, D. E., et al. **Cost-effective 3 R roadside safety policy for two-lane rural highways**. Springfield: Illinois Department of Transportation, 1988. v.3.

acidentes, geometria da curva, volume de tráfego e variáveis da faixa de domínio, relacionou a geometria das curvas com o número de acidentes ocorridos nelas. Com auxílio de modelagem estatística com múltiplas variáveis, revelou-se que acréscimos significativos do número de acidentes ocorrem em curvas de pequeno raio, curvas com menor largura, curvas sem transição (espiral) e em curvas com superelevação deficiente. Da mesma forma, alto volume de tráfego e curvas de grande desenvolvimento foram associadas com significativo aumento do número de acidentes.

Melhoramentos em curvas horizontais como aumento do raio de curvatura e/ou redução do ângulo central, alargamento das faixas de trânsito, alargamento de acostamentos pavimentados, adição de acostamentos não pavimentados, adição de transição (espiral) em curvas circulares e adequação da superelevação determinaram a redução da taxa de acidentes (ZEGEER et al., 1992).

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, tanto para estradas com duas faixas como as de mais de duas. Para estradas de duas faixas, os fatores de importância subsequentes são a largura da faixa de trânsito, as condições do pavimento (avaliado pelo *pavement serviceability index*), e o atrito. Para estradas multifaixas, os fatores importantes subsequentes ao volume de tráfego são a largura do canteiro central e o controle de acesso. Ou seja, para ambos os casos, segundo os autores, os dois maiores fatores que influem na taxa de acidentes são: o projeto geométrico, representado principalmente pela largura da

faixa de trânsito e controle de acessos, e as condições do pavimento, representadas principalmente pelo atrito, condições e tipo de pavimento.

Entretanto, quanto à possibilidade da adoção de outros métodos como a regressão linear múltipla, a regressão binomial negativa ou a regressão de Poisson, KARLAFTIS e GOLIAS (2002) enumeraram os cinco motivos seguintes, desaconselhando o seu uso:

Primeiro, tanto a regressão binomial negativa quanto a linear múltipla e regressão de Poisson, são procedimentos paramétricos que requerem para o modelo uma forma funcional conhecida com antecedência. Segundo, são facilmente e significativamente afetados através de *outliers*. Terceiro, não podem controlar bem dados perdidos. Quarto, não tratam satisfatoriamente variáveis discretas com mais de dois níveis. Quinto, não se trata de variáveis multicolineares independentes.

Estas observações podem ser entendidas como reconhecimento das vantagens de modelos obtidos por redes neurais (RN's). Em modelos obtidos por RN's não é necessário conhecer ou escolher previamente uma expressão matemática bem definida para modelo. Pode-se dizer também que um sistema baseado em RN's é mais robusto, ou seja, é menos afetado por ruídos ou dados perdidos.

Com o objetivo de investigar as propriedades estatísticas de modelos de regressão, que têm sido muito usados em estudos anteriores para desenvolver relações entre acidentes com veículos e projeto geométrico de rodovias, MIAOU e LUM (1993) estudaram dois modelos lineares (um aditivo e um multiplicativo) e dois modelos de Poisson (ambos multiplicativos). Foram identificadas limitações potenciais destes modelos, que ocorrem devido às suas características de distribuição subjacente (*underlying*), procedimentos de estimativas, forma funcional da taxa de acidentes, e sensibilidade para trechos curtos da rodovia. Ficou

demonstrado que os modelos de regressão linear convencional falham por não disporem de propriedade de distribuição aleatória, discreta, não negativa e tipicamente esporádica para descrever adequadamente eventos de acidentes com veículos na rodovia. Como resultado, os autores concluíram que estes modelos não são apropriados para se fazer estudos probabilísticos sobre acidentes com veículos e os testes estatísticos derivados daqueles modelos são questionáveis. Os modelos de Poisson possuem a maioria das propriedades estatísticas desejáveis para o desenvolvimento das relações, porém, se os dados de acidentes com veículos estiverem significativamente dispersos acima da sua média, estes modelos podem ter uma tendência acima ou abaixo da verossimilhança dos acidentes com veículos na rodovia.

A modelagem linear geral através da distribuição de Poisson tem a vantagem da simplicidade, pois a variância é igual à sua média. Ela foi usada por Greibe (2003) para relatar a frequência de acidentes para variáveis explicativas em 142 km de rodovias de ligação em área urbana e 1036 cruzamentos de rodovias urbanas. Eram disponíveis 1058 acidentes nas rodovias e 2534 acidentes nos cruzamentos. Apesar da dificuldade encontrada referente à dispersão dos dados para cima da curva (*overdispersion*) pelo fato da variância observada ser maior que a média, os modelos estimados para as rodovias de ligação foram capazes de explicar 60% dos acidentes. Os modelos para os cruzamentos tiveram valores mais baixos. A mais importante variável para todos os modelos foi o fluxo de tráfego de veículos. Nos modelos para as rodovias de ligação foram adotadas as variáveis: (1) fluxo de tráfego (veículos de passeio, veículos pesados, motociclistas e ciclistas); (2) extensão da rodovia; (3) limite de velocidade; (4) mão dupla ou mão única; (5) largura da rodovia; (6) medidas de redução de velocidade; (7) número de

cruzamentos secundários/saídas/ruas laterais; (8) ciclovias; (9) passeio; (10) canteiro central; (11) estacionamento; (12) ponto de ônibus e (13) uso da terra. As variáveis adotadas para os cruzamentos foram: (1) fluxo de tráfego (veículos de passeio, veículos pesados, motociclistas e ciclistas); (2) número de faixas de trânsito; (3) ilha de tráfego (canteiros); (4) faixa de conversão; (5) ciclovia; (6) sinalizada/ não sinalizada; (7) número de ramificações. O principal problema foi a forte correlação interna dos dados. Variáveis descrevendo fluxo de tráfego tendiam a se correlacionar fortemente com outras variáveis como largura da rodovia, número de faixas, etc. Portanto, o efeito de segurança proporcionado por uma variável explicativa isolada foi difícil de estimar, visto que ela pode ser afetada por outras variáveis do modelo.

Certas seções da rodovia podem apresentar “zero acidente” ao longo de um período de observação. Para distinguir seções verdadeiramente seguras, que apresentam probabilidade perto de “zero acidente”, daquelas que são inseguras, mas não apresentaram acidentes ao longo do período de observação, SHANKAR et al. (1997) realizaram uma investigação empírica dentro do processo de contagem de zero-alterado. As tradicionais distribuições de Poisson e a binomial negativo não apresentaram essa esperada distinção, pois poderiam produzir estimativas de coeficientes influenciados devido à preponderância da observação de “zero acidente”. Os processos de probabilidade zero alterado, tais como a distribuição de Poisson zero-inflado e a binomial negativo zero-inflado foram examinadas para propor modelos de frequência de acidentes por classe funcional da rodovia e localização geográfica. Seus resultados mostraram-se promissores e com grande flexibilidade para tratar de situações que envolvam frequência de acidentes em rodovias, onde em algumas seções ocorram “zero acidente” e em outras se

observem acidentes. Estes modelos podem possibilitar aos técnicos melhor isolar fatores de projeto que contribuem para a ocorrência de acidentes e também proporcionam um adicional discernimento para a seleção de variáveis que determinam a relativa probabilidade de ocorrência de acidentes em rodovias seguras versus rodovias inseguras.

SHANKAR et al. (1995) estudaram a frequência de ocorrência de acidentes em rodovias com base em análise multivariada da geometria da rodovia (alinhamentos horizontal e vertical), condições do tempo e outros efeitos sazonais, com auxílio de modelo binomial negativo. O trecho de rodovia estudado foi da Interstate 90 dos EUA, e as variáveis relacionadas com as condições do tempo foram referentes à chuva e neve, onde foram consideradas para ambas as ocorrências a média mensal de precipitação, a máxima altura mensal de precipitação e o número de dias com chuva (ou neve) no mês. O volume de tráfego também contribuiu como variável do modelo, porém a precipitação, a temperatura ambiente e o comportamento dos motoristas foram citados, mas não foram empregados.

Modelos binomial negativo e binomial negativo estendido foram adotados por VOGT e BARED (1997) para estudar a frequência de acidentes em rodovias rurais de duas faixas de trânsito e interseções de três e quatro “ramos”, com controle de parada nos ramos secundários, em Minnesota e Washington, EUA. O modelo binomial negativo estendido é um refinamento dos modelos de Poisson e binomial negativo, onde os segmentos de rodovia são subdivididos em sub-seções e os números médios de acidentes são estimados para cada uma delas, de acordo com fórmulas apresentados por VOGT e BARED (1997), cujos coeficientes são mantidos invariáveis de sub-seção para sub-seção. Então, a somatória ponderada das médias de cada sub-seção produz a média esperada para toda a seção. As variáveis

utilizadas foram tráfego, alinhamentos horizontal e vertical, larguras de faixa de trânsito e de acostamento, avaliação de perigo à margem da rodovia, canalização e número de acessos a garagens. Os autores observaram uma limitação do modelo devido à omissão de variáveis como distância de visibilidade, volume de conversões nas interseções, alinhamento da rodovia secundária, variáveis climáticas locais e variações sazonais no clima e tráfego. Quanto à distância de visibilidade, foi considerado um atenuante, pois em parte ela é representada pelo alinhamento horizontal e vertical. Os modelos adotados produziram valores de R^2 de 0,42 a 0,73, e parâmetros de superdispersão (K) de 0,20 a 0,51. Os autores concluíram que acidentes em rodovias dependem significativamente da maioria das variáveis coletadas, enquanto que acidentes nas intersecções dependem primordialmente do tráfego. Recomendou-se o desenvolvimento de fatores de ajuste para diferentes regiões e condições de tempo, e do uso de modelos de regressão binomial negativa estendida.

O modelo binomial negativo também foi usado por ABDEL-ATY e RADWAN (2000) para descrever a freqüência de ocorrência de acidentes e de envolvimento do condutor, conforme o sexo e idade. Esses autores ao considerarem, com base nas pesquisas mais recentes, que a regressão linear múltipla tem propriedades estatísticas indesejáveis, quando aplicada a análises de acidentes, adotaram inicialmente o modelo de Poisson. Posteriormente, este foi rejeitado porque a média e a variância das variáveis dependentes resultavam diferentes, indicando substancial superdispersão nos resultados.

Desta forma, adotando a distribuição binomial negativa, aqueles autores desenvolveram cinco modelos, para atender à questão de envolvimento em acidentes de cada tipo de motorista, os quais foram separados em sexo masculino

ou feminino e motoristas jovens, de média idade e idosos. Os resultados mostraram que a probabilidade de envolvimento em acidentes aumenta na presença dos seguintes fatores: alto volume de tráfego, alta velocidade, faixa de trânsito estreita, grande número de faixas de trânsito, trechos urbanos da rodovia, acostamentos estreitos, e canteiro central reduzido. Porém, cada um destes fatores tem influência significativa somente em certos tipos de motorista descritos acima. Os modelos ilustraram a significância das seguintes variáveis de entrada: volume de tráfego médio diário anual (VMD), grau das curvas horizontais, larguras das faixas de trânsito, dos acostamentos e dos canteiros centrais, trecho urbano ou rural da rodovia, extensão do trecho da rodovia e frequência da ocorrência de acidentes. O grau das curvas horizontais foi uma variável importante em todos os modelos desenvolvidos.

As distribuições de Poisson e a Binomial Negativa têm sido preferidas pelos pesquisadores de modelos estatísticos, em função das vantagens que apresentam em relação aos modelos lineares. Ainda, a distribuição de Poisson tem uma característica em que a média e a variância são obrigatoriamente iguais. Uma superdispersão quando a variância é maior que a média, ou uma subdispersão quando a variância é menor que a média, levam a estimativas alteradas para os coeficientes.

Recentemente, estão sendo estudados novos modelos que levam em conta o efeito interativo entre as diversas variáveis relacionadas com o traçado em planta, perfil e com as seções transversais (PÉREZ PÉREZ, 2002). Mesmo assim, a grande dificuldade da determinação dos modelos estatísticos é justamente a escolha do modelo, pois mesmo com o correto ajuste dos seus parâmetros, não é possível estabelecer a devida interação entre as variáveis consideradas no mesmo. E

também existe a possibilidade de que variáveis importantes não tenham sido consideradas em um certo modelo, dificultando ainda mais a tarefa de se chegar a uma modelagem ideal para este caso.

2.5 PREVISÃO DE ACIDENTES EM RODOVIAS UTILIZANDO REDES NEURAIS

Baseada no funcionamento do cérebro, uma rede neural é composta por conjuntos de neurônios matemáticos, arranjados em camadas, e conectados uns aos outros por sinapses. A cada sinapse existe um peso correspondente. A maneira na qual os neurônios são arranjados e conectados é chamada arquitetura da rede.

O treinamento de uma rede neural consiste em se chegar aos valores ideais dos pesos sinápticos, através de um processo iterativo e com auxílio de um algoritmo matemático, de forma que a resposta da rede seja adequada ou esperada. A descrição de cada um dos elementos básicos das redes neurais, bem como seu funcionamento detalhado, pode ser encontrado na literatura (HAYKIN, 2001).

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).

Um método de reconhecimento de padrões por redes neurais artificiais foi aplicado por YANG e QIAO (1998) para classificar o fluxo de tráfego em rodovias da China.

Mais recentemente, pode ser citada também a previsão de incidentes e de acidentes em rodovias através de modelos baseados em RN's.

Considerando os incidentes de tráfego como sendo não aleatórios e não recorrentes e ainda que prejudicam o fluxo normal dos veículos, ADELI e KARIM (2000) desenvolveram um modelo de detecção de incidentes de tráfego em auto-estradas, utilizando uma técnica de redes neurais que reúne a lógica *fuzzy* e a teoria *wavelet*. O resultado foi um algoritmo eficiente, seguro e robusto para solucionar o problema de detecção de incidentes de tráfego em rodovias. Com estes requisitos, foi possível eliminar as flutuações indesejáveis dos sensores de tráfego (ruído), evitando assim alarmes falsos de incidentes. Em trechos de rodovias que atravessam zonas urbanas, estima-se que 60% das horas de atraso das viagens dos usuários são causadas por incidentes de tráfego (LINDLEY¹⁸ apud ADELI e KARIM, 2000).

O trabalho de ABDULHAI e RITCHIE (1999) tratou da obtenção de um algoritmo de detecção de incidentes em rodovias, com características de universalidade e transferibilidade melhoradas através da aplicação de redes neurais probabilísticas denominadas PNN (*probabilistic neural network*), baseadas na regra de Bayes e que usam a distância euclidiana para definir a proximidade dos diferentes padrões. Foi testada ainda a aplicação de um outro tipo de rede neural probabilística, chamada de PNN-2, que usa o conceito de distância estatística entre

¹⁸ LINDLEY, J. A. Urban freeway congestion: quantification of the problem and effectiveness of potential solutions. *ITE J.*, 57(1), 27-32, 1987.

padrões, ao invés de distância euclidiana.

Em adição ao grande número de incidentes simulados, foi utilizada uma quantidade considerável de dados de incidentes reais oriundos de duas rodovias interestaduais americanas (I-880 e I-35W), para comparativamente avaliar o desempenho e a transferibilidade de diferentes algoritmos, incluindo a PNN.

