

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**UTILIZAÇÃO DA LÓGICA FUZZY PARA  
DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE LIMITE EM  
RODOVIAS**

**GABRIEL ANDRADE LANZARO**

**ORIENTADORA: MICHELLE ANDRADE**

**PROJETO FINAL EM ENGENHARIA CIVIL**

**BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO/2018**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**UTILIZAÇÃO DA LÓGICA FUZZY PARA DETERMINAÇÃO DA  
VELOCIDADE LIMITE EM RODOVIAS**

**GABRIEL ANDRADE LANZARO**

**TRABALHO DE PROJETO FINAL SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE  
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.**

**APROVADO POR:**

---

**MICHELLE ANDRADE, Dra (UnB)  
ORIENTADORA**

---

**PASTOR WILLY GONZALES TACO, Dr. (UnB)  
EXAMINADOR**

---

**FÁBIO ZANCHETTA, Dr. (UnB)  
EXAMINADOR**

**BRASÍLIA/DF, 10 de DEZEMBRO de 2018.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

LANZARO, GABRIEL ANDRADE

Utilização da Lógica *Fuzzy* para Determinação da Velocidade Limite em Rodovias. Distrito Federal, 2018.

xiii, 106p, 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2018).

Trabalho de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Velocidade Limite

2. Lógica *Fuzzy*

3. Algoritmo Genético

4. Rodovias

5. Sistema Especialista

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LANZARO, G.A. (2018). Utilização da Lógica *Fuzzy* para a Determinação da Velocidade Limite em Rodovias. Trabalho de Projeto Final. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, DF, 106p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Gabriel Andrade Lanzaro

TÍTULO DO TRABALHO DE PROJETO FINAL: Utilização da Lógica *Fuzzy* para Determinação da Velocidade Limite em Rodovias.

GRAU/ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2018.

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Gabriel Andrade Lanzaro  
QE 12, Conjunto G, Casa 24, Guará  
CEP: 71010-370 – Brasília/DF – Brasil.

## AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, professora Michelle, pelos inúmeros ensinamentos e pela confiança depositada em mim nesses anos de convivência. Uma pessoa que aprendi a admirar e me inspirar, sempre me incentivando a buscar meus objetivos. Obrigado por todo o companheirismo e pela amizade nesse período. Sou muito grato por todo o aprendizado não somente em termos acadêmicos, mas também em relação ao crescimento pessoal.

Aos meus pais, Marcelo e Joelma, ao meu irmão Victor Hugo e à minha avó Neuza por todo o suporte prestado e pelo apoio incondicional durante estes cinco anos de graduação. Considero a família o pilar básico de qualquer ser humano e vocês são fundamentais para mim.

A todos os meus amigos feitos durante a graduação, que permitiram que esta jornada se tornasse possível e, acima de tudo, mais agradável.

Aos professores do curso de Engenharia Civil pelos ensinamentos transmitidos a mim neste período.

À empresa RHUMB Planejamento e Urbanismo, aos seus funcionários e ao Davi Navarro, por proporcionaram um grande aprendizado para mim enquanto estagiário e pela compreensão quando tive necessidade de me dedicar à universidade.

Aos especialistas que se prontificaram a responder meus questionários, permitindo que eu tivesse uma base de dados para a realização deste trabalho.

A Deus, pois sem Ele nada disso seria possível.

A todos que contribuíram diretamente ou indiretamente para a minha graduação, meu muito obrigado.

## RESUMO

### UTILIZAÇÃO DA LÓGICA *FUZZY* PARA DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE LIMITE EM RODOVIAS

A determinação da velocidade limite de um trecho rodoviário, no Brasil, é um processo essencialmente subjetivo, pois não há uma metodologia clara para a consideração dos fatores que possam influenciar o estabelecimento de um valor para a velocidade. Uma das alternativas para superar esta dificuldade está no desenvolvimento de um sistema especialista, que possa reduzir as incertezas do procedimento e subsidie a tomada de decisão pelo responsável por definir as velocidades. Nesse contexto, dadas as características do problema, a lógica *fuzzy* se mostra como uma ferramenta adequada por simular o raciocínio humano englobando o conceito de variáveis linguísticas, pois as variáveis para determinação da velocidade limite, em sua maioria, não possuem quantificação clara e objetiva.

Portanto, o objetivo deste trabalho foi conceber um sistema especialista, com emprego da lógica *fuzzy*, que viabilize a definição da velocidade limite em rodovias.

Primeiramente, houve a necessidade de identificar as variáveis mais relevantes para a determinação de velocidade limite em rodovias, procedimento para o qual foi utilizado o método *fuzzy* multicritério para tomada de decisão. Em seguida, o sistema especialista *fuzzy* foi elaborado com base no conhecimento obtido junto à especialistas na área por meio de um questionário, que permitiu a construção das funções de pertinência e da base de regras.

As saídas do sistema foram parcialmente satisfatórias quando comparadas com as respostas que subsidiaram a construção do controlador *fuzzy*. Entretanto, notou-se que a lógica *fuzzy* se destaca como uma alternativa para a modelagem da determinação da velocidade limite em rodovias, sendo necessários estudos futuros neste tema para o aperfeiçoamento da técnica

**Palavras-chave:** Velocidade limite, lógica *fuzzy*, rodovias, algoritmo genético, sistema especialista.

**ABSTRACT**

**APPLICATION OF THE FUZZY LOGIC FOR THE SETTLEMENT OF  
HIGHWAY SPEED LIMITS**

The determination of speed limits for a highway segment, in Brazil, is essentially a subjective procedure, since there is not a clear methodology for considering the factors that may influence the settlement of a value for speed. One of the alternatives to overcome this difficulty is in the development of an expert system that might reduce the uncertainties of the procedure and subsidize the decision-making process of the expert responsible for the speed settlement. In these circumstances, given the problem's characteristics, the fuzzy logic turns up as a tool proper for simulating the human reasoning, encompassing the concept of linguistic variables. This is important because the variables for the determination of speed limits mostly do not have a clear and objective quantification.

Therefore, the aim of this work was to develop an expert system, with the usage of the fuzzy logic, that may allow the settlement of highway speed limits.

Firstly, there was the need of identifying the most relevant variables for the settlement of highway speed limits, procedure in which the fuzzy multiple criteria decision-making method was employed. After that, the fuzzy system was conceived based on the knowledge acquired from experts through a questionnaire. This data made possible the construction of membership functions and fuzzy rules.

The system outputs have been partially satisfactory when compared to the responses that allowed the conception of the fuzzy control. However, it can be seen that the fuzzy logic stands out as an alternative to modeling the settlement of highway speed limits, and future research is needed on such topic so that the technique can be ameliorated.

**Key-words:** Speed limits, fuzzy logic, highways, genetic algorithm, expert system.

## SUMÁRIO

<b>1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 - APRESENTAÇÃO .....	1
1.2 - CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	2
1.3 - HIPÓTESE.....	3
1.4 - OBJETIVOS .....	3
1.5 - JUSTIFICATIVA .....	3
1.6 - METODOLOGIA .....	4
1.6.1 - Etapa 1: Revisão Bibliográfica.....	5
1.6.2 - Etapa 2: Definição dos Fatores que Influenciam a Velocidade Limite.....	5
1.6.3 - Etapa 3: Concepção do Sistema Especialista <i>Fuzzy</i> .....	5
1.6.4 - Etapa 4: Teste do Sistema Especialista <i>Fuzzy</i> .....	6
1.7 - ESTRUTURA DO PROJETO FINAL .....	6
<b>2 - DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE LIMITE .....</b>	<b>7</b>
2.1 - INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE LIMITE NA SEGURANÇA VIÁRIA .....	7
2.2 - FATORES QUE INFLUENCIAM A DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE LIMITE NO BRASIL E EM OUTROS PAÍSES .....	11
2.3 - MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE LIMITE .....	18
2.3.1 - Limites Estatuários.....	18
2.3.2 - Limites Ótimos.....	19
2.3.3 - Limites baseados em Estudos de Engenharia.....	19
2.3.4 - Limites baseados em Sistemas Especialistas .....	20
2.3.5 - Limites baseados na Minimização de Acidentes .....	21
2.3.6 - Limites Variáveis .....	22
2.3.7 - Situações sem Limite de Velocidade .....	22
2.4 - TÓPICOS CONCLUSIVOS.....	23
<b>3 - TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL.....</b>	<b>25</b>
3.1 - LÓGICA FUZZY.....	27
3.1.1 - Principais Propriedades dos Conjuntos <i>Fuzzy</i> .....	30
3.1.2 - Sistemas de Controle <i>Fuzzy</i> .....	32
3.1.3 - Método <i>Fuzzy</i> Multicritério para Tomada de Decisão.....	33
3.2 - ALGORITMOS GENÉTICOS .....	34