Os resultados experimentais mostraram que o desempenho da PNN-2 é similar ao das redes de arquitetura com multicamadas alimentadas para a frente (MLF – *multilayer feedforward*), utilizadas em trabalhos anteriores, com intuito de apresentar desempenho superior em detecção de incidentes. O desempenho da PNN ficou abaixo da MLF. Porém, a PNN e a PNN-2 foram significativamente mais rápidas de serem treinadas. Esta qualidade, juntamente com alto desempenho, é universalmente exigida de um algoritmo de detecção de incidentes, segundo os autores.

Além disso, a PNN e a PNN-2 podem utilizar a capacidade de aprendizado em tempo real para produzir algoritmo de detecção de incidentes transferível, sem a necessidade de retreinamento fora de serviço, em outro local. Os resultados de testes com a PNN-2 em três rodovias dos EUA indicaram que seu desempenho satisfaz as exigências estabelecidas pela pesquisa, realizada com diversos *Traffic Management Centers* dos EUA.

Conforme ISHAK e AL-DEEK (1999), os sistemas inteligentes de transporte necessitam de dispositivo automático de detecção de incidentes. Muitos dos algoritmos desenvolvidos nas últimas décadas não têm mostrado o desempenho desejado para taxa de detecção e taxa de falsos alarmes. Recentemente, as redes neurais artificiais têm sido introduzidas para detecção de incidentes e têm mostrado sucesso em relação aos algoritmos tradicionais. Estes autores exploraram dois

modelos obtidos através de redes neurais, sendo um deles o tradicional MLF, com aprendizado supervisionado e o algoritmo *Fuzzy Adaptive Resonance Theory* (*Fuzzy ART*), com aprendizado não supervisionado. Este estudo foi conduzido no corredor central da I-4, em Orlando (EUA), usando dados reais coletados.

Baseado no treinamento e nos resultados de testes, o algoritmo *Fuzzy ART* alcançou melhor desempenho, exceto para valores baixos de taxa de detecção e de taxas de alarme falso, quando comparados com os resultados da rede MLF. Para implementação do algoritmo *Fuzzy ART* foi recomendado que um fator de persistência igual a 2 e um parâmetro de vigilância igual a 0,95 fossem adotados. O desempenho das redes MLF e *Fuzzy ART* melhoraram à medida que o tamanho do modelo de tráfego aumentava. Uma descoberta interessante foi que, quando comparados com modelos de ocupação, que se baseiam na quantidade de veículos existentes no segmento de rodovia considerado, modelos de velocidade, que se baseiam na velocidade dos veículos, constantemente produziram melhores resultados, o que indica que incidentes podem ser melhor detectados com modelos de velocidade do que com modelos de ocupação. Os resultados da rede MLF e da *Fuzzy ART* também sugerem que a combinação de ocupação e velocidade na representação do padrão de tráfego leva a um melhor desempenho dos modelos (ISHAK e AL-DEEK, 1999),

AWAD e JANSON (1997) usaram três tipos diferentes de modelagem para explicar acidentes com caminhões em acessos de interseções a auto-estradas, no Estado de Washington. Os estudos se referiram a um período de 27 meses e os três modelos adotados foram obtidos por regressão linear, redes neurais e um híbrido combinando redes neurais e lógica *fuzzy*. O modelo linear foi capaz de prever a frequência de acidentes que caíam dentro do desvio padrão da média global da

variável dependente. Entretanto, o coeficiente de determinação (r^2) ficou muito baixo em todos os casos. Os outros modelos obtidos por rede neural e lógica *fuzzy* apresentaram um alto nível de desempenho em identificar diferentes padrões de acidentes durante a fase de treinamento, e apresentaram um melhor ajuste quando comparados com o modelo linear. Entretanto, a habilidade destes dois modelos em prever acidentes na fase de teste, com dados que não foram incluídos inicialmente no treinamento, apresentou resultados insatisfatórios, segundo a avaliação dos autores. Para avaliar o desempenho dos três modelos, os autores adotaram a raiz quadrada do erro médio quadrático (rmse – raiz quadrada do *mean squared error*). O modelo linear teve o pior rmse, e o de lógica *fuzzy* apresentou o melhor rmse em três dos quatro tipos de acessos estudados. Entretanto, no trabalho de AWAD e JANSON (1997) não foram descritos a arquitetura e o tipo de redes neurais adotadas.

3 DESENVOLVIMENTO DE MODELO PARA PREVISÃO DE ACIDENTES EM CURVAS RODOVIÁRIAS

3.1 INTRODUÇÃO

Um modelo matemático visando prever o número de acidentes que possam ocorrer em uma curva, em função de seus parâmetros geométricos, pode ser muito útil em projetos de rodovias. Uma ou mais características geométricas de uma curva, tais como raio, ângulo central, desenvolvimento, comprimento de transição, superelevação e outros, podem ser alteradas de maneira a reduzir o número de acidentes previsto para esta curva. Um modelo de previsão de acidentes pode ser uma ferramenta que indica ao projetista o nível de segurança da curva que está sendo projetada. Também podem ser analisadas curvas já existentes através deste tipo de modelo, para que sejam propostos melhoramentos em algumas de suas características geométricas, tornando-as também mais seguras.

Diversas técnicas foram utilizadas neste trabalho para construir modelos de previsão do número de acidentes em curvas horizontais rodoviárias, tais como redes neurais e estatísticas. Dentre os modelos estatísticos, foram adotados regressão linear múltipla, e o modelo de Poisson.

3.2 CONJUNTO DE DADOS

Foram escolhidos para a pesquisa 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 com 230,8 km de extensão e 344 curvas. O segundo segmento é a BR-277, trecho Relógio – Três Pinheiros com 100,9 km de extensão e 77 curvas. 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.

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. Também deve ser ressaltado que, para ligar a pista duplicada com a pista simples existente, foram implantadas mais 4 novas curvas. Estas últimas foram desprezadas neste trabalho, pois como eram novas, não apresentavam histórico de acidentes anterior à duplicação.

Por uma questão de facilidade de manuseio dos dados coletados, a BR-376 foi subdividida em dois trechos: Apucarana – Ortigueira com 105,9 km de extensão e 166 curvas, e Ortigueira – Caetano, com 124,9 km de extensão e 178 curvas. Pela mesma razão, a BR-277 também foi subdividida em dois trechos: Relógio – Guarapuava com 45,95 km e 56 curvas, e Guarapuava – Três Pinheiros com 54,95 km e 21 curvas. A figura 1 mostra um mapa do estado do Paraná com a localização dos trechos de rodovias e cidades envolvidas neste trabalho.



FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DOS TRECHOS ESTUDADOS E CIDADES

No segmento Apucarana – Ortigueira da BR-376, houve 835 acidentes em curvas no período de cinco anos e meio, cujos dados foram coletados junto à 2ª Companhia de Polícia Rodoviária Estadual, sediada em Londrina, que fiscaliza o referido segmento. Observou-se que, nas 25 curvas do segmento de 12,5 km duplicado a partir de janeiro de 2001, ocorreram também, a partir desta data até junho de 2002, 47 acidentes que não estão sendo considerados pelos motivos já descritos acima. Na seqüência da BR-376, segmento Ortigueira – Caetano, ocorreram no período considerado, 1637 acidentes em curvas, cujos dados foram coletados junto à 5ª Companhia de Polícia Rodoviária Estadual sediada em Ponta Grossa, que é responsável pela fiscalização deste segmento. Finalmente no trecho Relógio – Três Pinheiros da BR-277 foram coletados dados de 290 acidentes em curvas, ocorridos no mesmo período, junto à Delegacia 7/3 da Polícia Rodoviária Federal sediada em Ponta Grossa, que fiscaliza este segmento.

A tabela 4 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:

TABELA 4 - RESUMO DOS TRECHOS ESTUDADOS

Rodovia	Trecho	Extensão (km)	Nº de curvas	Nº de acidentes	Policiamento	Concessionária
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		

Para cada acidente atendido, a Polícia Rodoviária responsável pelo trecho elabora um boletim de ocorrência (BO). Modelos de BO's das Polícias Rodoviárias Federal e Estadual podem ser observados no Anexo 1. Para possibilitar a utilização dos dados de acidentes neste trabalho, como os BO's são documentos internos e não devem ser retirados dos órgãos policiais onde foram confeccionados, o conteúdo dos 2762 BO's (2762 acidentes) foram transcritos para 2762 planilhas, cada uma denominada de Planilha de Acidente.

Cada Planilha de Acidente contém as características do acidente no que diz respeito a: (1) classificação do acidente conforme suas vítimas (sem vítimas, com

feridos leves, com feridos graves e com morte); (2) existência de sinalização vertical (sim ou não); (3) condições da sinalização horizontal (boa ou má); (4) condições do tempo (bom, chuva, neblina ou outro, onde se inclui nublado e temporal); (5) condições da pista (seca, molhada ou outra, onde se inclui oleosa, com areia, com objetos e fumaça); (6) condições do acostamento (bom, mau ou inexistente); (7) condições de luz (dia, noite e outro, onde se incluem contra o sol, crepúsculo, luar, via iluminada e via não iluminada); (8) situação do motorista e/ou pedestre (normal, alcoolizado ou outro onde se inclui doente, com sono, drogado e moribundo); (9) situação do veículo (normal e deficiente). Um modelo de Planilha de Acidente pode ser observada no Anexo 2.

Após a organização das informações a respeito dos acidentes, como descrita no parágrafo anterior, partiu-se para a montagem de uma planilha eletrônica denominada Planilha 1, que apresenta em cada linha, as características de uma determinada curva e o resumo dos acidentes ocorridos na mesma curva. Desta forma, a Planilha 1 contém, para cada curva, as seguintes informações:

- a) número da curva: cuja seqüência iniciou em Apucarana, progredindo até Caetano, continuou em Relógio e finalizou em Três Pinheiros com o nº 421.
- b) local: que se refere à localização da curva através do quilômetro da rodovia;
- c) raio: que é o raio de curvatura da curva circular ou do trecho circular se a curva for de transição;
- d) ângulo central: é o ângulo onde cada lado é perpendicular à cada uma das tangentes e interceptam respectivamente os pontos de início e fim

da curva horizontal. O ângulo central tem o mesmo valor que o ângulo externo formado pelas tangentes (deflexão das tangentes);

- e) desenvolvimento total: é o comprimento total da curva horizontal. Se a curva for de transição, inclui o comprimento do trecho circular e o comprimento das duas espirais;
- f) comprimento de transição: é o comprimento de cada uma das espirais usadas para fazer a transição com raio variável, da tangente para o trecho circular da curva horizontal;
- g) grau da curva (G_{20}): é o ângulo central correspondente a uma determinada corda. Neste trabalho, o grau de cada curva foi calculado para a corda correspondente de 20 metros;
- h) $V_{85} (1)$: velocidade operacional em função de G_{20} , válida para qualquer largura de faixa de trânsito, que é a parte da pista que permite a circulação de veículos, com segurança, em fila única. $V_{85} (1)$ foi calculado a partir da equação (1) apresentada no item 2.1 desta dissertação;
- i) $V_{85} (2)$: velocidade operacional em função de G_{20} , válida para largura de faixa de trânsito de 3,60 metros, calculada a partir da equação (2) apresentada no item 2.1 desta dissertação;
- j) média das velocidades dos itens “h” e “i”;
- k) velocidade diretriz: é a velocidade básica para a dedução das características de projeto da rodovia, e pode ser considerada como a velocidade máxima com que se pode percorrer toda a rodovia com segurança;

- l) superelevação teórica: é a superelevação calculada para a curva, em função da velocidade diretriz, do raio mínimo e da superelevação máxima admissível, para a rodovia;
- m) superelevação existente: é a superelevação medida em cada curva através de levantamento topográfico;
- n) tráfego (VMD): é o volume médio diário anual de tráfego misto (automóveis, ônibus e caminhões) que trafega no trecho a que pertence a curva considerada;
- o) número de acidentes: corresponde ao número total dos acidentes distribuídos em 28 colunas da Planilha 1, de forma a retratar as condições dos acidentes ocorridos na mesma curva. Estes números foram obtidos a partir da contabilização dos acidentes, correspondentes a cada curva considerada, realizada a partir das 2762 Planilhas de Acidentes descritas anteriormente.

Desta forma, na Planilha 1, cada linha contém os dados de uma curva (itens “a” a “n”), e os dados de todos os acidentes (item “o”) ocorridos na mesma, no período de tempo considerado. A Planilha 1, preenchida com os dados das 20 primeiras curvas e respectivos acidentes, pode ser observada no Anexo 3.

Posteriormente, para possibilitar o processamento dos dados com a inclusão da variável condição do tempo (CT), cada linha da Planilha 1, correspondente a uma determinada curva, foi desdobrada em duas, originando uma nova planilha, denominada Planilha 2. Com este desdobramento, cada curva passou a corresponder a duas linhas (dois casos) onde suas características geométricas, de velocidade e de tráfego, que foram adotadas como variáveis de entrada dos modelos, se repetem nas duas linhas. Os demais dados de curvas constantes na

Planilha 1, e que não foram usados como variáveis de entrada nos modelos, não foram transferidos para a Planilha 2.

Quanto ao número de acidentes registrados inicialmente nas 28 colunas da Planilha 1, somente foram transferidos para a Planilha 2, o número de acidentes correspondentes à condição do tempo. Na primeira linha de cada curva na Planilha 2, foi registrado o número de acidentes na condição de tempo bom e, na segunda linha da mesma curva, o número de acidentes na condição de tempo com chuva, neblina, nublado ou temporal. Estes números de acidentes foram obtidos das 4 colunas referentes à condição de tempo, dentre as 28 colunas (citadas anteriormente no item "o") disponíveis na Planilha 1. A Planilha 2 pode ser observada, preenchida com os dados das 20 primeiras curvas e respectivos acidentes, no Anexo 4.

O máximo número de acidentes ocorridos em uma mesma curva foi 62 (curva nº 305), sendo 17 acidentes em condições de tempo bom, 42 acidentes em condições de tempo chuvoso e 3 acidentes em outras condições. Portanto, na Planilha 2, a curva nº 305 apresentou nas duas linhas correspondentes, respectivamente 17 e 45 acidentes.

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 velocidade diretriz foi considerada a de projeto, que é 80 km/h ou 60 km/h, conforme o local. Porém, nos segmentos cuja velocidade está atualmente

regulamentada em 110 km/h, esta foi adotada, visto que a geometria da rodovia nestes locais é compatível com a velocidade.

Conforme o item 2.1 desta dissertação, onde a velocidade operacional da rodovia é considerada como aquela correspondente ao 85º percentil na distribuição da frequência das velocidades (V_{85}), e representa a velocidade real dos veículos melhor do que a velocidade diretriz, esta foi calculada para cada curva através das equações (1) e (2) apresentadas no mesmo item 2.1 e inseridas na Planilha 1, conforme descrito anteriormente nos itens “h” e “i”.

A largura de projeto das faixas de trânsito dos trechos em estudo é 3,50 m. Porém, algumas curvas, normalmente aquelas de menores raios de curvatura, sofreram ao longo do tempo de operação da rodovia uma ampliação da largura, avançando nos acostamentos. Os resultados de V_{85} calculados pelas equações (1) e (2) ficaram próximos entre si, e por este motivo foi adotada como V_{85} a média entre os resultados das equações (1) e (2), para cada curva.

A superelevação de uma curva, que é a declividade transversal da pista com caimento para o lado interno da curva, foi calculada para cada curva. Porém, os trechos das rodovias estudadas são muito antigos e algumas curvas apresentam raio de curvatura inferior ao previsto pelas normas atuais. Como a superelevação teórica é função também do raio da curva e do raio mínimo para a velocidade diretriz correspondente, o cálculo desta resulta em número negativo quando o raio da curva é menor que o raio mínimo. Devido a este fato, o dado superelevação teórica da curva ficou incoerente para as curvas de raio menor que o mínimo, e duvidoso para as curvas de raio próximo (porém maior) que o mínimo. Assim, a comparação entre as superelevações teórica e executada ficou prejudicada e optou-se por não utilizar a superelevação teórica das curvas existentes. Evidentemente, quando for analisada

uma curva ainda em fase de projeto, deverá ser considerada a superelevação teórica.

A superelevação existente foi medida em cada curva no trecho, e os dados 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.

Para a BR-376, trecho Apucarana – Caetano, a Concessionária Rodonorte forneceu a superelevação existente de cada curva, que foi determinada com base em dados de nivelamento e largura da seção transversal próxima ao ponto médio do desenvolvimento da curva. A equipe de topografia que executou este serviço tomou o cuidado de evitar a escolha de seções com deformações localizadas, o que alteraria a declividade e por conseqüência prejudicaria o dado superelevação.

A concessionária Rodonorte também forneceu os dados de tráfego deste mesmo trecho da BR-376. Nos sub-trechos Apucarana - Imbaú, e Porteira Grande – Caetano, foram utilizados dados de tráfego das Praças de Pedágio, porém como no sub-trecho Imbaú - Porteira Grande não existe nenhuma praça de pedágio e os seus dois extremos são interseções, os volumes de tráfego obtidos das praças adjacentes não poderiam ser utilizados. Neste caso, foi adotado o resultado de uma contagem de tráfego realizada pela concessionária Rodonorte, de acordo com as normas do DNIT (antigo DNER), realizada entre os anos de 2001 e 2002.

Para a BR-277 no trecho Relógio – Guarapuava, a concessionária Caminhos do Paraná forneceu os dados de superelevação existente que anteriormente já haviam sido cadastrados por ela. Os dados de tráfego, oriundos da Praça de Pedágio instalada no km 302,6, foram fornecidos pela empresa Consórcio Vega Conspel, consultora da concessionária Caminhos do Paraná. O Consórcio

Veja Conspel é formado pelas empresas Vega Engenharia e Consultoria Ltda e Conspel Consultoria e Projetos de Engenharia Ltda.

Para a BR-277, trecho Guarapuava – Três Pinheiros, a empresa Dalcon Engenharia de Consultoria Ltda, consultora da concessionária Rodovia das Cataratas, forneceu os dados de nivelamento das seções transversais dos pontos médios de cada curva. Com as cotas e larguras da pista nas curvas, constantes neste levantamento, a superelevação existente foi calculada. Os dados de tráfego também foram fornecidos pela mesma empresa consultora e foram originados da Praça de Pedágio localizada no km 388,2.

Todos os dados de volume de tráfego que foram obtidos de Praças de Pedágio resultaram de registros efetuados pelas concessionárias no período de julho de 1998 até novembro ou dezembro de 2002. A partir destes dados pôde-se determinar o volume médio diário anual de tráfego misto (VMD), de 1998 até 2002. Em todas as Praças de Pedágio, o VMD atingiu valores máximos no ano de 1999 e valores mínimos no ano de 2000 ou 2001. Em relação aos valores de pico no ano de 1999, a oscilação máxima atingida pelo VMD de 1998 a 2002 nestes cinco locais de contagem variou de 6,5 % a 8,7 % (ver tabela 5). Cada uma das cinco Praças de Pedágio gerou um VMD médio no período entre 1998 e 2002 e foram relacionadas com um segmento de rodovia. Assim, o volume de tráfego transferido para a Planilha 1, nas curvas existentes em cada um destes segmentos, foi a média dos VMD de cada Praça.

Como a variação dos volumes de tráfego observado em todas as Praças de Pedágio foi pequena, tanto é que foi adotado o VMD médio de cada trecho, a mesma média também foi considerada para o ano de 1997, pois não havia dados de tráfego disponíveis naquele ano. A tabela 5 fornece o VMD de cada Praça de

Pedágio entre os anos de 1998 até 2002, bem como a média destes valores. A tabela 6 fornece a localização das principais interseções de cada trecho, bem como das Praças de Pedágio.

TABELA 5 - VMD POR ANO E POR PRAÇA DE PEDÁGIO

Rodovia	Local da Praça de pedágio	Ano / VMD					
		1998	1999	2000	2001	2002	Média
BR-376	Km 321 (Mauá)	4014	4165	3916	3908	4099	4021
BR-376	Km 376 (Imbaú)	4037	4197	3937	3862	4065	4020
BR-376	Km 455 (Tibagi)	4850	4962	4615	4564	4799	4758
BR-277	Km 302,6 (4.1)	4473	4697	4409	4638	4658	4575
BR-277	Km 388,2 (lot.03)	4225	4347	4052	4062	4123	4162

TABELA 6 - LOCALIZAÇÃO DAS INTERSEÇÕES E DAS PRAÇAS DE PEDÁGIO

Rodovia	Discriminação	Local
BR-376	Apucarana	km 245,0
BR-376	Mauá	km 291,0
BR-376	Início da duplicação	km 299,0
BR-376	Fim da duplicação	km 308,0
BR-376	Praça de Pedágio - Mauá	km 321,0
BR-376	Ortigueira	km 350,9
BR-376	Praça de Pedágio - Imbaú	km 376,0
BR-376	Imbaú	km 385,5
BR-376	Porteira Grande (p/ Reserva)	km 410,15
BR-376	Praça de Pedágio - Tibagi	km 455,0
BR-376	Caetano	km 475,0
BR-277	Relógio	km 298,05
BR-277	Praça de Pedágio – 4.1	km 302,6
BR-277	Guarapuava	km 344,0
BR-277	Praça de Pedágio – lot. 03	km 388,2
BR-277	Três Pinheiros	km 398,96

3.3 MODELO UTILIZANDO REDES NEURAIS

3.3.1 Técnica de redes neurais

As redes neurais artificiais, ou simplesmente redes neurais (RN's), foram criadas com inspiração no funcionamento do cérebro humano. Hoje, podem ser consideradas como uma metodologia estatística capaz de resolver com sucesso problemas relevantes de engenharia e de outras áreas (DYMINSKI, 2000).

HAYKIN (2001) define RN como sendo um processador maciço e paralelamente distribuído, constituído de unidades de processamento simples, que têm a propensão natural para armazenar conhecimento experimental, e aplicá-lo para resolver problemas. A RN possui importante capacidade de generalização do conhecimento, ou seja, pode resolver problemas de mesma natureza, porém não necessariamente idênticos aos que foram apresentados durante a fase de aquisição de conhecimento, de maneira satisfatória. De forma semelhante ao cérebro, o conhecimento é adquirido pela rede a partir de seu ambiente através de um processo de aprendizagem, e as forças de conexão entre neurônios, conhecidas como pesos sinápticos, são utilizadas para armazenar o conhecimento adquirido.

As unidades de processamento simples de uma RN são denominadas de neurônios. O diagrama em bloco da Figura 2 mostra um modelo de um neurônio k , identificando os três elementos básicos para o projeto de redes neurais: um conjunto de sinapses ou elos de conexão, cada uma caracterizada por um peso ou força própria (w_{ki}); um somador para somar os sinais de entrada, ponderado pelas respectivas sinapses do neurônio, constituindo um combinador linear; e uma função de ativação (φ) para restringir o intervalo permissível de amplitude do sinal de saída

do neurônio a um valor finito. Ainda na Figura 2, podem ser observadas as entradas (x_i) do neurônio e o resultado do processamento neuronal, a saída (y_k), bem como o sinal de *bias* b_k .

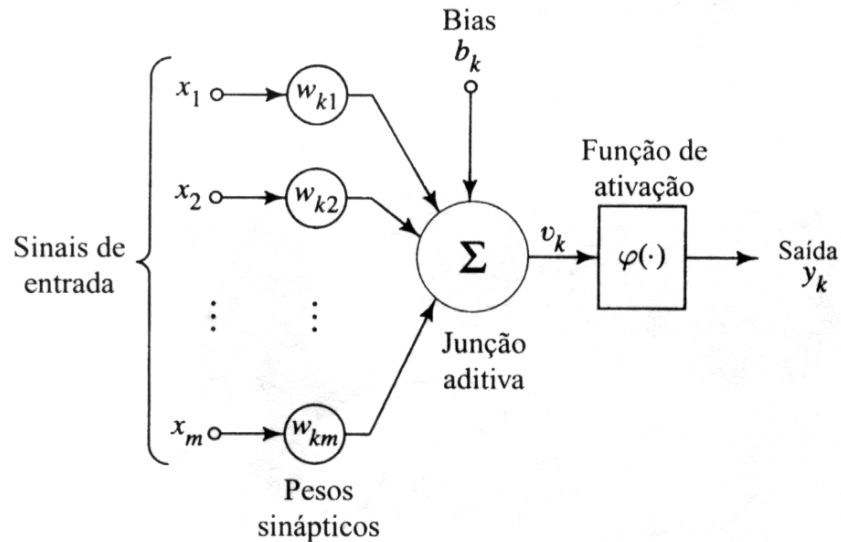


FIGURA 2 - MODELO NÃO-LINEAR DE UM NEURÔNIO
 FONTE: (HAYKIN, 2001)

O neurônio pode ser representado matematicamente pelas seguintes equações:

$$u_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} x_j \quad (5)$$

$$y_k = \varphi(u_k + b_k) \quad (6)$$

$$y_k = \varphi(v_k) \quad (7)$$

A função de ativação de cada neurônio pode ser do tipo degrau, linear ou sigmoideal, e suas representação gráfica podem ser observadas na Figura 3:

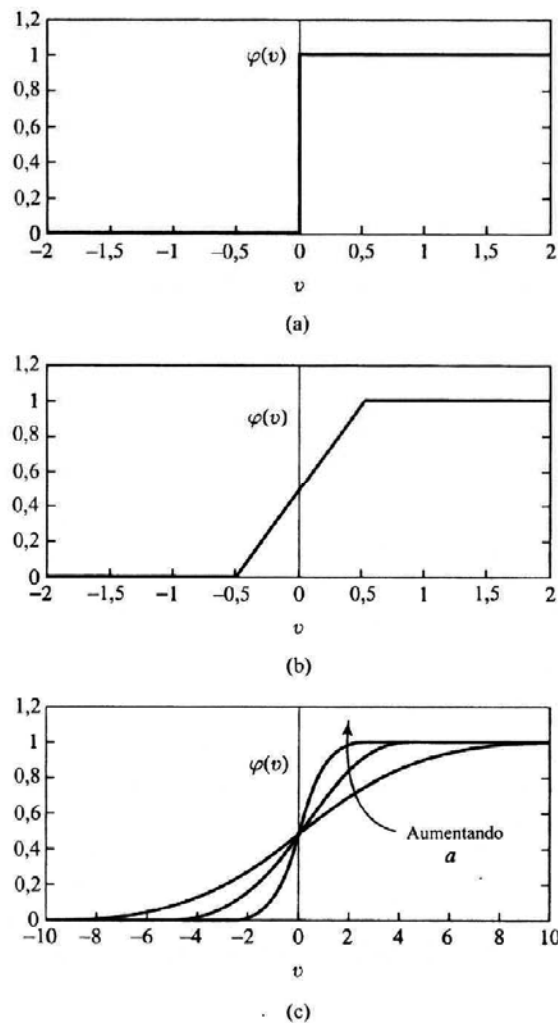


FIGURA 3 - FUNÇÕES DE ATIVAÇÃO DOS NEURÔNIOS: (A) DEGRAU; (B) LINEAR, (C) SIGMOIDAL
 FONTE: (HAYKIN, 2001)

As equações (8), (9), (10) e (11) são correspondentes aos diversos tipos de funções de ativação dos neurônios (HAYKIN, 2001):

a) Função “degrau” ou threshold: $\varphi(v) = \begin{cases} 1 & \text{se } v \geq 0 \\ 0 & \text{se } v < 0 \end{cases}$ (8)

b) Função linear: $\varphi(v) = \alpha v$ (9)

onde α é o coeficiente angular, constante, que limita os valores de φ entre 0 e 1 ou -1 e 1.

c) Função sigmoidal: pode assumir as seguintes formas:

c.1) função logística:
$$\varphi(v) = \frac{1}{1 + e^{-av}} \quad (10)$$

c.2) função tangente hiperbólica:
$$\varphi(v) = \tanh(av) = \frac{e^{av} - e^{-av}}{e^{av} + e^{-av}} \quad (11)$$

onde a deve ser uma constante que limita os valores de φ entre 0 e 1 ou -1 e 1.

A maneira como os neurônios encontram-se arranjados em camadas e o conjunto de suas respectivas conexões definem a arquitetura da RN. Segundo HAYKIN (2001), existem três classes de arquiteturas de rede fundamentalmente diferentes:

- a) redes alimentadas adiante com camada única (*feedforward*): a designação “camada única” se refere à camada de saída de nós computacionais (neurônios); a camada de entrada de nós de fonte não é considerada por não ser realizada qualquer computação;
- b) redes alimentadas adiante com múltiplas camadas (*feedforward*): estas se distinguem da primeira classe pela presença de uma ou mais camadas ocultas, cujos nós computacionais são chamados de neurônios ocultos ou unidades ocultas, os quais têm função de intervir entre a entrada externa e a camada de saída da rede;
- c) redes recorrentes: distinguem-se das outras duas classes por ter pelo menos um laço de realimentação.

Neste trabalho, as RN's utilizadas foram do tipo multicamadas *feedforward* (MLF), pois as informações introduzidas nas mesmas foram processadas em uma

única direção (para a frente, ou adiante na rede), até alcançarem a camada de saída, sem realimentação. O número de camadas ocultas adotado foi de uma a três, além da camada de entrada e da de saída. Este é o tipo de rede mais utilizado em aplicações de diversas áreas da engenharia (DYMINSKI, 2000).

A Figura 4 mostra um exemplo de uma rede MLF com uma camada de entrada com 4 nós, duas camadas internas ocultas localizadas entre os nós de entrada e a camada de saída, sendo a primeira delas com 5 neurônios e a segunda com 3, e a camada de saída com 2 neurônios.

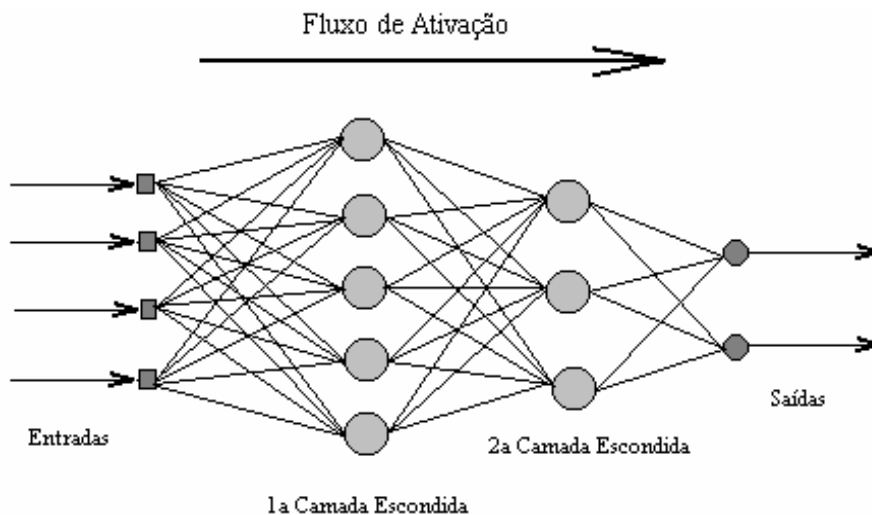


FIGURA 4 - EXEMPLO DE REDE NEURAL MULTI-CAMADAS *FEEDFORWARD*, TOTALMENTE CONECTADA
FONTE: (DYMINSKI, 2000)

Redes neurais são projetadas para desenvolver modelos matemáticos que conectam parâmetros de entrada com soluções, sem a necessidade de se definirem previamente todos os parâmetros internos do modelo.