3.3 - UTILIZAÇÃO DE ALGORITMOS GENÉTICOS NA LÓGICA FUZZY .....	37
3.4 - TÓPICOS CONCLUSIVOS .....	38
<b>4 - DEFINIÇÃO DOS FATORES QUE INFLUENCIAM A VELOCIDADE LIMITE EM RODOVIAS .....</b>	<b>39</b>
4.1 - SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS .....	40
4.2 - PROCEDIMENTO PARA CONSULTA A ESPECIALISTAS (QUESTIONÁRIO 01) .....	41
4.3 - METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DOS PESOS.....	43
4.4 - RESULTADOS.....	48
4.5 - TÓPICOS CONCLUSIVOS .....	52
<b>5 - CONCEPÇÃO DO SISTEMA ESPECIALISTA.....</b>	<b>54</b>
5.1 - PROCEDIMENTO PARA CONSULTA A ESPECIALISTAS (QUESTIONÁRIO 02) .....	54
5.2 - PROCEDIMENTO PARA QUANTIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS .....	56
5.2.1 - Uso do Solo .....	56
5.2.2 - Acidentalidade.....	57
5.2.3 - Uso e Ocupação nas Áreas Lindeiras .....	58
5.2.4 - Relevo .....	59
5.2.5 - Condição Geométrica.....	60
5.2.6 - Elementos nas Margens das Vias .....	62
5.3 - CONSTRUÇÃO DAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA.....	62
5.4 - CONSTRUÇÃO DO SISTEMA ESPECIALISTA POR MEIO DE UM CONTROLADOR <i>FUZZY</i> .....	70
5.5 - TESTE DO SISTEMA ESPECIALISTA .....	73
5.6 - TÓPICOS CONCLUSIVOS .....	76
<b>6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>79</b>
6.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	79
6.2 - CUMPRIMENTO DOS OBJETIVOS.....	80
6.3 - LIMITAÇÕES DO ESTUDO .....	80
6.4 - SUGESTÕES DE ESTUDOS FUTUROS .....	81
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>84</b>
<b>APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO 01: DEFINIÇÃO DOS FATORES QUE INFLUENCIAM A VELOCIDADE LIMITE EM RODOVIAS .....</b>	<b>90</b>



<b>APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO 02: DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE LIMITE EM RODOVIAS.....</b>	<b>96</b>
<b>APÊNDICE C – SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS A PARTIR DO CÁLCULO DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO.....</b>	<b>99</b>
<b>APÊNDICE D – VALORES UTILIZADOS PARA MONTAGEM DAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA DOS CONJUNTOS <i>FUZZY</i> ....</b>	<b>100</b>
<b>APÊNDICE E – BASE DE REGRAS .....</b>	<b>104</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1</b> – Valores dos Coeficientes do Modelo Exponencial para Rodovias .....	9
<b>Tabela 2.2</b> – Limites de Velocidade para Rodovias não Sinalizadas .....	11
<b>Tabela 2.3</b> – Fatores de Alta Relevância para Determinação da Velocidade Limite em Rodovias Brasileiras, segundo Marques (2012).....	13
<b>Tabela 2.4</b> – Variáveis selecionadas por Gregório <i>et al.</i> (2015) para a correlação com a velocidade limite.....	14
<b>Tabela 2.5</b> – Fatores mais utilizados para definição da Velocidade Limite nos Estados Unidos.....	15
<b>Tabela 2.6</b> – Fatores considerados para definição da Velocidade Limite pelo Sistema Especialista USLIMITS2.....	17
<b>Tabela 2.7</b> – Possíveis Velocidades Toleráveis segundo o Programa Visão Zero .....	22
<b>Tabela 3.1</b> – Funções de Pertinência do <i>software</i> MATLAB® .....	29
<b>Tabela 4.1</b> – Variáveis Selecionadas para Consulta a Especialistas.....	41
<b>Tabela 4.2</b> – Exemplo de Funções de Pertinência <i>Fuzzy</i> para Escala Likert.....	43
<b>Tabela 4.3</b> – Respostas após a Aplicação de um Questionário.....	44
<b>Tabela 4.4</b> – Inserção de Parâmetros <i>Fuzzy</i> nas Respostas de um Questionário.....	44
<b>Tabela 4.5</b> – Valores de Consistência para o Coeficiente Alfa de Cronbach .....	50
<b>Tabela 4.6</b> – Obtenção dos Pesos para os Fatores que Influenciam a Velocidade Limite em Rodovias .....	50
<b>Tabela 5.1</b> – Termos Linguísticos Utilizados no Questionário 02 .....	54
<b>Tabela 5.2</b> – Número de Vagas Associados a Cada PGV .....	59
<b>Tabela 5.3</b> – Resumo dos Resultados Numéricos para as Variáveis de Entrada considerando o Método Indutivo de Aprendizado .....	65
<b>Tabela 5.4</b> – Resumo dos Resultados Numéricos para a Velocidade Limite considerando o Método Indutivo de Aprendizado.....	66
<b>Tabela 5.5</b> – Parâmetros das Funções <i>Fuzzy</i> para as Variáveis de Entrada.....	67
<b>Tabela 5.6</b> – Parâmetros das Funções <i>Fuzzy</i> para a Velocidade Limite.....	67
<b>Tabela 5.7</b> – <i>Outputs</i> do Sistema para os 20 Cenários Propostos.....	73
<b>Tabela 5.8</b> – Comparação entre <i>Outputs</i> e Respostas dos Especialistas .....	74
<b>Tabela 5.9</b> – Medidas Estatísticas para os <i>Outputs</i> e para as Respostas dos Especialistas para a Velocidade Limite.....	75
<b>Tabela C.1</b> – Cálculo do Erro Quadrático Médio após Recálculo dos Pesos.....	99

<b>Tabela D.1</b> – Classe de Cada Cenário e <i>Links</i> para Visualização .....	100
<b>Tabela D.2</b> – Valores Numéricos para a Variável “Uso do Solo”.....	100
<b>Tabela D.3</b> – Descrição das Ocupações e Valores Numéricos para a Variável Uso e Ocupação nas Áreas Lindeiras .....	101
<b>Tabela D.4</b> – Valores Numéricos para as Variáveis “Acidentalidade” e “Declividade” .....	101
<b>Tabela D.5</b> – Valores Numéricos para a Variável “Condição Geométrica”.....	102
<b>Tabela D.6</b> – Valores Numéricos para a Variável – Elementos nas Margens das Vias .....	102
<b>Tabela D.7</b> – Conjuntos <i>Fuzzy</i> para as Variáveis Linguísticas das Variáveis de Entrada .....	103
<b>Tabela D.8</b> – Conjuntos <i>Fuzzy</i> para as Variáveis Linguísticas da Velocidade Limite	103
<b>Tabela E.1</b> – Base de Regras como Resultado da Consulta a Especialistas.....	104

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> – Metodologia do Projeto Final .....	5
<b>Figura 2.1</b> – Associação entre Taxa de Envolvimento em Acidentes e Velocidade por Fase do Dia, segundo Solomon (1964).....	8
<b>Figura 2.2</b> – Influência da Diferença de Velocidades no Envolvimento em Acidentes, segundo Solomon (1964).....	10
<b>Figura 3.1</b> – Métodos de Engenharia do Conhecimento .....	27
<b>Figura 3.2</b> – Aplicação da União e da Interseção para Conjuntos <i>Fuzzy</i> .....	32
<b>Figura 3.3</b> – Diagrama de Controlador <i>Fuzzy</i> .....	32
<b>Figura 3.4</b> – Diagrama de um Algoritmo Genético.....	37
<b>Figura 4.1</b> – Localização e Quantidade de Respondentes do Questionário 01 .....	42
<b>Figura 4.2</b> – Funções de Pertinência para o Problema Proposto .....	43
<b>Figura 4.3</b> – Ilustração do Método Estocástico Uniforme.....	47
<b>Figura 5.1</b> – Localização e Quantidade de Respondentes do Questionário 02 .....	55
<b>Figura 5.2</b> – Construção de Função de Pertinência Triangular a partir do Método Indutivo de Aprendizado.....	64
<b>Figura 5.3</b> – Construção de Funções de Pertinência Trapezoidais a partir do Método Indutivo de Aprendizado .....	64
<b>Figura 5.4</b> – Funções de Pertinência para a Variável “Uso do Solo”.....	67
<b>Figura 5.5</b> – Funções de Pertinência para a Variável “Acidentalidade” .....	68
<b>Figura 5.6</b> – Funções de Pertinência para a Variável “Uso e Ocupação nas Áreas Lindeiras” .....	68
<b>Figura 5.7</b> – Funções de Pertinência para a Variável “Relevo” .....	68
<b>Figura 5.8</b> – Funções de Pertinência para a Variável “Condição Geométrica”.....	69
<b>Figura 5.9</b> – Funções de Pertinência para a Variável “Elementos nas Margens das Vias” .....	69
<b>Figura 5.10</b> – Funções de Pertinência para a Saída “Velocidade Limite”.....	69
<b>Figura 5.11</b> – Interface do Sistema <i>Fuzzy</i> para Definição de Velocidade Limite em Rodovias.....	72
<b>Figura 5.12</b> – Distribuição Normal para os <i>Outputs</i> e para as Respostas dos Respondentes .....	75

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
AG	Algoritmo Genético
CTB	Código de Trânsito Brasileiro
IA	Inteligência Artificial
PGV	Polo Gerador de Viagem

# **1 - INTRODUÇÃO**

## **1.1 - APRESENTAÇÃO**

O estabelecimento da velocidade limite em trechos rodoviários é uma tarefa de grande importância para o tráfego na região. Limites acima do recomendado podem induzir a um aumento da ocorrência de acidentes de trânsito ao passo que, quando abaixo do ideal, acarretam em prejuízos à fluidez. Dessa forma, a dificuldade se concentra em escolher um limite de velocidade que seja condizente com a localidade, sendo capaz de englobar diversas questões relevantes para os usuários do sistema de trânsito, incluindo motoristas, pedestres e ciclistas.

Em se tratando de rodovias, sabe-se que elas são normalmente projetadas para atender a uma velocidade de projeto específica de acordo com a classificação técnica (e, conseqüentemente, com o volume de tráfego) para uma dada condição de relevo (DNER, 1999). Entretanto, o crescimento muitas vezes desordenado dos centros urbanos possibilitou, em diversos casos, a ocupação de áreas lindeiras às rodovias, resultando na presença de condições não originalmente previstas no Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais, como a existência de pedestres e interseções em nível.

Além disso, em muitos casos, não é possível a manutenção de um traçado contínuo e sem defeitos em toda a extensão da rodovia. A existência de trechos com alinhamento adverso (por falha de projeto e/ou condição inevitável devido ao relevo) faz com que se torne necessária a redução da velocidade, sendo esperado que a sinalização alerte o motorista quanto ao perigo em sua frente.

Portanto, apesar de desejável que seja mantida a mesma velocidade em toda a extensão da rodovia, em muitos trechos pode ser necessária a mudança em relação ao valor de projeto por existirem condições desfavoráveis. Entretanto, uma das maiores dificuldades está relacionada a não se saber, exatamente, o quanto cada fator impacta a redução da velocidade de um segmento viário.

No Brasil, o Manual de Sinalização Vertical de Regulamentação (CONTRAN, 2007) enumera alguns elementos de relevância para definir a velocidade limite, mas não são expostos como estes fatores estão relacionados e de que forma, objetivamente, eles influenciam no

estabelecimento de uma velocidade. Cabe citar o exemplo do fator “segurança em curvas” que, segundo o referido manual, é importante para classificar um trecho quanto à velocidade. Entretanto, não são citados raios de curvatura característicos para isto e, além disso, em quantos km/h deveria ser reduzida a velocidade mediante esta catalogação.

Embora o processo seja essencialmente subjetivo no Brasil, já existem metodologias em outros países que buscam tornar o processo de definição da velocidade limite mais objetivo. Sistemas especialistas foram concebidos, por exemplo, nos Estados Unidos e na Austrália, mas estes foram desenvolvidos para realidades específicas e dificilmente são aplicáveis em outros locais. A mesma ideia é válida para os suecos, que empregam os preceitos do Programa Visão Zero para definir os limites de velocidade, mas a disparidade em relação ao cenário brasileiro torna-se um indicativo de que tal metodologia apresentaria dificuldades de ser implantada no Brasil.

A não uniformização deste processo de definição da velocidade limite, no Brasil, faz com que trechos com características similares apresentem velocidades diferentes. Destaca-se, portanto, a necessidade de estudos que visem o esclarecimento dos elementos a serem empregados neste processo, com propostas de métodos mais objetivos e que minimizem o grau de incerteza.

## **1.2 - CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA**

No que se refere à promoção de uma fluidez adequada ao tráfego, sem comprometer a segurança dos usuários que utilizam a rodovia, há a necessidade de estabelecer um limite de velocidade condizente com as suas características. Entretanto, em se tratando da realidade brasileira, não há uma definição clara quanto aos fatores a serem considerados e, além disso, o estabelecimento de um limite de velocidade em função das características de uma dada localidade é subjetivo, dependendo de critérios estabelecidos a partir da interpretação do especialista do órgão de trânsito da região.

A determinação dos fatores de relevância, bem como a importância relativa entre eles para, enfim, estabelecer a velocidade limite em uma rodovia, depende de diversos fatores subjetivos. Muitos dos elementos no contexto de caracterização de trechos rodoviários não podem ser avaliados com a lógica binária (sim, não; pertence, não pertence; 0, 1). Por exemplo, a área limdeira da rodovia em termos de ocupação pode ser definida como urbana ou rural, no entanto, esses cenários não possuem um limite claro entre si. Elementos com definições imprecisas são

bem representados matematicamente por meio da lógica *fuzzy* que surge então como uma alternativa de modelagem para esse estudo.

Desta forma, é necessário investigar como a lógica *fuzzy* pode ser utilizada para modelar a determinação de velocidade limite em rodovias, com foco na concepção de um sistema especialista, minimizando a subjetividade inerente a esse processo.

### **1.3 - HIPÓTESE**

A lógica *fuzzy* pode ser utilizada para desenvolver um sistema especialista que vise a determinação da velocidade limite em rodovias, com função de facilitar a definição dos limites de velocidade, minimizando o grau de subjetividade, e subsidiar a tomada de decisão.

### **1.4 - OBJETIVOS**

O objetivo geral deste projeto final é desenvolver um sistema especialista, utilizando a lógica *fuzzy*, que seja capaz de definir a velocidade limite em rodovias brasileiras, constituindo uma ferramenta para auxiliar o processo de tomada de decisão.

Como objetivos específicos, busca-se:

- Identificar os fatores e como eles influenciam a definição de velocidade limite em rodovias, a partir do uso da lógica *fuzzy*;
- Testar as saídas do sistema proposto a fim de verificar a aplicabilidade do modelo.

### **1.5 - JUSTIFICATIVA**

Diante da importância da definição da velocidade limite em rodovias, ressalta-se a necessidade de realizar estudos que objetivem a clarificação do processo, tendo em vista que as variáveis são subjetivas e não se sabe exatamente como cada uma delas influencia na determinação da velocidade limite.

No Brasil, a velocidade limite, como tema central, foi pouco investigada nas últimas décadas. Tsu (2003 *apud* Basso, 2008), Basso (2008) e Marques (2012) foram alguns que estudaram esta questão, embora tivessem focos diferentes. Os dois primeiros buscaram comparar limites de velocidade calculados, em termos da velocidade operacional, com os legalmente estabelecidos por órgãos de trânsito, ao passo que Marques (2012) utilizou o método da análise hierárquica



para o estabelecimento da importância relativa entre os fatores de relevância para a definição da velocidade limite.

Considerando as incertezas que regem este problema, a lógica *fuzzy* se destaca por ser uma ferramenta de inteligência artificial capaz de lidar com este tipo de dificuldade. O processo de caracterização de um trecho rodoviário acaba por demandar o uso de descrições, como por exemplo, a condição de relevo que não é representada diretamente por uma variável numérica. Dessa forma, tentar descrevê-las em termos de métodos estatístico-matemáticos convencionais, como usualmente é feito em diversas áreas da engenharia, torna-se uma tarefa árdua.

Mello & Chiodi (2018) utilizaram a lógica *fuzzy* como instrumento para sugerir redução dos limites de velocidade em rodovias. Foram obtidos resultados satisfatórios em termos de medidas de desempenho para indicadores de segurança viária, porém o sistema proposto foi desenvolvido somente para avaliar velocidades limites existentes e possibilitar a implantação de limites variáveis em função de condições adversas. Dessa forma, não houve ganhos significativos para o processo de definição da velocidade, que é pautado hoje pela avaliação particular do especialista.

A concepção de um sistema, neste contexto, traria grandes benefícios para uniformizar a definição da velocidade limite, permitindo que, por exemplo, vias com características similares sejam classificadas da mesma forma. Dessa forma, tal ferramenta constituiria um importante suporte à tomada de decisão do especialista responsável por definir os limites de velocidade.