Após escolhido o tipo e a arquitetura da rede a ser utilizada na construção do modelo, definidas as variáveis de entrada da rede e as saídas que se quer obter e

coletados os dados referentes ao fenômeno a ser modelado, pode-se iniciar o processo de treinamento da rede neural.

Inicialmente, deve-se dividir o conjunto de dados em, pelo menos, um conjunto de treinamento e um conjunto de teste, de forma que não apresentem elementos em comum.

O treinamento de uma RN consiste em se chegar aos valores ideais dos pesos sinápticos, geralmente através de um processo iterativo com auxílio de um algoritmo matemático, de forma que a resposta da rede seja satisfatória ou adequada ao problema em questão. Uma das formas de se avaliar desempenho de uma rede, ao modelar um fenômeno, é através do erro médio quadrático (*mse – mean squared error*), ou seja, a média do somatório dos quadrados dos erros de cada caso, tanto do conjunto de treinamento, quanto do conjunto de teste. É comum também se adotar a raiz quadrada do erro médio quadrático (*rmse*) no cômputo do erro da RN.

Um dos algoritmos mais conhecidos e utilizados para o treinamento de redes neurais MLF é o de retro-propagação de erro (ou *back-propagation*). O treinamento por retro-propagação de erro consiste basicamente de dois passos através das diferentes camadas da rede: um passo para frente, a propagação, e um passo para trás, a retro-propagação. Na propagação, as variáveis de entrada são aplicadas aos nós sensoriais da rede e seu efeito se propaga através da rede, camada por camada, sem alteração dos pesos sinápticos, obtendo-se a saída da rede. A saída da rede é então comparada à saída desejada, calculando-se daí o valor do erro. Durante a retro propagação, os pesos sinápticos são todos ajustados de acordo com uma regra de correção baseada no valor do erro, para fazer com que a resposta da rede seja mais próxima possível da resposta desejada (HAYKIN,

2001). Este processo requer várias iterações para se atingir o erro permitido pré-especificado. (AWAD e JANSON, 1997).

Neste trabalho, 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.

Durante o treinamento, a diminuição do erro é importante, porém deve-se sempre estar atento à capacidade de generalização da RN. No início do treinamento, os erros obtidos referentes aos conjuntos de treinamento e de teste geralmente tendem a diminuir. Mas, a partir de um certo número de iterações, pode acontecer da rede se especializar demais nas informações contidas no conjunto de treinamento, perdendo sua capacidade de generalização. Desta forma, o erro referente ao conjunto de teste passa a aumentar, conforme gráfico da Figura 5. O número ideal de iterações de um treinamento corresponde ao ponto de erro mínimo do conjunto de teste. Neste momento, deve-se parar o processo de treinamento da RN, procurando-se garantir sua máxima capacidade de generalização.

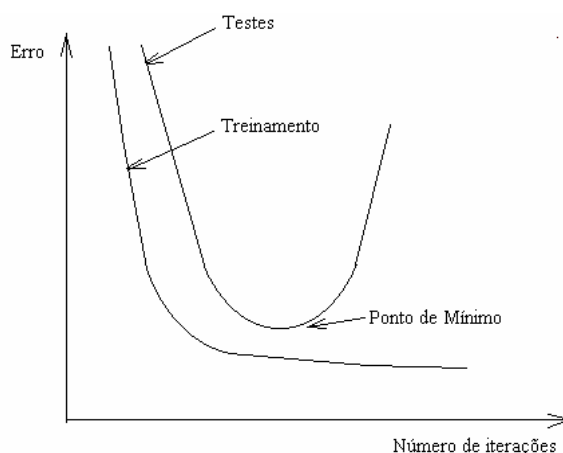


FIGURA 5 - TREINAMENTO VERSUS CAPACIDADE DE GENERALIZAÇÃO DA RN
FONTE: (DYMINSKI, 2000)

3.3.2 Modelo desenvolvido

Para a obtenção de um modelo numérico, visando analisar a periculosidade de curvas horizontais através da previsão do número de acidentes ocorridos nas mesmas, foram testadas várias arquiteturas de redes neurais, 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 entradas. Apesar de se disporem 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 disso, 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.

Todos os dados disponíveis de acidentes eram locais, pois as informações foram extraídas dos boletins de ocorrência de cada um dos 2762 acidentes. Desta

forma, para cada acidente considerado dispunha-se da real condição de tempo (bom, chuva, neblina, temporal), da real condição de luz (dia, noite), condição da pista (seca, molhada, com defeitos), do acostamento, do veículo e motorista envolvidos, da sinalização horizontal e vertical. Porém, nem todas essas variáveis foram utilizadas nos modelos desenvolvidos devido à necessidade de desdobramento de cada curva em pelo menos dois casos, a exemplo do que foi feito com a condição de tempo citada no parágrafo anterior. Para cada desdobramento das curvas do conjunto de dados é necessário nova contabilização do número de acidentes de cada caso de cada curva, nas 2762 Planilhas de Acidentes, devendo-se construir nova planilha com os novos dados de número de acidentes e das curvas. Desta forma o escopo deste trabalho foi limitado às variáveis de projeto geométrico e algumas referentes às condições climáticas e tráfego.

A tabela 7 apresenta os tipos de redes segundo o número de entradas, com as respectivas variáveis de entrada.

TABELA 7 - TIPOS DE REDES NEURAIIS E ENTRADAS ADOTADAS

Nº de entradas das redes	Variáveis de entrada							
	R	AC	D	lc	V ₈₅	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 para cada rede experimentada, conforme consta na Planilha 2.

Todos estes dados foram separados em dois grupos. Um deles foi utilizado para o treinamento e o outro para teste das redes. Na separação destes dois grupos, foram selecionadas inicialmente do conjunto total as curvas que apresentavam os valores limites máximo e mínimo das variáveis de entrada e das saídas esperadas. Estes casos foram incluídos no grupo de treinamento para se evitar problemas advindos da extrapolação de resultados pela RN. No conjunto de dados já isentos dos valores máximos e mínimos de cada variável, e ordenados pela numeração das curvas, foram sendo separadas 3 curvas (6 casos desdobrados) para o conjunto de treinamento e 1 curva (2 casos desdobrados) para o conjunto de teste, até se chegar à última curva. O conjunto final de treinamento apresentou 318 curvas (636 casos), composto pelas curvas que apresentaram os valores máximos e mínimos das variáveis e pela reunião de 3 em cada 4 curvas do conjunto de dados 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.

Para se encontrar a configuração mais adequada da rede neural a ser utilizada no modelo, foram experimentadas, dentro de cada tipo de rede já descrito anteriormente, diversas redes distintas. A arquitetura das redes foi composta por uma camada de nós de entrada; uma, duas ou três camadas ocultas de neurônios; e uma camada de saída. A camada de entrada apresentou um número de nós correspondente ao número de variáveis de entrada da rede que, conforme a tabela 6, poderiam ser 4, 5, 6, 7 ou 8 nós.

As redes de todos os tipos apresentaram 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*). Todas as redes foram projetadas para fornecer como saída o número de acidentes da curva analisada, no intervalo de tempo considerado neste trabalho.

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.

O algoritmo de treinamento utilizado foi o de Levenberg Marquadt e todas as redes testadas foram do tipo *feedforward*. O treinamento das redes foi do tipo supervisionado, adotando-se como número máximo de 50 iterações de treinamento para metade das redes consideradas no estudo, e 100 iterações para a outra metade.

Foi escolhida uma nomenclatura para as redes de forma a representar, pela ordem, as seguintes características: número de parâmetros de entrada, função de ativação do neurônio da camada de saída, número de neurônios em cada camada

oculta (e número de camadas ocultas) e número de iterações do treinamento. Desta forma, a denominação das redes deste trabalho começa com um número correspondente à quantidade de variáveis de entrada, seguido das letras “Ec” para as redes “clipadas” com função de ativação *purelin* no neurônio de saída ou pelas letras “Et” para as redes com função de ativação *tansig* no neurônio de saída. Nas redes de uma camada oculta, segue um número e a letra “n”, que representa o número de neurônios desta camada. Para as redes com duas camadas ocultas, são 2 números separados por um traço e seguidos pela letra “n”. Cada número é a quantidade de neurônios da primeira e da segunda camada oculta. Para as redes de três camadas ocultas, acrescenta-se um traço e um terceiro número, entre o segundo número e a letra “n”. Este terceiro número é a quantidade de neurônios desta terceira camada oculta. Finalmente, após a letra n, segue um número, 50 ou 100, que representa o número de iterações do treinamento desta rede.

Por exemplo, a rede 6Ec7-7-7n50 é uma rede com 6 entradas, com função de ativação *purelin* no neurônio da camada de saída, com 3 camadas ocultas de 7 neurônios em cada uma e foi treinada com 50 iterações.

Cada rede com mais de uma camada oculta, utilizada neste trabalho, foi concebida adotando-se o mesmo número de neurônios por camada oculta.

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 redes. A tabela 8 resume o número de redes conforme suas configurações.

TABELA 8 - CONFIGURAÇÃO DAS REDES E QUANTIDADE

Redes	1 camada oculta			2 camadas ocultas			3 camadas ocultas			Total
	Nº máximo de neurônios	Nº de redes		Nº máximo de neurônios	Nº de redes		Nº máximo de neurônios	Nº de redes		
		50 iterações	100 iterações		50 iterações	100 iterações		50 iterações	100 iterações	
4Ec	11	7	7	11	7	7	11	7	7	42
4Et	11	7	7	11	7	7	11	7	7	42
5Ec	11	7	7	11	7	7	9	6	6	40
5Et	13	8	8	9	6	6	9	6	6	40
6Ec	18	15	15	17	11	11	9	6	6	64
6Et	17	12	12	15	9	9	9	6	6	54
7Ec	9	8	8	9	6	6	7	5	5	38
7Et	9	6	6	9	6	6	7	5	5	34
8Ec	15	10	10	11	7	7	7	5	5	44
8Et	11	7	7	9	7	7	7	6	6	40
Total		87	87		73	73		59	59	438

3.4 MODELOS ESTATÍSTICOS

Neste trabalho, foram utilizados também alguns modelos estatísticos tradicionais para a previsão do número de acidentes nas curvas rodoviárias analisadas, para que se pudesse fazer uma posterior comparação do desempenho das RN's com os mesmos. Os modelos estatísticos utilizados neste estudo são os descritos a seguir.

3.4.1 Regressão linear múltipla

A análise por regressão linear múltipla envolve uma variável dependente e duas ou mais variáveis independentes ou explicativas. O seu objetivo é o estabelecimento de uma equação linear para prever os valores da variável dependente, para valores fornecidos das diversas variáveis independentes. A determinação desta equação pode ser feita através do método dos mínimos quadrados. Segundo STEVENSON (1981), a forma geral da equação de regressão linear múltipla é a seguinte:

$$y = a + b_1.x_1 + b_2.x_2 + b_3.x_3 + \dots + b_k.x_k \quad (12)$$

em que: y = variável dependente,
 a = ordenada de interceptação do eixo Y,
 b_i = parâmetros da equação,
 x_i = variáveis independentes.

Neste trabalho, foi usado o programa computacional Matlab 6.5 para implementar os modelos de regressão linear múltipla. Como esse programa trabalha com matrizes, a equação geral da regressão linear expressa matricialmente é (Mathworks, 2002):

$$y = X.\beta + \varepsilon \quad (13)$$

em que: y = vetor de n linhas por 1 coluna das observações,

X = matriz de n linhas por p colunas dos regressores (variáveis independentes),

β = vetor de p linhas por 1 coluna dos parâmetros,

ε = vetor de n linhas por 1 coluna dos erros.

Fazendo analogia desta nomenclatura com este trabalho, a variável y representa o número acidentes, e a matriz X é o conjunto dos dados de entrada de todas as curvas, ou seja, cada coluna de X corresponde às características de uma certa curva como raio, ângulo central, desenvolvimento, velocidade operacional, superelevação, volume de tráfego, condição do tempo e outras.

A solução da equação acima, determinada pelo método dos mínimos quadrados, é um vetor b , estimado para o vetor de parâmetros β . Logo,

$$b = \beta = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot y \quad (14)$$

Após a implementação do modelo com a determinação do vetor b , os valores preditos (\hat{y}) para a variável dependente podem ser calculados pela expressão:

$$\hat{y} = X \cdot b = H \cdot y, \quad (15)$$

em que: $H = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \quad (16)$

Desta forma, foram calculados cinco modelos lineares de previsão de acidentes, que se diferenciaram pelo número de variáveis independentes, que foram de 4 a 8 entradas (L4E, L5E, L6E, L7E e L8E). As variáveis adotadas em cada um destes modelos foram as mesmas utilizadas nas modelagens por redes neurais, para possibilitar a comparação entre estes modelos.

3.4.2 Modelo de Poisson

Proposta por Poisson em 1837, a distribuição de Poisson é um caso particular da distribuição binomial quando N tende ao infinito e p tende a zero, enquanto o produto $N.p$ é igual a λ (MATHWORKS, 2002). N é o número de tentativas para se obter o resultado sucesso ou falha, e p representa a probabilidade de ocorrer o sucesso, enquanto λ é o parâmetro de Poisson, constante para uma distribuição, sendo seu valor dependente do intervalo de confiança adotado.

Na distribuição de Poisson, a média e a variância são iguais entre si e iguais ao parâmetro λ . A equação (17) representa a função de densidade probabilística de Poisson.

$$p(y) = f(y | \lambda) = \frac{\lambda^y}{y!} e^{-\lambda} \quad (17)$$

em que:

y = variável dependente (vetor de n linhas por 1 coluna das observações).

O modelo de Poisson emprega uma relação exponencial entre λ , X e β , dada pela equação (18), que assegura um número de acidentes sempre não negativo (MIAOU e LUM, 1993).

$$\lambda = e^{X \cdot \beta} \quad (18)$$

em que:

X = matriz de n linhas por p colunas dos regressores (variáveis independentes),

β = vetor de p linhas por 1 coluna dos parâmetros.

Desta forma, foram desenvolvidos cinco modelos de previsão de acidentes, utilizando a regressão de Poisson, com auxílio do programa computacional Matlab 6.5. Estes modelos se diferenciaram pelo número de variáveis independentes, que foram de 4 a 8 entradas (P4E, P5E, P6E, P7E e P8E). As variáveis adotadas em cada modelo foram as mesmas utilizadas nas modelagens por redes neurais e regressão linear.

4 RESULTADOS DA MODELAGEM

4.1 MODELO POR 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. Os rmse's foram determinados durante o processamento dos dados através do programa computacional Matlab 6.5, porém podem ser calculados pela equação (19), para os conjuntos de treinamento e de teste.

$$\text{rmse} = \sqrt{\left(\frac{\sum(y - \hat{y})^2}{n}\right)} / 2 * 100 \quad (19)$$

em que:

y = saídas reais normalizadas;

\hat{y} = saídas normalizadas previstas pela rede;

n = número de casos.

A tabela 9 mostra as redes (levando-se em conta o número de parâmetros de entrada) que foram consideradas de melhor desempenho por apresentarem os

menores erros, tanto de teste como de treinamento. Nas 12 redes da tabela 9, os rmse's de treinamento se situaram no intervalo entre 8,05% e 10,56%, e os rmse's de teste ficaram no intervalo entre 8,24% e 9,83%. Estes resultados indicam que estas redes tiveram um número adequado de iterações para o treinamento.

TABELA 9 – RMSE's DAS MELHORES REDES

Rede	rmse (%)	
	Treinamento	Teste
4Ec5-5n50	9,95	9,83
4Et3n50	10,56	9,72
5Ec3n50	10,49	9,79
5Et3n50	10,48	9,71
6Ec8n50	8,62	8,35
6Ec3-3n100	8,87	8,62
6Et7n50	8,05	8,83
7Ec2-2n100	9,50	8,24
7Et2n50	9,36	8,60
8Ec2-2-2n50	9,48	8,32
8Et3-3-3n50	8,39	8,56
8Et5n100	9,02	8,24

Considerando-se todas as redes estudadas, as que apresentaram os menores erros de treinamento não tiveram necessariamente os menores erros de teste. Todas as redes que apresentaram rmse de treinamento abaixo dos valores

apresentados para as redes da tabela 9 tiveram altos rmse de teste, o que prejudicou os seus desempenhos. E quanto menor foi o rmse de treinamento, maior foi o rmse de teste. Esta característica de baixo valor de rmse de treinamento e alto valor de rmse de teste é típica de excesso de iterações para treinamento. Das 438 redes testadas, muitas apresentaram erro de treinamento menor do que o limite inferior mostrado na tabela 9. Pode ser citado o caso da rede 6Et11-11n100, que apresentou o rmse de treinamento de 3,25%, porém o rmse de teste foi 24,39%. Esta rede foi treinada excessivamente com 100 iterações e perdeu a capacidade de generalização. Reduzindo o número de iterações do treinamento da rede 6Et11-11n100 para 50 iterações, obteve-se a nova rede 6Et11-11n50. Mesmo com um acréscimo do rmse de treinamento para 9,79%, este procedimento provocou a redução do rmse de teste para 12,26%.

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. Estas três redes foram escolhidas por: estarem incluídas dentre as redes consideradas de melhor desempenho mostradas na tabela 9; apresentam 4, 6 e 8 entradas que são o menor, a média e o maior número de entradas adotado para as redes; uma delas apresenta neurônio de saída com função de transferência linear e as outras duas, sigmoideal; e ainda quanto ao rmse de teste, duas delas apresentam o menor e o maior valor constante na tabela 9. Os resultados para os conjuntos de treinamento e de teste são mostrados nas tabelas 10 e 11 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 10 - OCORRÊNCIA DE CASOS POR FAIXA DE ERRO NO CONJUNTO DE TREINAMENTO DAS REDES

Rede	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 11 - OCORRÊNCIA DE CASOS POR FAIXA DE ERRO NO CONJUNTO DE TESTE DAS REDES

Rede	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

Em complementação à análise do desempenho das redes por faixas de erro, as figuras 6 e 7 apresentam respectivamente os histogramas de erro percentual (desta vez considerando o sinal do mesmo), para as situações de treinamento e teste da rede 8Et5n100. Dentre as três redes constantes na tabela 11, a rede 8Et5n100 teve um desempenho levemente superior quando considerado a frequência de casos com erro de teste até $\pm 10\%$.

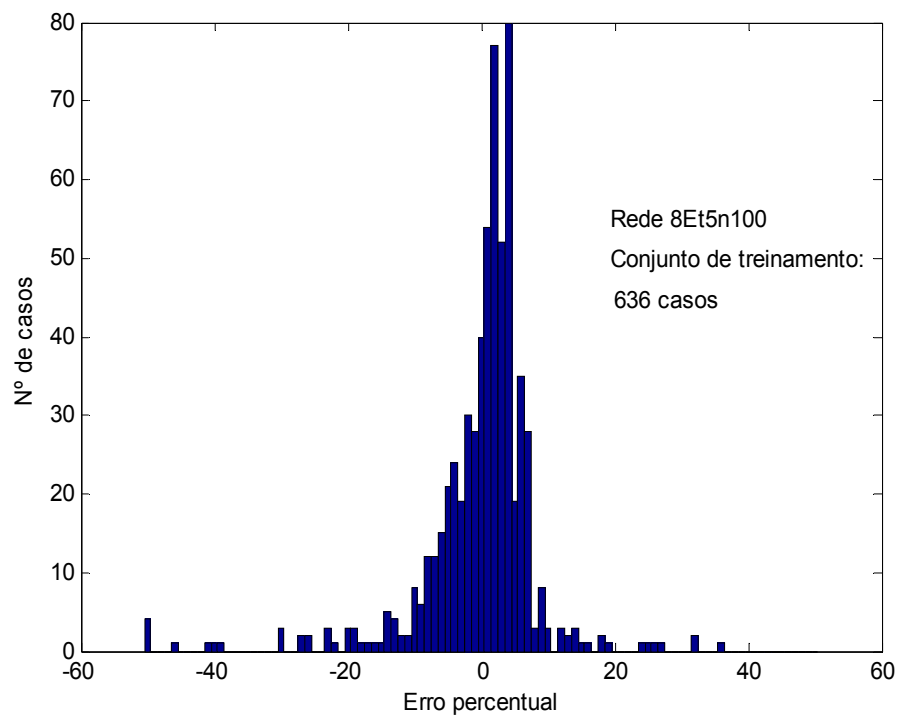


FIGURA 6 - HISTOGRAMA DA REDE 8Et5n100 - CONJUNTO DE TREINAMENTO

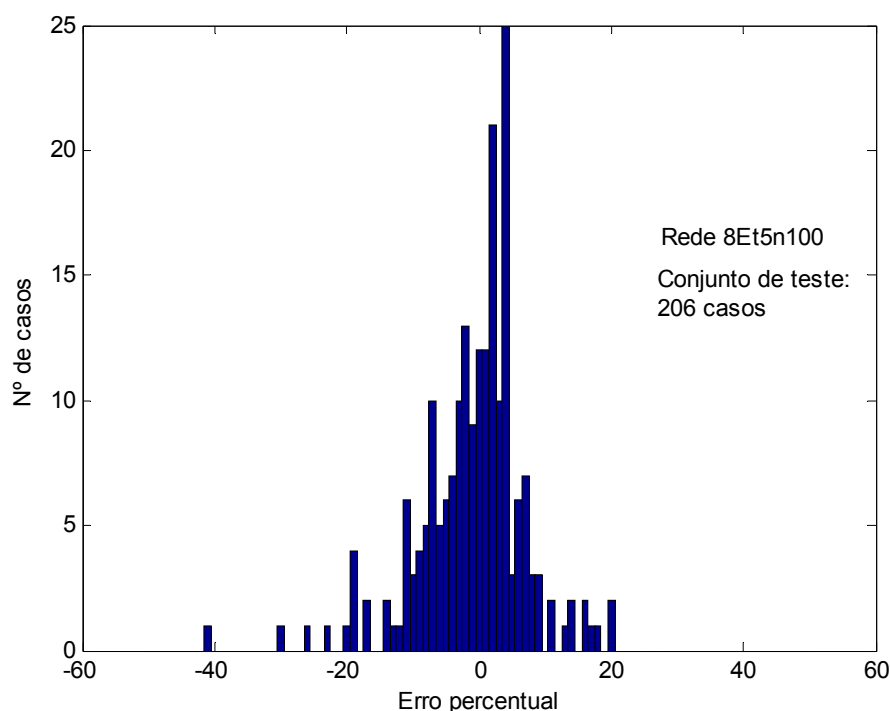


FIGURA 7 - HISTOGRAMA DA REDE 8Et5n100 - CONJUNTO DE TESTE

O desempenho dos modelos de RN's também pode ser observado graficamente, tanto para o conjunto de treinamento como para o de teste, quando o número previsto de acidentes pela rede, para cada curva (ou caso), é comparado com o número real de acidentes ocorridos nas mesmas. As figuras 8 e 9 mostram para a rede 8Et3-3-3n50 os gráficos que relacionam o número real de acidentes com o número previsto de acidentes por curva, correspondentes aos conjuntos de treinamento e de teste respectivamente. Estes gráficos apresentam no eixo x (horizontal) o número real de acidentes e no eixo y (vertical) o número previsto de acidentes, sendo que cada caso está representado por um pequeno círculo. A bissetriz entre os eixos x e y representa a situação ideal onde a previsão é igual ao real. Portanto, quanto maior for o afastamento destes círculos da bissetriz, maior será o erro. O erro do modelo pode ser visualizado no gráfico pela comparação entre

a bissetriz dos eixos e pela reta obtida pelo método dos mínimos quadrados para ajustar o agrupamento dos pontos (círculos) do gráfico. Além da reta de ajuste e sua equação, consta no gráfico o coeficiente de determinação R do correspondente ajuste linear.

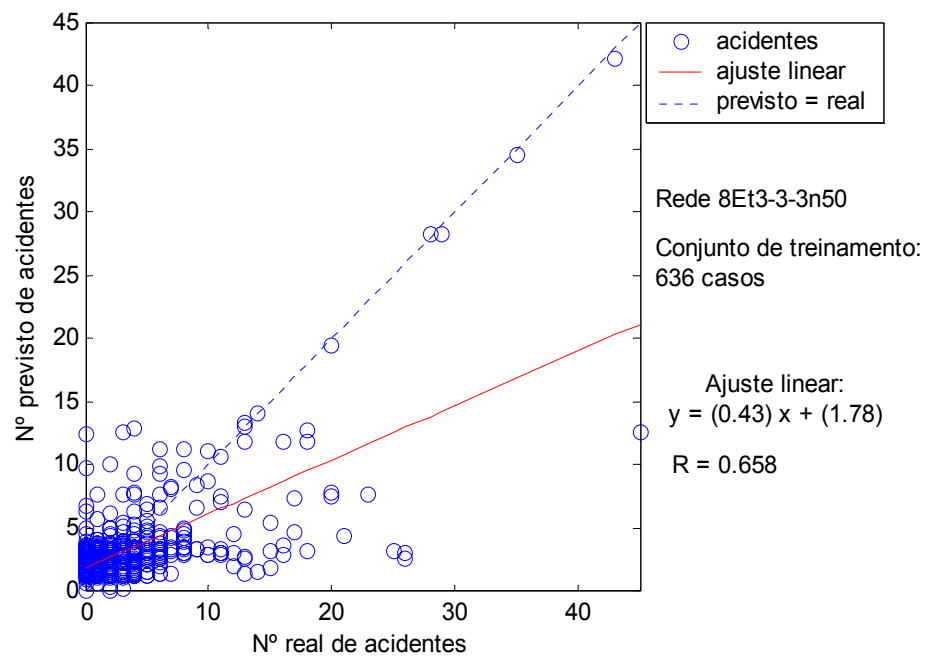


FIGURA 8 - GRÁFICO DE ACIDENTES (REAL X PREVISTO) DA REDE 8Et3-3-3n50 – CONJUNTO DE TREINAMENTO

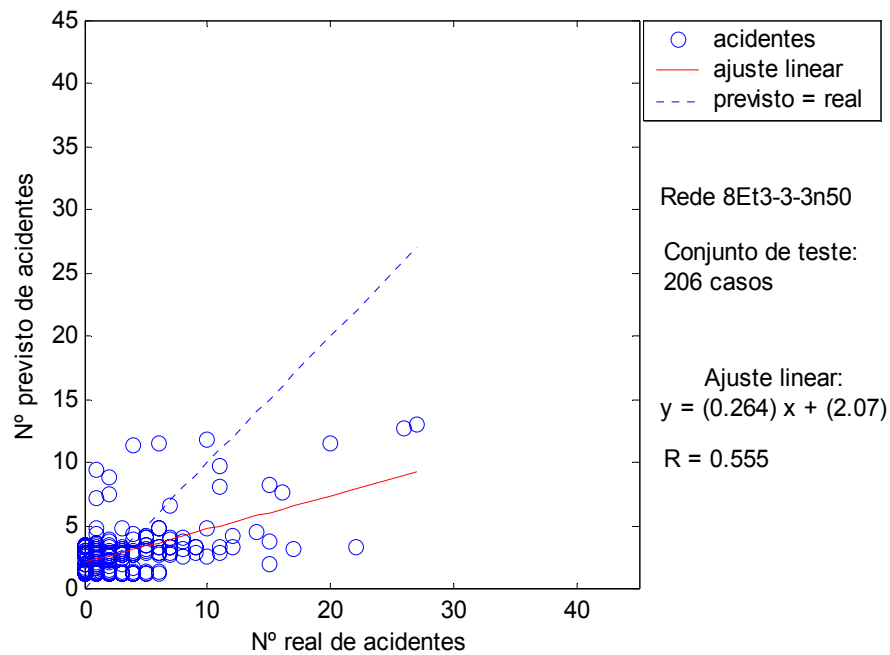


FIGURA 9 - GRÁFICO DE ACIDENTES (REAL X PREVISTO) DA REDE 8Et3-3-3n50 – CONJUNTO DE TESTE

As figuras 10 e 11 apresentam os gráficos que relacionam o número real de acidentes com o número previsto de acidentes por curva, para os conjuntos de treinamento e de teste da rede 6Ec8n50, respectivamente.