Além disso, sabe-se que a velocidade limite impacta diretamente a escolha da velocidade operacional que, por sua vez, exerce influência na segurança viária. Assim, a escolha de limites velocidades contribui para a redução do número de acidentes de trânsito.

## **1.6 - METODOLOGIA**

Para alcançar os objetivos propostos, o trabalho foi dividido em quatro etapas. A Figura 1.1 a seguir apresenta a proposta de metodologia deste trabalho.

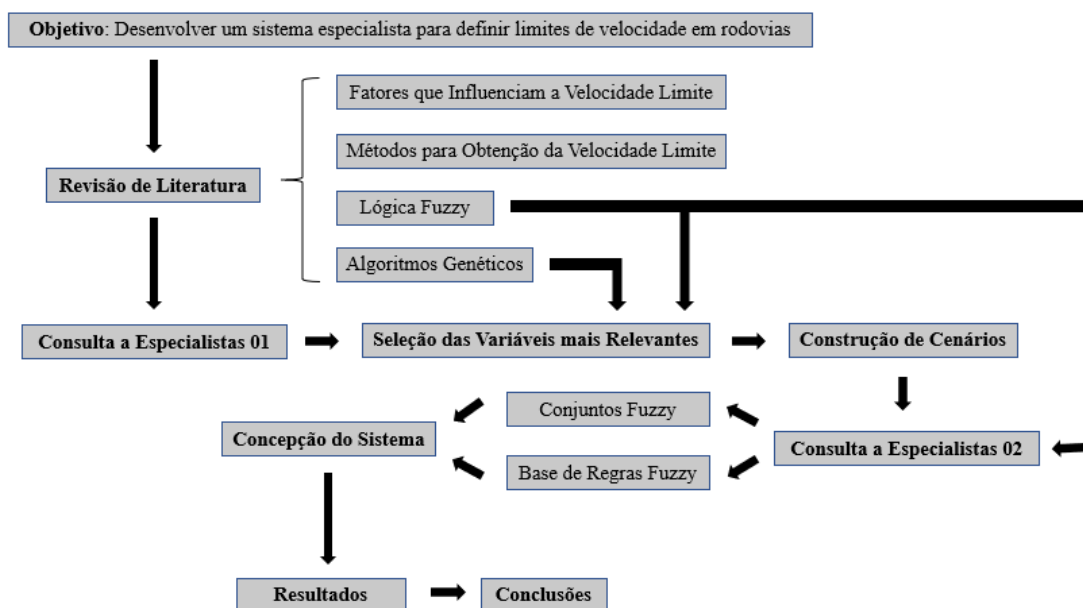


Figura 1.1 – Metodologia do Projeto Final

### 1.6.1 - Etapa 1: Revisão Bibliográfica

O estudo foi pautado, primeiramente, em uma revisão de literatura acerca do processo de definição de velocidade limite e de técnicas de inteligência artificial. Portanto, foram avaliados elementos como a importância da velocidade limite no contexto da segurança viária, os fatores relevantes para a sua definição e as metodologias usualmente empregadas para isto. Quanto à inteligência artificial, foram analisados elementos da lógica *fuzzy* e de algoritmos genéticos, pois a utilização conjunta destes permite a otimização das soluções do problema de maneira mais rápida e menos dispendiosa.

### 1.6.2 - Etapa 2: Definição dos Fatores que Influenciam a Velocidade Limite

Em seguida, foi feita uma primeira consulta a especialistas, isto é, pessoas responsáveis por definir a velocidade limite em rodovias. Nesta etapa os entrevistados foram questionados quanto à importância de alguns fatores para o processo de seleção de uma velocidade. Para o tratamento dos dados e a consequente hierarquização das variáveis, foi utilizado o método *fuzzy* multicritério para tomada de decisão associado a algoritmos genéticos.

### 1.6.3 - Etapa 3: Concepção do Sistema Especialista *Fuzzy*

Após a seleção das variáveis mais relevantes, foi feita uma segunda consulta a especialistas. Foram elaborados 20 cenários de trechos rodoviários, dentre os quais os entrevistados deveriam avaliar características gerais e atribuir um valor de velocidade limite. As respostas do

questionário subsidiaram a construção de uma base de regras, estruturada da forma “se-então”, e das funções de pertinência. Em posse destes elementos, foi possível conceber um sistema especialista *fuzzy*.

#### **1.6.4 - Etapa 4: Teste do Sistema Especialista *Fuzzy***

Com o sistema consolidado, as saídas foram testadas a fim de verificar se os valores eram coerentes com as respostas dos especialistas. Tais resultados permitiram a proposição de estudos futuros, bem como destacaram a lógica *fuzzy* como uma ferramenta adequada para definir limites de velocidade em rodovias.

### **1.7 - ESTRUTURA DO PROJETO FINAL**

O projeto final aqui apresentado foi elaborado em seis capítulos.

No capítulo 1, constam os aspectos introdutórios do trabalho, tais como apresentação, objetivos, metodologia, problematização e justificativas.

O capítulo 2 apresenta a revisão teórica com respeito às questões de velocidade: importância da determinação da velocidade limite para a segurança viária, fatores que influenciam na determinação da velocidade limite e modelagem para obtenção da velocidade limite.

O capítulo 3 traz a revisão relativa às técnicas de inteligência artificial utilizadas neste trabalho. Sendo assim, são apresentados conceitos e aplicações de lógica *fuzzy* e de algoritmos genéticos.

No capítulo 4 são apresentados os procedimentos para a primeira consulta a especialistas, a metodologia para obtenção dos pesos e os resultados da aplicação do método *fuzzy* de análise multicritério, tornando possível a seleção das variáveis.

No capítulo 5 são mostrados os procedimentos para elaboração dos cenários e do segundo questionário e, além disso, a construção da base de regras e do controlador *fuzzy* a fim de idealizar o sistema especialista. Por fim, são avaliadas as saídas do sistema.

Finalmente, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões da pesquisa realizada, bem como os problemas e as limitações encontradas no desenvolvimento do trabalho. Por fim, são propostas recomendações para trabalhos futuros.

## **2 - DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE LIMITE**

Para a determinação da velocidade limite em rodovias, podem ser adotados diversos métodos relacionados tanto a recomendações de entidades reguladoras quanto a metodologias mais específicas, como com a utilização de sistemas especialistas. Além disso, é de fundamental importância o entendimento dos fatores que intervêm para a definição destas velocidades para que as variáveis deste processo sejam utilizadas corretamente no âmbito da modelagem.

A adequada definição da velocidade limite representa um papel significativo em termos de proporcionar maior fluidez ao tráfego e minimizar os riscos para a ocorrência de acidentes, sendo uma tarefa árdua encontrar o equilíbrio entre estes objetivos (CORREIA & SILVA, 2011).

Desta forma, este capítulo contempla a revisão bibliográfica referente aos aspectos mais significativos para determinação da velocidade limite: relação da velocidade limite com a segurança viária, fatores que influenciam a determinação da velocidade limite no Brasil e em outros países e técnicas para a determinação da velocidade limite.

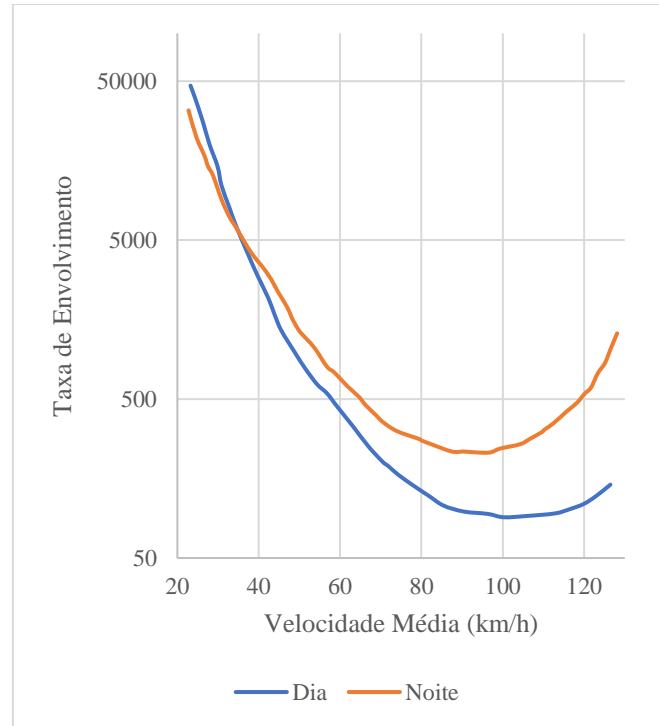
### **2.1 - INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE LIMITE NA SEGURANÇA VIÁRIA**

O processo de definição de velocidades limites em rodovias tem grande influência na segurança viária, pois altas velocidades induzem tanto a um aumento da probabilidade de ocorrência de acidentes quanto da severidade destes (ELVIK *et al.*, 2009).