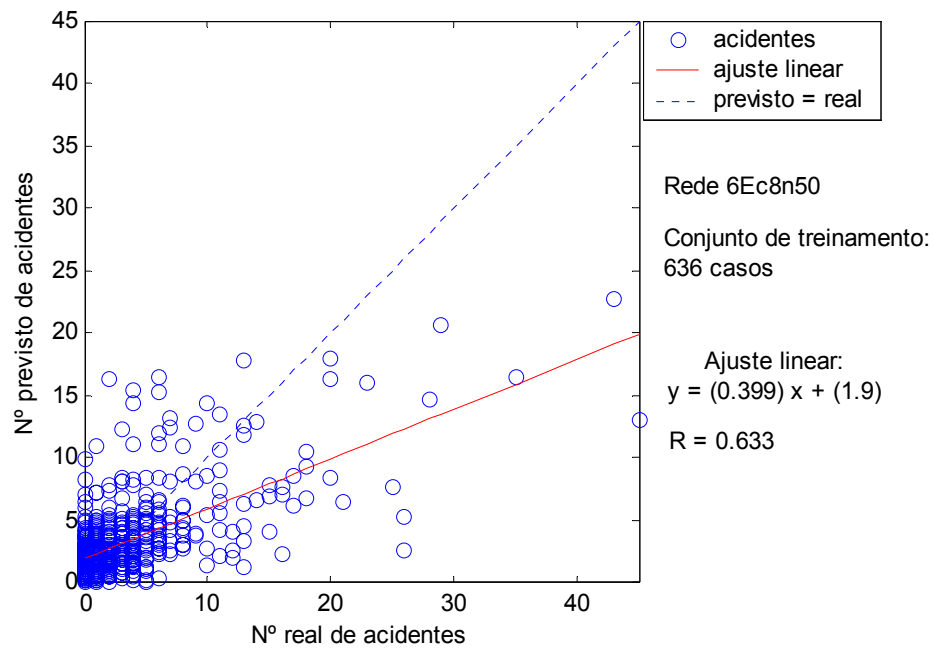


FIGURA 10 - GRÁFICO DE ACIDENTES (REAL X PREVISTO) DA REDE 6Ec8n50 – CONJUNTO DE TREINAMENTO

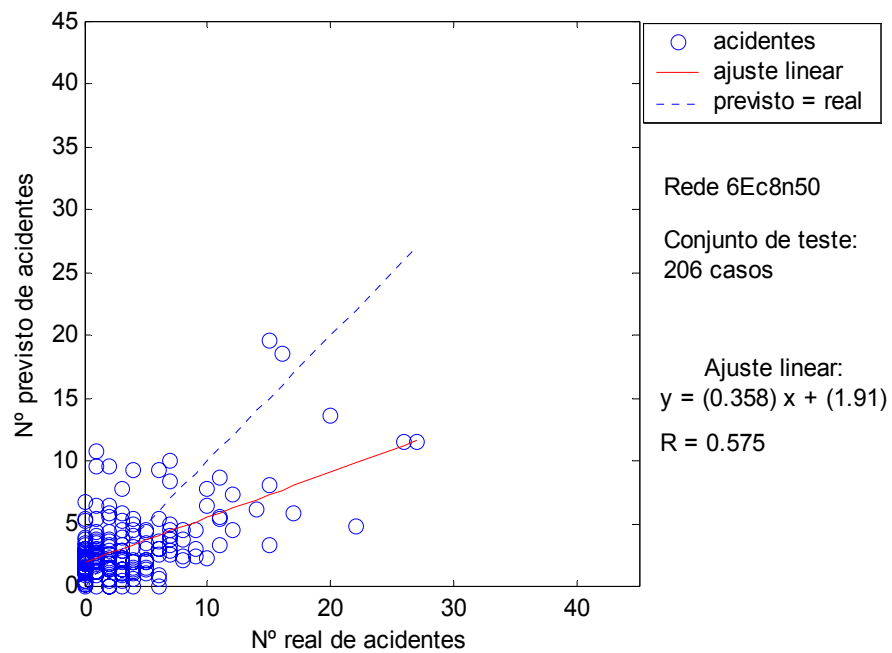


FIGURA 11- GRÁFICO DE ACIDENTES (REAL X PREVISTO) DA REDE 6Ec8n50 – CONJUNTO DE TESTE

Pode-se dizer que, observando-se os gráficos das figuras 8, 9, 10 e 11, estes modelos obtidos por RN's estão, de maneira geral, estimando número de acidentes abaixo do valor real para casos com elevado número de acidentes, e estão estimando acima do valor real para casos com baixo número de acidentes. E ainda, quanto maior o número de acidentes, maior está sendo o erro da estimação.

Entretanto, os casos com grande número de acidentes são poucos e com isso as redes não adquirem com o treinamento, adequada capacidade de generalização para previsões onde se espera alto número de acidentes. Por isso, é difícil de se ter bons resultados em curvas mais perigosas, onde suas variáveis tenham tendência de causar mais acidentes.

Pode ser observado nos gráficos das figuras 8, 9, 10 e 11 que a maioria dos casos, excluídos aqueles de alto número de acidentes, está agrupada mais próxima da bissetriz dos eixos, revelando um menor erro de previsão do número de acidentes. As redes atingiram melhor capacidade de previsão para baixo número de acidentes devido à presença no conjunto de treinamento do maior número de casos apresentando também poucos acidentes. Desta forma, as redes estão fazendo previsões boas (com erros menores que 10%) na maioria (mais de 80%) dos casos.

Outro tipo de verificação de desempenho de modelos de previsão de acidentes pode ser adotado, como foi proposto por MIAOU e LUM (1993) para avaliar o desempenho dos quatro modelos desenvolvidos em seu trabalho (dois de regressão linear e dois de Poisson). Aqueles autores aplicaram modelos de previsão de acidentes ao conjunto de dados, fornecendo o número previsto de acidentes de todos os casos (curvas), cujo somatório pode ser comparado com o total real de acidentes. Este procedimento de análise de desempenho também foi aplicado no

presente trabalho. A tabela 12 apresenta para os conjuntos de treinamento e de teste os totais reais de acidentes e os totais previstos por seis redes, sendo três delas constantes também na tabela 9 e, portanto, classificadas anteriormente como “melhores redes”. Observa-se na tabela 12 que a rede 4Ec3-3-3n100 foi a que mais aproximou o total previsto do total real de acidentes, referentes ao conjunto de teste, embora apresente um rmse de teste maior que de outras redes. Esta situação se deve ao fato de que alguns erros de previsão do número de acidentes são negativos e outros são positivos, e no somatório estes erros se compensam parcialmente, tornando o erro total menor. Por este motivo este método de avaliar o desempenho das redes e de outros modelos de previsão de acidentes pode ser considerado não satisfatório.

TABELA 12- COMPARAÇÃO DO TOTAL REAL DE ACIDENTES COM O TOTAL PREVISTO PELAS REDES

Total de acidentes	Real		Previsto pela RN		Rmse (%)	
	Trein.	Teste	Trein.	Teste	Trein.	Teste
Rede						
4Ec3-3-3n100	2022	740	2060,1	732,4	10,13	13,92
5Ec3n50			2059,1	652,0	10,49	9,79
6Ec5n100			2022,0	915,1	8,71	25,87
7Ec2-2n100			2021,6	651,4	9,50	8,24
7Et7n100			856,4	377,2	11,90	15,41
8Et5n100			1995,1	656,3	9,02	8,24

4.2 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 13 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 e que constam na tabela 7.

TABELA 13 – RMSE's DOS MODELOS ESTATÍSTICOS

Número de entradas	rmse (%)			
	Modelo linear		Modelo de Poisson	
	Trein.	Teste	Trein.	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

Os valores dos rmse's de todos os modelos constantes na tabela 13 ficaram próximos uns dos outros, porém com pequena vantagem para os modelos com um número maior de variáveis de entrada.

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 14 e 15 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 14 - OCORRÊNCIA DE CASOS POR FAIXA DE ERRO NO CONJUNTO DE TREINAMENTO DOS MODELOS ESTATÍSTICOS

Modelo	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 15 - OCORRÊNCIA DE CASOS POR FAIXA DE ERRO NO CONJUNTO DE TESTE DOS MODELOS ESTATÍSTICOS

Modelo	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

Para complementar a análise do desempenho dos modelos estatísticos por faixas de erro, as figuras 12 e 13 apresentam respectivamente os histogramas de erro percentual (considerando o sinal do mesmo), para o conjunto de treinamento e para o de teste do modelo P8E. Comparando com as três redes constantes na tabela 11, observa-se que o modelo P8E teve um desempenho levemente superior quando considerado a frequência de casos com erro de teste até $\pm 5\%$.

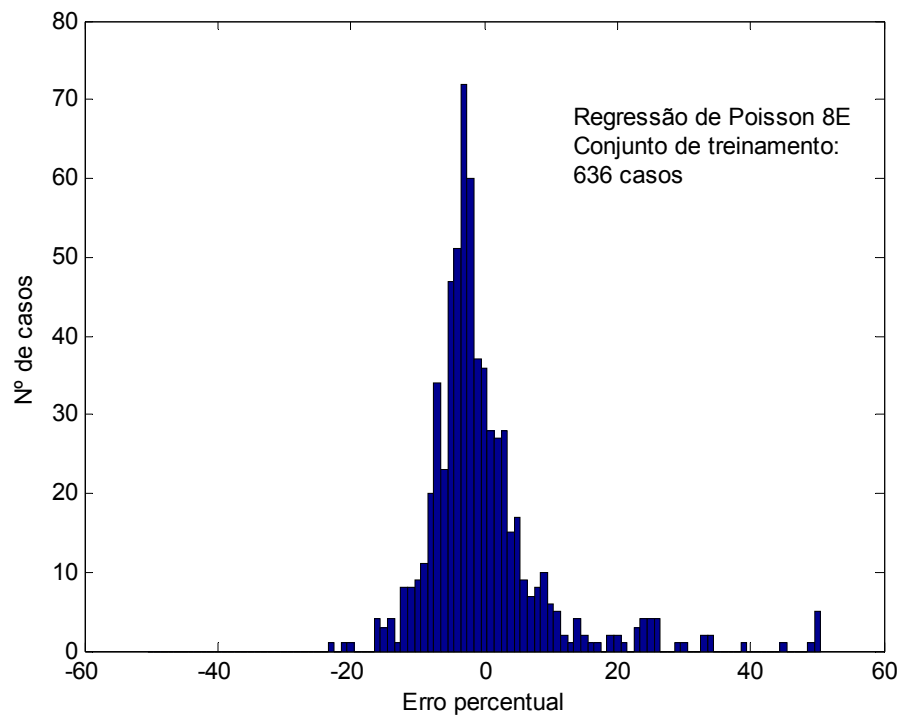


FIGURA 12 - HISTOGRAMA DO MODELO P8E - CONJUNTO DE TREINAMENTO

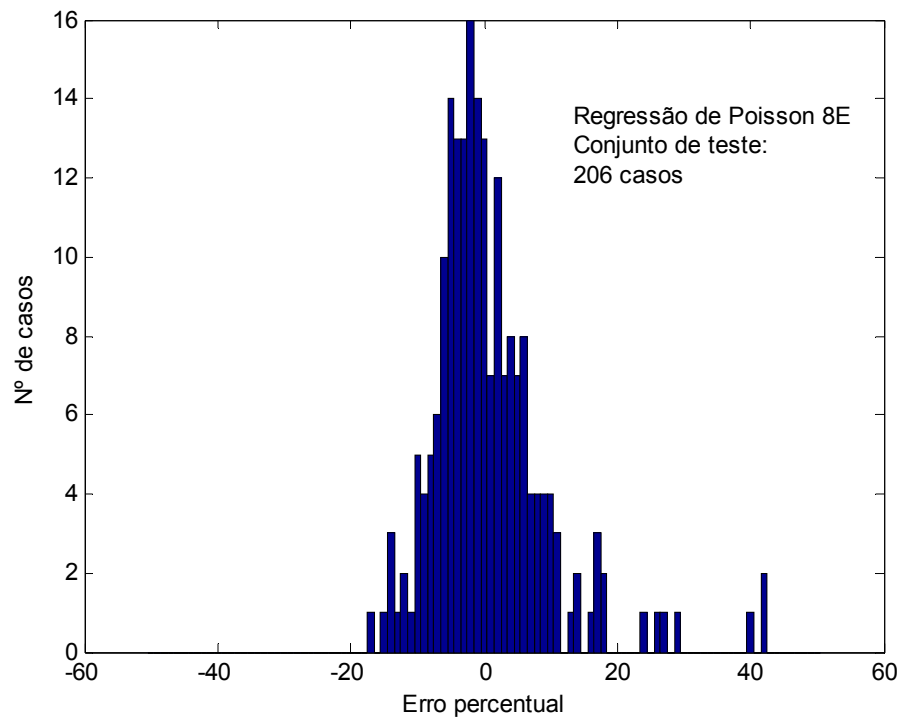


FIGURA 13 - HISTOGRAMA DO MODELO P8E - CONJUNTO DE TESTE

O desempenho dos modelos estatísticos também pode ser observado pelo gráfico número real de acidentes por número previsto de acidentes, tanto para o conjunto de treinamento como para o de teste. Este tipo de gráfico já utilizado no item 4.1 permanece com as mesmas características e informações já explicadas. As figuras 14 e 15 correspondem respectivamente aos gráficos dos conjuntos de treinamento e de teste do modelo L8E, e os gráficos para o modelo P8E podem ser vistos nas figuras 16 e 17.

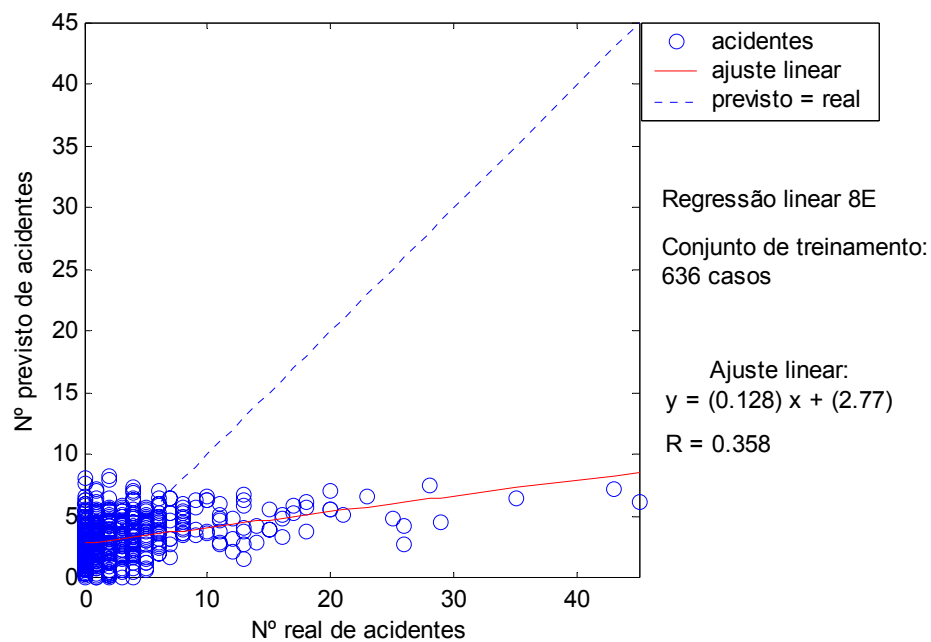


FIGURA 14 - GRÁFICO DE ACIDENTES (REAL X PREVISTO) DO MODELO L8E - CONJUNTO DE TREINAMENTO

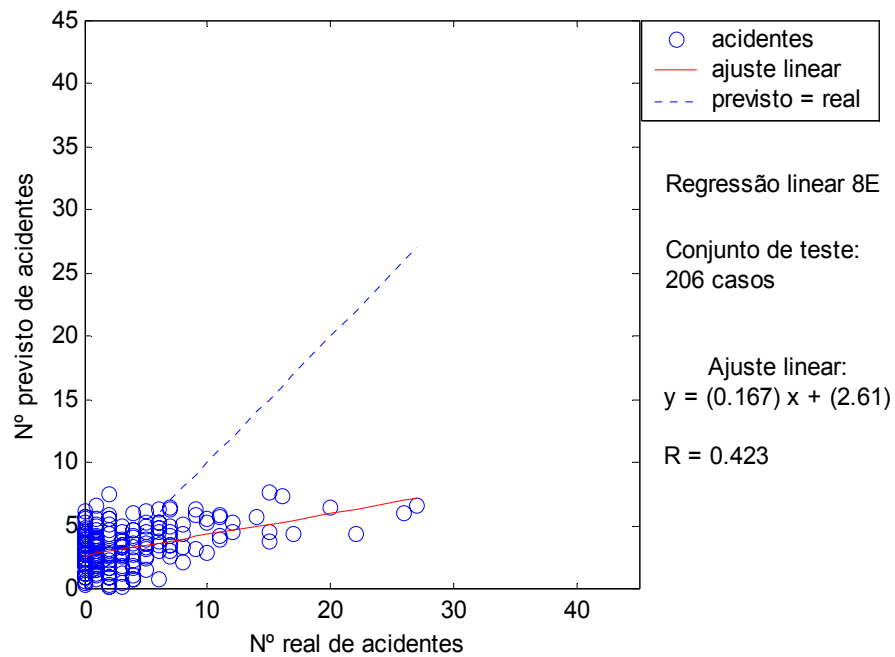


FIGURA 15 - GRÁFICO DE ACIDENTES (REAL X PREVISTO) DO MODELO L8E - CONJUNTO DE TESTE

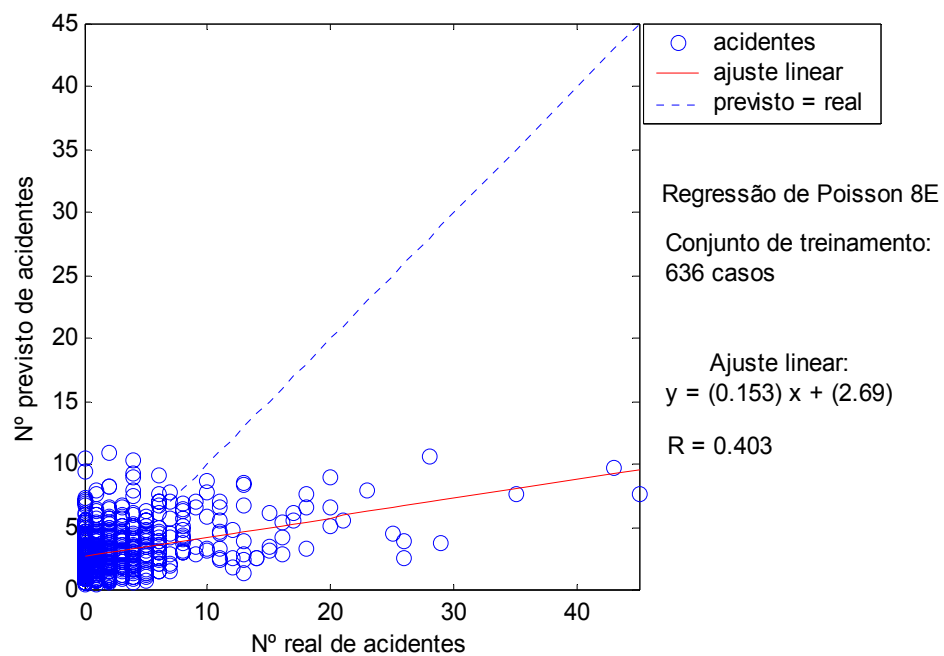


FIGURA 16 - GRÁFICO DE ACIDENTES (REAL X PREVISTO) DO MODELO P8E - CONJUNTO DE TREINAMENTO

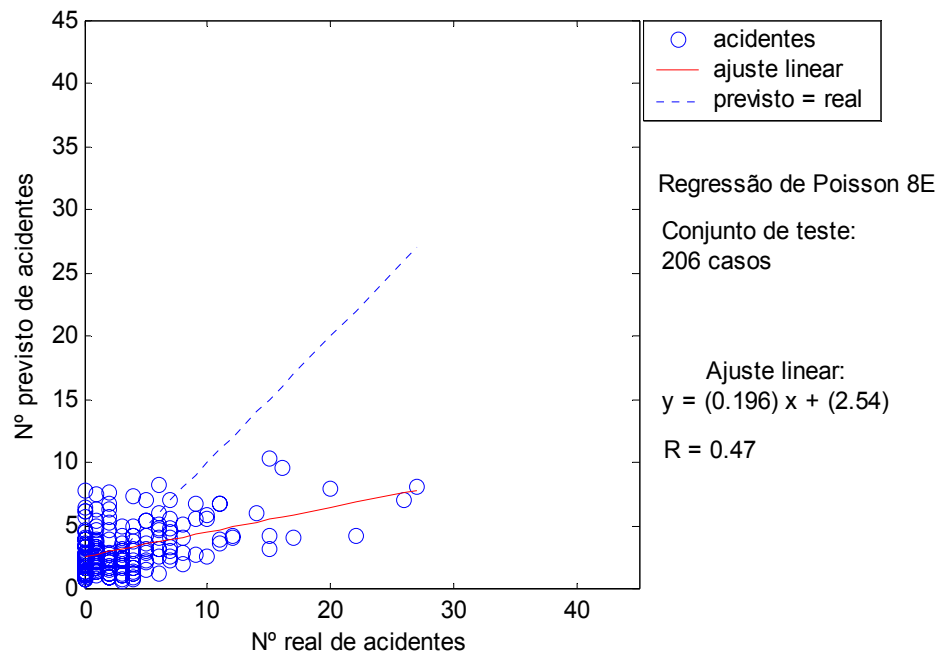


FIGURA 17 - GRÁFICO DE ACIDENTES (REAL X PREVISTO) DO MODELO P8E - CONJUNTO DE TESTE

Observa-se nos gráficos das figuras 14, 15, 16 e 17, que os modelos estatísticos L8E e P8E estão estimando número de acidentes abaixo do valor real para casos com elevado número de acidentes, e acima do valor real para casos com baixo número de acidentes. E ainda, quanto maior o número de acidentes, maior é o erro da estimação.

Procedendo de forma semelhante aos modelos obtidos por RN's no item 4.1, foi aplicado o procedimento de verificação de desempenho do modelo adotado por MIAOU e LUM (1993). Portanto, foi determinado o somatório do número previsto de acidentes de todos os casos (ou curvas) de cada conjunto de dados, para cada um dos modelos estatísticos. A tabela 16 apresenta para os conjuntos de treinamento e de teste os totais reais de acidentes e os totais previstos para os modelos linear e de Poisson, todos eles com número de variáveis de entrada de 4

até 8. Observa-se na tabela 16 que os modelos linear e o de Poisson de 6, 7 e 8 entradas previram corretamente o somatório do número de acidentes para o conjunto de treinamento. Entretanto, esse desempenho aparentemente excelente pode ser considerado falso, conforme se pode comprovar para os modelos L8E e P8E, através dos gráficos apresentados nas figuras 14 e 16. Nesses gráficos, se observa a não coincidência de todos os acidentes com a bissetriz dos eixos, e ainda confirmado pela reta de ajuste linear dos acidentes previstos. Da mesma forma que para os modelos obtidos por RN's, este método de avaliar o desempenho das redes ou de outros modelos de previsão de acidentes não é satisfatório, porque alguns erros de previsão do número de acidentes são negativos e outros são positivos e, no somatório, estes erros se compensam parcialmente, sendo que, particularmente no caso dos modelos L8E e P8E, os mesmos se anularam.

TABELA 16 - COMPARAÇÃO DO TOTAL REAL DE ACIDENTES COM O TOTAL PREVISTO PELOS MODELOS ESTATÍSTICOS

Total de acidentes	Real		Previsto			
			Modelo linear		Modelo de Poisson	
Nº de entradas	Trein.	Teste	Trein.	Teste	Trein.	Teste
4E	2022	740	2059,0	656,9	2059,0	655,1
5E			2059,0	656,6	2059,0	654,2
6E			2022,0	662,0	2022,0	668,1
7E			2022,0	662,0	2022,0	668,1
8E			2022,0	661,8	2022,0	668,2

4.3 COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO DOS MODELOS

Neste trabalho, foram utilizados 438 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 12 redes de melhor desempenho apresentados na tabela 9 e pelos rmse's dos modelos estatísticos apresentados na tabela 13, pode-se comparar o desempenho destes modelos. Observa-se que todas as redes da tabela 9 que apresentam 6, 7 e 8 entradas 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. As redes da tabela 9 com 4 e 5 entradas também apresentam rmse de treinamento e de teste inferiores aos correspondentes rmeses dos modelos lineares e de Poisson de 4 e 5 entradas.

Várias redes que apresentaram rmse's um pouco superior aos das 12 redes componentes da tabela 9 ainda poderiam competir com os modelos estatísticos devido à proximidade dos seus rmse's.

É importante ressaltar que o rmse está expresso em porcentagem relacionada com a escala do número de acidentes cujo valor máximo dentre os 636 casos (318 curvas) do conjunto de treinamento é 45. Um erro de 10%, por exemplo, corresponde a 4,5 acidentes em 5,5 anos, pois a saída das redes e dos modelos estatísticos é o número de acidentes previstos no período correspondente ao levantamento dos dados (5,5 anos).

Além do rmse, que se refere ao erro médio do modelo, a determinação da frequência de casos por faixa de erro percentual de um 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 10, 11, 14 e 15, 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, o que demonstra a maior capacidade de generalização das RN's.

Conforme os gráficos mostrados nas figuras 8, 9, 10 e 11, referentes às redes 8Et3-3-3n50 e 6Ec8n50, e os gráficos mostrados nas figuras 14, 15, 16 e 17 referentes aos modelos L8E e P8E, pode-se observar que esses quatro modelos têm leve tendência de prever acidentes acima do valor real para casos com reduzido número de acidentes. Para casos com elevado número de acidentes, essa tendência se inverte e se acentua, pois a previsão para a maioria dos casos tem ficado abaixo do valor real. Estas observações são válidas para os conjuntos de treinamento e de teste. O ponto de cruzamento da reta de melhor ajuste linear dos acidentes previstos e da reta que representa a previsão do número de acidentes igual ao número real (bissetriz), corresponde um número de acidentes limite. Embora esse ponto não esteja bem claro nos gráficos citados acima, devido à concentração de pontos nessa região, para casos com número real de acidentes abaixo deste limite, as previsões tendem a ser superiores ao número real de acidentes e acima deste limite, as previsões tendem a ser inferiores ao número real de acidentes.

Comparando as equações dos ajustes lineares das previsões de acidentes, verifica-se que os coeficientes angulares das retas para as redes 8Et3-3-3n50 e 6Ec8n50 são maiores que os coeficientes angulares dos modelos estatísticos. Este fato mostra uma tendência em que, acima do limite de acidentes citado no parágrafo anterior, a previsão do número de acidentes fica inferior ao real, e quanto maior o número de acidentes, maior é o erro de previsão. E, abaixo deste limite, a previsão do número de acidentes fica superior ao real, e quanto menor o número de acidentes, também maior é o erro de previsão.

Observando as nuvens de pontos nos gráficos das figuras 8, 9, 10, 11, 14, 15, 16, e 17, as RN's tiveram melhor desempenho, especialmente considerando-se os casos das curvas mais críticas (com maior número de acidentes), onde a detecção da periculosidade das mesmas é mais importante, para que se possa tomar as devidas medidas de correção, tornando as curvas mais seguras.

Embora já tenha sido constatado no item 4.1 que a verificação do desempenho de um modelo através da comparação entre o somatório do número de acidentes previstos e o somatório do número de acidentes reais pode não ser considerada satisfatória, o desempenho de seis redes pode ser observado desta forma na tabela 12.

Conforme citado no item 4.3, um erro de 10% corresponde a um erro de previsão de 4,5 acidentes em 5,5 anos, ou seja, em média 0,818 acidentes por ano. A tabela 9 mostra que os rmse's de teste das redes de melhor desempenho ficou abaixo de 10%, atingindo o mínimo de 8,24% para as redes 7Ec2-2n100 e 8Et5n100. O rmse de 8,24% corresponde a um erro de previsão de 3,7 acidentes em 5,5 anos, que pode ser considerado aceitável, especialmente porque no caso da rede 8Et5n100, conforme a tabela 11, para o conjunto de teste, 59,2% dos casos

apresentam erro de 0 a 5% (ainda menor que 8,24%), e 84,0% dos casos erro de 0 a 10%.

5 MELHORIAS NA SEGURANÇA DE PROJETOS DE CURVAS HORIZONTAIS DE RODOVIAS

O conhecimento da previsão do número de acidentes que possam ocorrer em uma curva horizontal pode ser usado pelo órgão ou empresa que administra a rodovia, para que os técnicos projetem alterações nestas curvas, minimizando ou eliminando os fatores que estejam contribuindo para a ocorrência dos acidentes. Os projetos dessas curvas modificadas devem ser também analisados quanto à nova previsão do número de acidentes, para confirmar a eficácia da alteração da curva, devendo a mesma apresentar número previsto de acidentes menor que a curva original. De forma semelhante, projetos geométricos de novas rodovias também podem ser submetidos à análise quanto à previsão de acidentes, cujo resultado indicará ou não a necessidade de alteração nas características das curvas projetadas.

A alteração das características geométricas de curvas horizontais em operação ou de um projeto geométrico deve ser implementada quando o número de acidentes previstos através de um modelo adotado supera um determinado limite. Estas alterações deverão ser propostas por profissional competente da área rodoviária, como por exemplo, um engenheiro projetista. Neste trabalho, sugere-se a adoção como limite, conforme já abordado no item 2.3 do capítulo 2, o índice crítico de acidentes para curvas em operação, e um acidente por ano para curvas em projeto. Portanto, as curvas horizontais que apresentarem índice de acidentes superior ao índice crítico, devem ter seus parâmetros alterados de forma que o número de acidentes previstos pelo modelo se reduza com as modificações introduzidas. Ao se atingir essa meta, as modificações na curva poderão ser

executadas. Para curvas horizontais em fase de projeto, o procedimento é mais simples, pois 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, ou seja, nos modelos desenvolvidos neste trabalho, menor do que 5,5.

A utilização de um dos modelos desenvolvido por RN's para melhorar a segurança de curvas em operação pode ser exemplificado pela curva nº 282 que pertence ao conjunto de dados de teste e apresenta elevado número de acidentes. A segunda coluna da tabela 17 mostra as características originais da curva 282. O número real de acidentes ocorridos na curva 282 pode ser observado na tabela 18, onde na condição de tempo bom (+1) são 10 acidentes e na condição de tempo chuvoso ou outro (-1) são 20 acidentes. Adotando como modelo de previsão do número de acidentes a rede 8Et5n100, obteve-se para a situação original das características da curva, uma previsão de 6,10 acidentes para a condição de tempo +1 e 18,33 acidentes para a condição de tempo -1. Em seguida, fez-se quatro alterações na curva de modo a melhorar sua segurança, visando provocar a redução do número previsto de acidentes pelo modelo adotado.

A primeira alteração consistiu em uma simples correção da superelevação que se mostrava deficiente, sem alterar seus outros parâmetros. As três alterações subsequentes foram de acréscimo do raio, com conseqüentes alterações no desenvolvimento total, comprimento de transição, velocidade operacional e superelevação. O VMD foi mantido constante por ser o volume de tráfego que a curva apresenta. Optou-se por não modificar o valor do ângulo central, porque a curva resultante seria totalmente diferente, sem nenhuma característica remanescente da curva original. Embora a modificação do ângulo central da curva

provoque grande alteração no traçado da estrada, com influência em pelo menos uma das duas curvas adjacentes, e resultando em uma obra de maior custo, evidentemente este recurso pode ser utilizado, caso modificações menos radicais não produzam redução satisfatória no número previsto de acidentes. A tabela 17 apresenta os parâmetros geométricos originais e das quatro alterações da curva de número 282.

TABELA 17 - PARÂMETROS DA CURVA 282

Curva 282	Original	Alteração			
		1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a
Parâmetros					
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
Compr. de transição (m)	80	80	100	110	120
Veloc. 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

O número de acidentes previsto pela rede 8Et5n100 para as quatro alterações da curva 282, além da situação original, são apresentados na tabela 18.

TABELA 18 - NÚMERO PREVISTO DE ACIDENTES PARA A CURVA 282

Rede 8Et5n100	Nº real de acidentes	Número previsto de acidentes				
		Curva Original	Alterações			
Cond. de tempo			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 18, 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 se melhoraram as características da geometria da curva, obteve-se a também 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 da sua segurança.