Solomon (1964) foi um dos pioneiros a investigar o efeito da velocidade em acidentes de rodovias rurais, tendo como conclusão significativa a obtenção de uma curva semelhante a uma parábola para representar a associação entre estes dois fatores. Segundo ele, a taxa de envolvimento em acidentes (isto é, o número de veículos envolvidos em acidentes por 100 milhões de veículos por distância percorrida) cresce tanto com a redução quanto com o aumento da velocidade, como observado na Figura 2.1.

Entretanto, grande parte da amostra relativa ao resultado de Solomon para o lado esquerdo da curva (em que uma diminuição da velocidade está associada a um aumento do número de acidentes) é oriunda de veículos em manobras de retorno (HAUER, 2009). De fato, estudos mais recentes com distintas metodologias não conseguiram reproduzir o formato da curva

original do referido autor, tais como Kloeden *et. al* (1997), Aljanahi *et al.* (1999) e Wang *et. al* (2018), os quais observaram que a velocidade média é diretamente proporcional ao número de acidentes ocorridos.



**Figura 2.1** – Associação entre Taxa de Envolvimento em Acidentes e Velocidade por Fase do Dia, segundo Solomon (1964)

Tais considerações posteriores são coerentes com modelos que buscam associar a velocidade praticada em um segmento viário com número de ocorrências de acidentes, dentre os quais se destaca o modelo exponencial (ELVIK, 2009; NILSON, 2004). De acordo com este modelo, a relação entre acidentes e velocidade pode ser representada por uma relação não linear conforme a Equação 2.1.

$$\left(\frac{N^{\circ} \text{ Acidentes}_{depois}}{N^{\circ} \text{ Acidentes}_{antes}}\right) = \left(\frac{\text{Velocidade}_{depois}}{\text{Velocidade}_{antes}}\right)^r \quad (2.1)$$

Onde  $r$  é o fator exponencial função do tipo de acidente ou da severidade deste. Segundo Elvik (2009), os diversos valores para este expoente, tratando especificamente de rodovias rurais, são os apresentados na Tabela 2.1 a seguir.

**Tabela 2.1** – Valores dos Coeficientes do Modelo Exponencial para Rodovias

Acidente ou Severidade	Expoente	Intervalo (95% de Confiança)
Morte	4,6	4,0 – 5,2
Vítima gravemente ferida	3,5	0,5 – 5,5
Vítima levemente ferida	1,4	0,5 – 2,3
Usuários feridos (sem definição da severidade)	2,2	1,8 – 2,6
Acidentes fatais	4,1	2,9 – 5,3
Acidentes com vítimas gravemente feridas	2,6	-2,7 – 7,9
Acidentes com vítimas levemente feridas	1,1	0,0 – 2,3
Acidentes (sem definição da severidade das vítimas)	1,6	0,9 – 2,3
Acidentes sem danos materiais	1,5	0,1 – 2,9

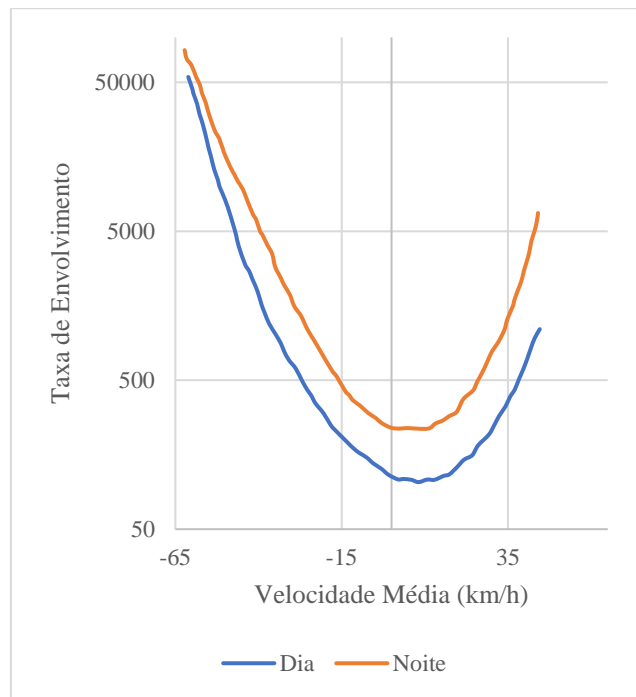
Fonte: Elvik, 2009.

Pode-se observar que os expoentes superiores a 1 em todas as categorias da Tabela 2.1 (acidente ou severidade) confirmam a tendência de que há prejuízos à segurança viária à medida que se aumenta a velocidade praticada. Cabe ressaltar que esta relação pode ser modificada em função do ambiente viário, do comportamento do usuário e do veículo, mas em geral as conclusões de Elvik (2009) podem ser consideradas consistentes em diversas abordagens (FORBES *et al.*, 2012).

Desta forma, reduções de velocidade diminuem a probabilidade de envolvimento em acidentes de trânsito pois velocidades reduzidas, dentre outros motivos (AUSTROADS, 2005):

- Permitem maior tempo para reconhecer perigos;
- Reduzem a distância percorrida durante o tempo de reação;
- Reduzem a distância de parada;
- Aumentam a habilidade dos usuários de julgamento de velocidades;
- Diminuem a probabilidade de perda de controle dos veículos.

Além do efeito da velocidade absoluta na ocorrência de acidentes, há de desse destacar a relação da dispersão de velocidades com a segurança de uma rodovia (AARTS & SCHAGEN, 2006). Novamente, Solomon (1964) foi um dos pioneiros a investigar esta questão em rodovias dos Estados Unidos, cuja curva obtida pode ser visualizada na Figura 2.2.



**Figura 2.2** – Influência da Diferença de Velocidades no Envolvimento em Acidentes, segundo Solomon (1964)

Entretanto, assim como no caso de velocidades absolutas, o fato de dirigir abaixo da velocidade média dos outros veículos significar um aumento do risco de acidentes foi contestado por estudos posteriores, em que essa relação não foi claramente observada (AARTS & SCHAGEN, 2006), como em vias urbanas de Shanghai por Wang *et al.* (2018).

Por estes motivos, é vital definir velocidades limites que propiciem condições adequadas de segurança para os usuários.

Após uma extensa revisão dos limites em rodovias na Suécia, pautando-se nas diretrizes do programa Visão Zero, Vadeby & Forsman (2018) fizeram uma avaliação quanto aos efeitos na segurança viária das novas velocidades do país. Os resultados mostraram uma significativa redução das fatalidades em rodovias rurais que tiveram seus limites reduzidos de 90 km/h para 80 km/h (41%) e isso está associado com a redução da velocidade operacional, nessas vias, de valores entre 2 e 3 km/h.

Foram conduzidos, ainda, estudos similares para investigar a ação reversa: aumento dos limites de velocidade em rodovias. Tanto Vernon *et al.* (2018) quanto Cetin *et al.* (2018), quando analisando esta questão em trechos dos Estados Unidos e da Turquia, respectivamente,

concluíram que o aumento da velocidade é prejudicial para a segurança viária. Entretanto, Vernon *et al.* (2018) observaram que, em rodovias rurais de alta velocidade, o aumento de acidentes e da severidade destes não foi significativo, mas os autores atribuíram esta constatação a possíveis limitações do estudo, como a não inclusão de outros fatores que influenciam a ocorrência de acidentes, como consumo de álcool e clima.

## 2.2 - FATORES QUE INFLUENCIAM A DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE LIMITE NO BRASIL E EM OUTROS PAÍSES

Nas rodovias brasileiras, em âmbito nacional, a velocidade limite é regulamentada pelo Código de Trânsito Brasileiro (CTB), através da lei nº 13.281. É estabelecido que a velocidade máxima para a via deve ser indicada por meio de sinalização, desde que respeitadas as características técnicas da via e o tráfego da região (Brasil, 2016).

Para casos em que não há sinalização, são definidos alguns limites, como apresentados na Tabela 2.2.

**Tabela 2.2** – Limites de Velocidade para Rodovias não Sinalizadas

Tipo de Pista	Velocidade	
	Automóveis, Camionetas e Motocicletas	Demais Veículos
Pista Dupla	110 km/h	90 km/h
Pista Simples	100 km/h	90 km/h
Estrada	60 km/h	

Fonte: Brasil, 2016.