Os modelos de previsão de acidentes podem ser empregados para melhorar a segurança de curvas horizontais ainda em fase de projeto. Como exemplo, a rede 8Et5n100 foi empregada para prever o número de acidentes em uma curva circular projetada “A” (opção 1), obtendo-se um total, para as duas condições de tempo, de 7,84 acidentes. Adotando-se um raio de curvatura maior (opção 2) para esta curva projetada, a nova previsão do número total de acidentes se reduziu para 6,22. A tabela 19 mostra os parâmetros geométricos da curva projetada “A”, nas duas opções e as previsões do número de acidentes pela rede 8Et5n100, considerando que o VMD fosse 4600 veículos por dia.

TABELA 19 - CURVA DE PROJETO “A” E PREVISÃO DE ACIDENTES PELA REDE 8ET5N100

Parâmetros		Curva projetada	
		Opção 1	Opção 2
Raio (m)		1200	1400
Ângulo central (°)		35	35
Desenvolvimento (m)		733,04	855,21
Compr. de transição (m)		0	0
Veloc. operacional (km/h)		92,77	93,13
Superelevação (%)		3,94	3,44
VMD (v/d)		4600	4600
Nº de acidentes	Condição +1	3,04	3,07
	Condição -1	4,80	3,15
	Total	7,84	6,22

Com o aumento do raio de curvatura houve uma pequena melhoria na segurança da curva “A” na condição de tempo -1, porém na condição de tempo +1, embora tenha ocorrido pequeno acréscimo no número previsto de acidentes, não houve alteração significativa. Portanto, outras modificações na curva “A” deveriam ser experimentadas até a obtenção de uma redução significativa no total previsto de acidentes.

Outro exemplo de melhoria de projeto de curvas horizontais é o caso de uma curva projetada “B” inicialmente como circular simples (opção 1), que foi alterada para circular com transição (opção 2). Este caso é apenas uma simulação para possibilitar a análise dos resultados de previsão de acidentes, tendo-se em vista que de acordo com as normas técnicas rodoviárias não poderia ser projetada curva circular simples com raio menor que 1000m para velocidade diretriz de 80 km/h (MINISTÉRIO, [19?]). Através da rede 8Et5n100, obteve-se para a opção 1, um total de 8,3 acidentes previstos para as duas condições de tempo, e para a opção 2, a previsão do total de acidentes se reduziu para 5,1 nas duas condições de tempo. A tabela 20 mostra os parâmetros geométricos da curva projetada “B”, nas duas opções, e as previsões do número de acidentes pela rede 8Et5n100, considerando que o VMD fosse 4600 veículos por dia.

TABELA 20 - CURVA DE PROJETO “B” E PREVISÃO DE ACIDENTES PELA REDE 8ET5N100

		Curva projetada	
Parâmetros		Opção 1	Opção 2
Raio (m)		600	491,107
Ângulo central (°)		20	20
Desenvolvimento (m)		209,44	301,46
Compr. de transição (m)		0	130
Veloc. operacional (km/h)		90,27	89,17
Superelevação (%)		5,77	6,72
VMD (v/d)		4600	4600
Nº de acidentes	Condição +1	3,0	2,0
	Condição -1	5,3	3,1
	Total	8,3	5,1

6 CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES

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%). E estes bons resultados puderam ser obtidos mesmo com redes de arquitetura simples, algumas delas apresentando apenas uma camada oculta composta de no mínimo 2 e no máximo 8 neurônios. As outras redes que também apresentaram bons resultados foram de 2 ou 3 camadas ocultas compostas por 2, 3 ou 5 neurônios, e que ainda não são classificadas como de alta complexidade.

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 desenvolvidos por RN's neste trabalho 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.

Conforme pode ser observado na literatura, existem muitos estudos aplicando RN's para classificação de tráfego e detecção de incidentes de tráfego em rodovias, porém a grande maioria dos estudos de previsão de acidentes de trânsito em rodovias têm sido desenvolvidos através de modelos estatísticos. A aplicação de RN's para obtenção de modelos de previsão de acidentes em rodovias ainda é incipiente, como se pode verificar pela escassez de trabalhos específicos.

6.2 RECOMENDAÇÕES

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, 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 de informações.

A demarcação quilométrica da rodovia e a localização de cada acidente que é feita pelo quilômetro mais a fração metros (km + m) é de fundamental importância para os estudos sobre segurança rodoviária. Ações de correção da demarcação quilométrica da rodovia podem prejudicar e até inutilizar trabalhos, pela variação da localização de cada acidente. O levantamento e correção destes desvios da

localização, normalmente são trabalhosos e de precisão duvidosa. Portanto, sendo inevitável a alteração da demarcação quilométrica de uma rodovia, é recomendável que os dados de acidentes sejam previamente armazenados em banco de dados para centralizar e uniformizar a correção do local de cada acidente, com cuidadoso planejamento para minimizar a incursão em erros.

6.3 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Como se trata de um estudo em desenvolvimento, informações a respeito de outras curvas deverão ser agregadas ao conjunto de dados. Além dos utilizados, outros parâmetros de entrada, tais como horário da ocorrência do acidente (dia ou noite), condições do pavimento, existência de sinalização vertical e horizontal, condições de conservação do(s) veículo(s), situação do(s) motorista(s), e outros, poderão ser introduzidos no modelo, melhorando ainda mais seu desempenho.

Além da adoção de um maior número de variáveis de entrada, é recomendável que o conjunto de dados seja ampliado com a introdução de mais curvas de rodovias de classe semelhante, e respectivos dados de acidentes. A tendência do comportamento dos modelos de RN's com a ampliação dos conjuntos de treinamento e de teste é uma melhoria na capacidade de generalização das redes e conseqüente redução dos erros de previsão.

Sugere-se como objeto de um estudo futuro, a continuidade deste trabalho com desenvolvimento e teste de outros tipos de RN's, como as redes função de base radial, lógica *fuzzy* ou mesmo, o emprego de outros processos de treinamento,

adoção de outras funções de ativação dos neurônios, e utilização de técnicas de extração de regras por RN's.

Sugere-se ainda, a utilização de RN's considerando saídas discretizadas por número de acidentes, ou seja, utilizar neurônios binários (com função de ativação tipo degrau) de saída, cada um representando uma certa quantidade de acidentes.

Para facilitar a utilização de um determinado modelo (RN), conforme visto no capítulo 5 deste trabalho, pode ser desenvolvido uma interface computacional amigável (gráfica) entre o usuário e a rede escolhida como ferramenta para avaliar o nível de segurança de curvas horizontais rodoviárias. Este procedimento possibilitará que o usuário, um engenheiro projetista conforme mencionado também no capítulo 5, seja dispensado de dominar a técnica montagem, treinamento e teste de RN's.

Também para trabalhos futuros sobre previsão de número de acidentes em rodovias, pode-se levar em conta todo o alinhamento em planta e ainda o perfil da rodovia. Intuitivamente pode-se contar com a melhoria do desempenho dos modelos de previsão do número de acidentes, tendo-se em vista que características geométricas do perfil e das tangentes, além das curvas horizontais, também influem na segurança das rodovias, e suas interações devem ser consideradas.

REFERÊNCIAS

ABDULHAI, Baher; RITCHIE, Stephen G. Enhancing the universality and transferability of freeway incident detection using a bayesian-based neural network. **Transportation Research**. Part C, v.7, p.261-280, 1999.

ABDEL-ATY, Mohamed A.; RADWAN, A. Essam. Modeling traffic accident occurrence and involvement. **Accident Analysis and Prevention**. v.32, p.633-642, 2000.

ADELI, Hojjat; KARIM, Asim. Fuzzy-wavelet RBFNN model for freeway incident detection. **Journal of Transportation Engineering**, v.126, n.6, p.464-471, 2000.

AWAD, Wael H.; JANSON, Bruce N. Prediction models for truck accidents at freeway ramps in Washington State using regression and artificial intelligence techniques. **Transportation Research Record**, 1635, p.30-36, 1997.

BENEKOHAL, Rahim F.; HASHMI, Asma M. Procedures for estimating accident reductions on two-lane highways. **Journal of Transportation Engineering, ASCE**, v.118, n.1, p.111-129, 1992.

CHOUERI, Elias M., et al. Safety aspects of individual design and their interactions on two-lane highways: international perspective. **Transportation Research Record**, 1445, p.34-46, 1994.

COSTA, Pedro S. da ; FIGUEIREDO, Wellington C. de. **Estradas estudos e projetos**. 1.ed. Salvador: EDUFBA, 2001. 408p.

DNER. **Manual de pavimentação**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1996. 320p.

DNER. **Manual de projeto geométrico de rodovias rurais**. Rio de Janeiro, 1999a. 195p.

DNER. **Manual de sinalização rodoviária.** Rio de Janeiro, 1999b. 175p.

DNER. **Programa emergencial para capacitação de pessoal do DNER:** Curso CT 4 - custos rodoviários. Rio de Janeiro: SET Consultoria; Roy Jorgensen Associates, 1994a. 2v. (Manual do aluno).

DNER. **Programa emergencial para capacitação de pessoal do DNER:** Curso OR 5 - operação rodoviária. Rio de Janeiro: SET Consultoria; Roy Jorgensen Associates, 1994b. 1v. (Manual do aluno).

DNER. **Programa emergencial para capacitação de pessoal do DNER:** Curso TS 15 - tráfego e segurança rodoviária. Rio de Janeiro: SET Consultoria; Roy Jorgensen Associates, 1994c. v.2 (Manual do aluno).

DNER. IPR. **Treinamento em conservação rodoviária.** Rio de Janeiro: Divisão de Treinamento e Conclaves, 1982. 2v. (Apostila).

DOUGHERTY, M.S. A review of neural networks applied to transport. **Transportation Research C**, v.3, n.4, p.247-260, 1995.

DOWNING, Douglas; CLARK, Jeffrey. **Estatística aplicada.** São Paulo: Saraiva, 2000. 455p.

DYMINSKI, A. S. **Análise de problemas geotécnicos através de redes neurais.** Rio de Janeiro, 2000. 1v. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio.

GEIPOT. **O acidente de tráfego: flagelo nacional evitável.** Brasília: GEIPOT, 1987. 71p.

GEIPOT. **Transporte rodoviário.** In: Anuário estatístico. Disponível em: <http://www.geipot.gov.br/novaweb/indexanu.htm> Acesso em 30 jun. 2003.

GIBREEL, G. M. et al. State of art of highway geometric design consistency. **Journal of Transportation Engineering**, v.125, n.4, p.305-313, 1999.

GOLD, Philip Anthony. Segurança rodoviária. In: SIMPÓSIO SOBRE OBRAS RODOVIÁRIAS, 2., 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABGE, 2002. p.7-11.

GOLIAS, J. C. Establishing relationship between accidents and flows at urban priority road junctions. **Accid. Anal. & Prev.** v.24, n.6, p.689-694, 1992.

GREIBE, Poul. Accident prediction models for urban roads. **Accidents Analysis and Prevention**, v.35, p.273-285, 2003.

HAYKIN, Simon. **Redes neurais: princípios e prática.** 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 900p.

IBGE. Área territorial. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/> Acesso em 02 jul. 2003. a

IBGE. Censo demográfico - 2000: características gerais da população: resultados da amostra. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/> Acesso em 02 jul. 2003. b

ISHAK, Sherif; AL-DEEK, Haitham. Performance of automatic ANN-Based incident detections on freeways. **Journal of Transportation Engineering**, v.125, n.4, p.281-290, 1999.

KARLAFTIS, Matthew G.; GOLIAS, Ioannis. Effects of road geometry and traffic volumes on rural roadway accident rates. **Accident Analysis and Prevention**, v.34, p.357-365, 2002.

LAMM, Ruediger; HAYWARD, John C.; CARGIN, Jeffrey G. Comparison of different procedures for evaluating speed consistency. **Transportation Research Record**, 1100, p.10-20, 1986.

LAMM, Ruediger; GUENTHER, Artur K.; CHOUEIRI, Elias M. Safety module for highway geometric design. **Transportation Research Record**, 1512, p.7-15, 1995.

LOTTI, Cyntia Perpétua. **Método de sistematização e levantamento de dados para o estudo da relação de acidentes com o alinhamento em planta e perfil de uma rodovia**. São Carlos, 2002. 2v. Tese (Doutorado em Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos da USP.

LUPTON, K.; ZHANG, P.; WRIGHT, C.C. The estimation of highway geometry for road accident analysis. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport**, v.135, p.173-84, 1999.

MATHWORKS. **Statistics toolbox**: for use with MATLAB. Natick: The MathWorks, 2002. 1 CD-ROM.

MESSER, Carroll J. Methodology for evaluating geometric design consistency. **Transportation Research Record**, 757, p. 7-14, Washington D.C., 1980.

MIAOU, Shaw-Pin; LUM, Harry. Modeling vehicle accidents and highway geometric design relationships. **Accident Analysis and Prevention**. v.25, n.6, p.689-709, 1993.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. DNER. **Normas para o projeto geométrico de estradas de rodagem**. Rio de Janeiro: DNER, [19?]. 89p.

MOUNTAIN, Linda; FAWAZ, Bachir; JARRET, David. Accident prediction models for roads with minor junctions. **Accident Analysis and Prevention**. v.28, n.6, p.695-707, 1996.

NOGUEIRA, Antonio Augusto Ruiz. **Análise da relação da geometria de rodovias e acidentes envolvendo veículos de carga**. São Carlos, 1995. 101f. Dissertação (Mestrado em Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos.

PÉREZ PÉREZ, Ignacio. 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, 2002.

PROTOS Engenharia. **Esclarecimentos a respeito do relatório “seções críticas”**. Rio de Janeiro: Protos Engenharia, 1986. (Fotocópia).

REZK, Marcelo Chaim. Redução de acidentes em curvas críticas na rodovia Pres. Dutra. In: SIMPÓSIO SOBRE OBRAS RODOVIÁRIAS, 2., 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABGE, 2002. p.13-18.

SANTOS, Benjamim Jorge Rodrigues dos. **Consistência da geometria de rodovias**. São Carlos, 1992. 60p. Dissertação (Mestrado em Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos.

SANTOS, Benjamim Jorge Rodrigues dos. **A consistência da geometria de rodovias: principais metodologias e contribuição ao método do módulo de segurança**. São Carlos, 1998. 252p. Tese (Doutor em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SHANKAR, Venkataraman; MANNERING, Fred; BARFIELD, Woodrow. Effect of roadway geometrics and environmental factors on rural freeway accident frequencies. **Accident Analysis and Prevention**. v.27, n.3, p.371-389, 1995.

SHANKAR, V.; MILTON, J.; MANNERING, F. Modeling accident frequencies as zero-altered probability processes: an empirical inquiry. **Accidents Analysis and Prevention**, v.29, n.6, p.829-837, 1997.

STEVENSON, William J. **Estatística aplicada à administração**. São Paulo: Harbra, c1981. 495p.

TOLOMEI, Claudio; MELLO, Elmar P. de. **Um modelo para identificação dos segmentos críticos de uma rede de rodovias**. Rio de Janeiro: DNER, 1986. 1v.

VOGT, Andrew; BARED, Joe. Accident models for two-lane rural segments and intersections. **Transportation Research Record**, 1635, p.18-29, 1997.

YANG, Hai; QIAO, Fengxiang. Neural network approach to classification of traffic flow states. **Journal of Transportation Engineering, ASCE**, v.124, n.6, p.521-525, 1998.

ZEGEER, Charles V., et al. Safety effects of geometric improvements on horizontal curves. **Transportation Research Record**, 1356, p.11-19, 1992.

ANEXOS

ANEXO I

BOLETINS DE OCORRÊNCIAS

ANEXO II

PLANILHA DE ACIDENTE

ANEXO III

PLANILHA 1

ANEXO IV

PLANILHA 2