Apesar de o CTB não apresentar os fatores relevantes para definição da velocidade limite, o Manual de Sinalização Vertical de Regulamentação (CONTRAN, 2007) determina 13 elementos que devem ser levados em consideração quando executado o estudo de engenharia responsável por definir a velocidade limite:

- Classificação da via quanto ao uso do solo;
- Classificação viária;
- Existência e condições de deslocamento lateral;
- Existência e condições de estacionamento, parada e acesso;
- V85 (velocidade abaixo da qual trafegam 85% dos veículos);



- Características e condições do pavimento;
- Características e condições dos acostamentos;
- Condições de alinhamento vertical e horizontal;
- Segurança em curvas;
- Locais com situação potencial de perigo, como obras e área escolar;
- Estatísticas de ocorrência de acidentes;
- Condições de pedestres e ciclistas ao longo da via;
- Composição do tráfego considerando veículos de grande porte.

Apesar de estes fatores serem listados neste manual, não há uma definição clara quanto ao peso destes fatores em se tratando de uma importância relativa entre eles, o que torna a definição da velocidade limite um processo subjetivo. De forma a contornar este problema, Marques (2012) utilizou o método da análise hierárquica, por meio do *software Expert Choice*, para obter uma ordem de relevância destes fatores após consulta a especialistas de distintos órgãos de trânsito federais e estaduais.

O questionário aplicado diferenciou vias novas e vias existentes, mas com a tentativa de incluir fatores semelhantes em ambas as análises. Para isso, fatores como “presença e volume de pedestres e ciclistas” e “composição do tráfego veicular”, por exemplo, foram diferenciados em termos de dados estimados e medidos. A Tabela 2.3 sumariza os fatores considerados de alta relevância pela autora, cujo peso foi superior a 0,035, com os respectivos resultados associados. Cabe ressaltar que a escala empregada foi de 0 a 1.

Gregório *et al.* (2015) desenvolveram um sistema capaz de estimar uma relação entre a velocidade limite e fatores previamente estabelecidos, estes escolhidos com base em estudos anteriores e consultas adicionais a especialistas. Esta relação foi estimada pelo modelo de escolha discreta multinomial logit, cuja amostra foi obtida com imagens aéreas e, caso possível, com visitas *in loco* a trechos específicos, sendo estes percorridos com veículos. O estudo concentrou em segmentos de rodovias de pista simples de Portugal, cujas variáveis consideradas pelos autores são listadas na Tabela 2.4.

Estes fatores foram empregados para ambos os lados da rodovia, exceto travessia de pedestres e ilha central. Os autores optaram por não incluir variáveis envolvendo histórico de acidentes,

velocidade operacional e volume de tráfego primeiramente pela dificuldade de obter estas informações e, além disso, para assegurar que o modelo fosse aplicado pela comunidade técnica, apesar de reconhecerem a importância destes elementos para a definição da velocidade limite. Ainda, tentou-se realizar a análise da forma mais objetiva possível, com a inclusão de elementos discretos e binários. Entretanto, as variáveis que envolviam restrições laterais às vias eram subjetivas, por englobarem uma série de fatores não segmentados no modelo.

Mello & Chiodi (2018) desenvolveram um modelo utilizando a lógica *fuzzy* para indicar condições adversas que possam induzir uma redução da velocidade em rodovias, centrando sua análise na segurança viária. Para isso, foram consultados 12 especialistas e foi empregado o Método Delphi para chegar a um consenso entre as opiniões deles. O estudo se aplicou mais à implementação de limites variáveis, pois fatores climáticos, derramamento de material e trabalhos de manutenção, por exemplo, foram incorporados ao modelo.

Como fatores empregados para o estabelecimento prévio de um limite, em seu estudo, foram utilizados: alinhamentos horizontal e vertical, classificação funcional, largura de pista, existência de buracos, presença de acostamentos, número de acidentes e volume de tráfego.

**Tabela 2.3** – Fatores de Alta Relevância para Determinação da Velocidade Limite em Rodovias Brasileiras, segundo Marques (2012)

Fator	Vias Novas	Vias Existentes
Alinhamento Horizontal	0,094	0,041
Classificação Funcional	0,093	0,041
Classificação Geral	0,055	0,052
Classificação Técnica	0,074	0,052
Elementos nas Margens da Via	0,057	0,064
Histórico de Acidentes	-	0,155
Limite Legal Máximo de Velocidade	0,043	-
Presença e Volume de Pedestres e Ciclistas	0,066	0,105
Seção Transversal	0,053	0,035
Uso e Ocupação do Solo nas Áreas Lindeiras	0,039	0,083
Velocidade de Projeto	0,075	-
Velocidades Praticadas	-	0,056
Volume e Composição do Tráfego Veicular	0,058	0,083

Fonte: Marques, 2012.

**Tabela 2.4** – Variáveis selecionadas por Gregório *et al.* (2015) para a correlação com a velocidade limite

Variável	Tipo
Interseções	Discreta
Acessos individuais a estacionamentos	Discreta
Acesso laterais ao tráfego motorizado	Discreta
Estacionamentos ao longo da rodovia	Discreta
Acesso para caminhos de pedestres	Discreta
Acesso de pedestres a edificações	Discreta
Paradas de ônibus	Discreta
Travessia de pedestres	Discreta
Postos de gasoline	Discreta
Semáforos para controle de velocidade	Binária
Calçadas	Binária
Ilha central	Binária
Restrições laterais (nível médio)	Binária
Restrições laterais (nível alto)	Binária

Fonte: Adaptado de Gregório *et al.*, 2015.

Nos Estados Unidos, são utilizadas as recomendações do *Manual on Uniform Traffic Control Devices*, que regulamenta as diretrizes referentes à sinalização no país. O referido manual considera relevantes os seguintes fatores quando da definição da velocidade limite em segmentos viários (MUTCD, 2009):

- V85;
- Características viárias: acostamento, greide, alinhamento e distância de visibilidade;
- Velocidade de ritmo com tolerância de 10 mph;
- Ocupação lindeira e uso do solo;
- Estacionamentos e atividades de pedestres;
- Histórico de acidentes com dados de pelo menos um ano.

Apesar de se tratar de uma recomendação nacional, muitos estados possuem suas diretrizes próprias para a definição dos limites de velocidade. Após um levantamento feito pelo Instituto de Engenheiros de Transportes (2001 *apud* FITZPATRICK *et al.*, 2003), confirmou-se que a V85 representa o fator predominante, sendo utilizado por quase a totalidade das agências pesquisadas nos Estados Unidos. Além disso, os outros fatores principais foram geometria

viária, histórico de acidentes e, muitas vezes, pressão política para manutenibilidade ou alteração da velocidade limite.

Em um estudo realizado para determinar as relações entre velocidades de projeto, limite e operacional para o Departamento de Transportes do Texas, Fitzpatrick *et al.* (1997 *apud* MARQUES, 2012) enviaram questionários a diversos órgãos dos Estados Unidos. Um dos fatores relevantes desta pesquisa era identificar quais os fatores considerados determinantes para a determinar a velocidade limite em vias existentes. Como fatores preponderantes, podem ser citados a V85, o histórico de acidentes e a velocidade máxima legal estabelecida pelo Estado em suas normativas próprias. Além disso, fatores como uso do solo na lateral da via, geometria viária, atividades de pedestres e ciclistas, volume de tráfego e velocidade segura em curvas foram consideravelmente citados pelos especialistas em questão.

Um levantamento conduzido anteriormente pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) foi capaz de auferir quais eram os fatores mais utilizados para a definição da velocidade limite em departamentos estaduais e municipais pelo país (FHWA, 1985). Os resultados para uma amostra contendo todos os estados e 44 agências municipais são apresentados na Tabela 2.5 seguir.

**Tabela 2.5** – Fatores mais utilizados para definição da Velocidade Limite nos Estados Unidos

<b>Fator</b>	<b>Porcentagem - Agências Estaduais</b>	<b>Porcentagem - Agências Locais</b>
V85	100	86
Uso do solo	85	77
Histórico de acidentes	79	81
Velocidades limites em rodovias adjacentes	71	45
Velocidade de ritmo com tolerância de 10 mph	67	34
Geometria viária	67	57
Velocidade de teste	52	34
Volume de Pedestres	40	50

Fonte: Adaptado de FHWA, 1985.

Destaca-se que tais estudos realizados nos Estados Unidos, embora conduzidos em décadas diferentes, apresentaram fatores semelhantes. De fato, é consenso, no país, que um dos fatores que mais influencia a escolha da velocidade limite para uma rodovia é a velocidade selecionada

pelos motoristas. Forbes *et al.* (2012) acrescentaram, aos fatores supracitados, questões como a condição mecânica dos veículos, habilidade dos condutores, clima (visibilidade) e condições de pavimento, pois estes impactam diretamente a escolha da velocidade.

De forma a uniformizar a tomada de decisão no que se refere à escolha da velocidade limite por todo o país, foi desenvolvido um sistema especialista pelo *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP): o USLIMITS2, aperfeiçoado em relação a uma primeira versão do sistema. Apesar de não ser utilizado efetivamente em todos os estados, pelo fato de muitos deles ainda preferirem seguir seus próprios manuais, o *software* é consideravelmente difundido pelos Estados Unidos, podendo ser utilizado tanto para rodovias quanto para vias urbanas (SRINIVASAN *et al.*, 2006).

No que se refere a rodovias, o *software* faz uma distinção entre rodovias com controle de acessos, e seções rodoviárias em áreas com ocupação ou não da área lindeira. Em seguida, a velocidade limite é calculada com base em duas abordagens: (i) primeiramente é levada em consideração a velocidade operacional associada com as características do local; (ii) posteriormente, é incorporada na análise o número de acidentes da região específica. A Tabela 2.6 contempla os fatores analisados pelo *software*.

Na Austrália, tem-se a noção de que os limites de velocidades devem ser definidos com base em características viárias e também outras condições para a condução de veículos automotores. Para que estes fatores sejam combinados adequadamente, tem-se o sistema especialista XLIMITS, que considera os seguintes fatores (AUSTROADS, 2005):

- Via e ambiente viário: classificação funcional, número de faixas e largura, alinhamentos horizontal e vertical, presença e condições dos acostamentos, condições de pavimento, presença de calçadas, existência de canteiros, obstáculos margeando a rodovia, frequência de acessos e existência de semáforos;
- Ocupação lindeira: natureza da ocupação (rural, residencial, comercial ou industrial), bem como presença de escolas, hospitais e outros geradores de tráfego;
- Natureza e atividade dos usuários: pedestres, ciclistas e veículos pesados;
- Histórico de acidentes;
- Velocidade operacional (V85);

- Volume de tráfego;
- Velocidades limites em rodovias adjacentes.

**Tabela 2.6** – Fatores considerados para definição da Velocidade Limite pelo Sistema Especialista USLIMITS2

Fator	Rodovia com Controle de Acessos	Rodovia em Áreas Rurais	Rodovia em Áreas Urbanas
Velocidade operacional	X	X	X
Alinhamento adverso <sup>1</sup>	X	X	X
Área de transição para rodovia (outra categoria) <sup>1</sup>	X	X	
Extensão da seção	X		
Velocidade limite recomendada (regulamentação)	X	X	X
Topografia	X		
Volume de tráfego	X	X	X
Histórico de acidentes	X	X	X
Número de interseções	X		
Número de faixas e presença ou tipo de canteiro		X	
Tipo de área			X
Número de acessos e interseções não semaforizadas			X
Número de semáforos			X
Existência de estacionamentos			X
Presença de pedestres e ciclistas			X
Índice de Periculosidade Adjacente <sup>2</sup>		X	

(1) Não afeta o cálculo da velocidade limite. Somente emite um alerta.

(2) O Índice de Periculosidade Adjacente (*Roadside Hazard Rating*) se refere a um conjunto de fatores que o especialista analisa consecutivamente com base em imagens e atribui uma escala de 1 a 7. São analisados elementos como acostamento (largura e tipo), distância de visibilidade, presença de objetos fixos e taludes. É baseado em estudos de Zegeer *et al.* (1987) *apud* Srinivasan *et al.*, 2006.

Fonte: Adaptado de Srinivasan *et al.*, 2006.

No Reino Unido, o Departamento de Transportes (DfT) enfatiza que os limites de velocidade devem ser autoexplicativos para que reforcem uma autoavaliação das pessoas quanto à velocidade segura para um determinado trecho. Diante disso, os fatores mais relevantes que influenciam a determinação da velocidade limite em rodovias são: histórico de acidentes, classificação funcional, velocidade média de tráfego vigente, utilização por usuários vulneráveis, geometria e ocupação do solo às margens da rodovia (DfT, 2012). Cabe ressaltar a recomendação do órgão para que, antes de serem feitas alterações dos limites em regiões específicas que apresentem algum tipo de situação adversa, sejam realizados estudos para tentar manter uma velocidade constante em toda a extensão da rodovia.

Na Nova Zelândia, fora desenvolvido um sistema com base em uma escala dos fatores que influenciam a velocidade limite e, quanto maior o valor obtido, menor deveria ser a velocidade da região para que fossem proporcionadas condições adequadas de segurança. Entretanto, pela dificuldade de catalogação dos fatores nas categorias do manual, foi idealizada uma versão revisada, na qual os fatores são expressos subjetivamente (LTR, 2017). Uma das justificativas do órgão em questão se refere ao fato de a caracterização discreta não refletir adequadamente as condições viárias neozelandesas.

Desta forma, sem um indicativo de como devem ser avaliados os fatores, são relevantes para a definição da velocidade limite na Nova Zelândia: legislação de tráfego vigente, classificação funcional, risco de acidentes, geometria viária e elementos margeando a rodovia, ocupação lindeira, número de interseções e pontos de acesso, volume de tráfego e possíveis obras na rodovia. Estão implícitos, nestes fatores, a presença de usuários vulneráveis, tais como pedestres e ciclistas.

### **2.3 - MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE LIMITE**

A definição dos limites de velocidade em rodovias depende de diversos fatores e, por este motivo, não há um processo único para a sua obtenção. Muitas vezes, somente são citados os fatores intervenientes, sem uma metodologia clara para avaliar o grau de importância relativa entre eles (MARQUES, 2012). Desta forma, rodovias com características similares podem ter velocidades limites diferentes pelo fato de, em muitos locais, o estabelecimento de um dado valor, em km/h, ser baseado em critérios exclusivamente subjetivos.

Para contornar esta dificuldade, têm sido adotados, no âmbito técnico-científico, seis métodos para a definição da velocidade limite.

#### **2.3.1 - Limites Estatuários**

Limites estatutários são aqueles definidos por leis e, em muitas vezes, podem ser considerados arbitrários por não contemplarem diferenças geográficas e condições de tráfego distintas (TRB, 1998). Entretanto, sabe-se que a determinação de um limite de velocidade deve levar em consideração a segurança e a fluidez do tráfego, e muitas vezes estes critérios são tratados de forma essencialmente subjetiva. Por este motivo, limites estatutários tendem a reduzir esta incerteza por se aplicar um único valor para toda uma região.

Há de se ressaltar ainda a necessidade de complementar os limites estatutários por mais específicos em determinadas localidades, pois o estabelecimento de velocidades genéricas pode acarretar em limites altos ou baixos demais (TSU, 2003 *apud* BASSO, 2008).

No Brasil, tal constatação pode ser verificada pela Tabela 2.1, na qual vias não sinalizadas apresentam um limite de velocidade implícito segundo o CTB, mas não necessariamente este será aplicado em toda a extensão da rodovia.

### **2.3.2 - Limites Ótimos**

A definição de limites ótimos tem como fundamento principal a minimização dos custos de transporte para a sociedade, tais como tempo, veículo, acidentes, ruídos e poluição (ELVIK, 2002). A base do método se resume a analisar todos estes custos, separadamente, para em seguida estes valores serem superpostos, resultando numa curva de custos em função da velocidade limite. O limite ótimo será aquele que apresentar o menor custo total.

Contudo, limites ótimos não têm sido utilizados na prática primeiramente pela complexidade em quantificar as variáveis principais, mas também pela dificuldade em justificar sua implementação para os motoristas (TRB, 1998). Como constatado por estudos na Noruega e na Suécia, tais limites tendem a ser inferiores que os usualmente adotados (ELVIK, 2002), o que torna a sua aplicação dependente de ampla aceitação da sociedade. Dado que, muitas vezes, as metodologias não são claras e precisas o suficiente para estimar o custo de uma hora no trânsito, por exemplo, tal implementação torna-se ainda mais difícil.

### **2.3.3 - Limites baseados em Estudos de Engenharia**

Os métodos mais comuns para determinação da velocidade limite são aqueles baseados em estudos de engenharia e, para isto, é necessária a coleta de dados envolvendo histórico de acidentes, velocidade operacional e informações adicionais relativas às rodovias, mesmo que não aparentemente visíveis para os motoristas (TRB, 1998). Para isto, há a necessidade da consideração de múltiplos fatores, como explorado na seção 2.2 deste trabalho.

Um procedimento usualmente empregado é utilizar o 85º percentil como velocidade limite para depois serem feitos ajustes tendo como base considerações de infraestrutura viária e de tráfego. O uso deste método é particularmente aceitável por diversos órgãos dos Estados Unidos por refletir o julgamento da grande maioria dos motoristas para um trecho rodoviário (FORBES *et*



*al.*, 2012). Na prática, as agências reguladoras ainda consideram uma tolerância entre 5 e 10 mph (8 e 16 km/h) para efeitos de fiscalização (TRB, 1998).

Apesar de ser amplamente utilizado, algumas críticas podem ser feitas quanto ao fato de a V85 não ser um fator estacionário e, muitas vezes, poder aumentar com o tempo (TRB, 1998; FORBES *et al.*, 2012). Tal consideração impacta diretamente as condições de segurança devido a uma maior probabilidade de ocorrência de acidentes.

Uma das alternativas para contornar esta problemática se dá pela consideração de um fator de risco à velocidade de projeto. Tal metodologia, utilizada no Canadá, leva em consideração a classificação funcional, a existência de separação física segregando fluxos opostos e o uso do solo para definir uma velocidade de projeto. Em seguida, o limite de velocidade é obtido com base numa redução desta velocidade de projeto, em função de diversos fatores associados com o ambiente que a rodovia está inserida (FORBES *et al.*, 2012).

A consideração deste fator de risco possui ainda a dificuldade de catalogação dos fatores em categorias específicas, motivo pelo qual as agências neozelandesas optaram por retirar esta metodologia de cálculo para as rodovias do país (LTA, 2017).

#### **2.3.4 - Limites baseados em Sistemas Especialistas**

Definir limites de velocidade com base em sistemas especialistas engloba todos os fatores considerados na análise em termos de estudos de engenharia (TRB, 1998), mas é reduzida a subjetividade do processo pelo fato de as regras referentes a ele serem mais claras. Neste sentido, um dos objetivos mais claros é simular o processo de tomada de decisão dos especialistas para resolver problemas complexos (FORBES *et al.*, 2012).

Como exemplos destes sistemas especialistas, tem-se o USLIMITS2 e o XLIMITS, adotados nos Estados Unidos e na Austrália, respectivamente. Apesar de a utilização ser bastante simples e fornecer resultados satisfatórios, incorporando diversos fatores relevantes, estes foram desenvolvidos para características viárias específicas e deve-se ter precaução ao aplicar os *softwares* em diferentes localidades. Marques (2012) mostrou que a utilização do USLIMITS2 não é recomendada em rodovias brasileiras pelo fato de as entradas do sistema muitas vezes não serem dados de fácil obtenção. Entretanto, o mesmo *software* foi bem calibrado para

rodovias do emirado de Abu Dhabi, pois Zineddin & Castle (2010) constaram uma similaridade com as características dos Estados Unidos.

Além disso, a utilização de modelos de escolha discreta, como o multinomial logit, pode ser encarada como uma nova aplicação de sistemas especialistas. Correia & Silva (2011), bem como Gregório *et al.* (2015), desenvolveram sistemas especialistas com a obtenção de pesos, expressos em termos de coeficientes de regressão, para diversos fatores considerados por eles apropriados para a definição da velocidade limite em rodovias.

É necessário ressaltar que os resultados dos sistemas especialistas não devem ser imediatamente adotados, mas utilizados como um instrumento para subsidiar o processo de tomada de decisão. Esta técnica para definir a velocidade limite é particularmente eficiente nos casos em que a V85 não é a melhor solução para o estabelecimento de uma velocidade (TRB, 1998), como em casos de rodovias atravessando regiões urbanas, com alta intensidade de pedestres e ciclistas.

### **2.3.5 - Limites baseados na Minimização de Acidentes**

Destacam-se, ainda, as metodologias para adoção de limites de velocidade que visem minimizar o número de acidentes e, conseqüentemente, o número de mortes. As duas maiores aplicações desta filosofia podem ser encontradas em países com resultados aceitáveis no âmbito da segurança viária, como os programas Visão Zero e Segurança Sustentável (AUSTROADS, 2005), executados na Suécia e na Holanda, respectivamente.

O programa Visão Zero tem como premissa principal a ideia de que, eventualmente, ninguém morrerá devido a um acidente de trânsito, por ser inaceitável que pessoas faleçam enquanto utilizando um sistema de transportes. Apesar disso, é improvável que todos os acidentes sejam de fato eliminados (TINGVALL & HAWORTH, 1999), motivo pelo qual devem ser propostas ações que minimizem ao máximo a possibilidade de ocorrência de danos graves e mortes.

No que concerne aos limites de velocidade, o princípio básico da referida metodologia consiste na tolerância do corpo humano durante um acidente de trânsito (FORBES *et al.*, 2012), sendo necessário estabelecer velocidades compatíveis com o menor dano possível. Um sistema seguro, dessa forma, possui na velocidade um dos seus componentes mais críticos (TINGVALL & HAWORTH, 1999), que deve ser variável conforme a estrutura e o tráfego presente, conforme Tabela 2.7.

**Tabela 2.7** – Possíveis Velocidades Toleráveis segundo o Programa Visão Zero

<b>Infraestrutura e Tráfego</b>	<b>Velocidade</b>
Locais com possibilidade de conflitos entre pedestres e veículos	30 km/h
Interseções com possibilidade de impactos laterais entre veículos	50 km/h
Rodovias com possibilidade de impacto frontal entre veículos	70 km/h
Rodovias com nenhuma possibilidade de impacto lateral ou frontal	100 km/h

Fonte: Tingvall & Haworth, 1999.

### **2.3.6 - Limites Variáveis**

Em condições adversas de tráfego e/ou clima, espera-se que as velocidades desenvolvidas por motoristas em rodovias sofram alterações. Pautando-se nisso, tem-se difundido a adoção de limites de velocidade variáveis, que são modificados com base em um monitoramento em tempo real e expostos em painéis eletrônicos (TRB, 1998) com objetivo de informar aos motoristas as velocidades capazes de proporcionar melhores condições de tráfego e segurança.

A utilização destes limites tem mostrado resultados favoráveis no âmbito da segurança viária (TRB, 1998), com redução significativa do número de acidentes. Pauw *et al.* (2018) observaram que a aplicação de limites variáveis provocou uma redução do número de acidentes em 18%, sendo a colisão traseira o tipo de acidente que apresentou maior diminuição. Além disso, pode ser feito o uso dos painéis informativos para alertar quanto a um perigo da via, o que provoca indiretamente uma redução adicional das velocidades.

Ainda, muitos estudos recentes têm utilizado a lógica *fuzzy* como instrumento para a definição de limites de velocidade variáveis com resultados satisfatórios. Li & Ranjitkar (2015) comprovaram que a utilização desta ferramenta, neste contexto, oferece melhoria em mobilidade e reduz a emissão de poluentes. Consequentemente, os benefícios também se mostram presentes na diminuição dos tempos de viagem.

### **2.3.7 - Situações sem Limite de Velocidade**

Uma outra abordagem sobre velocidades limites se refere a permitir que o motorista determine um valor sensato e prudente para conduzir em rodovias (TRB, 1998). Esta prática ocorreu por três anos em Montana, nos Estados Unidos, restrita somente a veículos de passeio durante o dia (YOWELL, 2005). Além disso, na Alemanha, nas *Autobahns*, há seções em que não há limites de velocidade estabelecidos, mas sim recomendações (ELVIK, 2010; MANNER & WÜNSCH-ZIEGLER, 2013).

Apesar de os fatores contribuintes de acidentes de trânsito em *Autobahns* não serem significativamente diferentes daqueles ocorridos em outras rodovias (MANNER & WÜNSCH-ZIEGLER, 2013), tem sido difundida a necessidade de limites de velocidade inclusive nestas rodovias alemãs. Isso se deve ao fato de que uma escolha livre de velocidade não produziria benefícios ótimos no ponto de vista da sociedade (ELVIK, 2010).

Na Alemanha, a velocidade limite recomendada para veículos de passeio é de 130 km/h e as normativas locais deixam clara as consequências caso haja o envolvimento em acidentes de trânsito numa circunstância em que o motorista excede este valor de velocidade, pois, neste cenário, o ônus da prova é direcionado ao condutor (BUNDESGERICHTSHOF, 1992). Assim, nota-se que mesmo no país em que as autopistas são conhecidas pelas altas velocidades, as entidades regulamentadoras inserem mecanismos de controle para evitar excessos. Tal pressuposto considera, sobretudo, as questões de segurança viária.

## **2.4 - TÓPICOS CONCLUSIVOS**

O estabelecimento da velocidade limite é um processo complexo e, por este motivo, há diversos métodos que buscam minimizar o processo de subjetividade deste. Apesar de já existirem modelos mais consolidados, como os sistemas especialistas, grande parte dos órgãos de trânsito ainda utiliza os intitulados métodos de engenharia, no qual são expostos fatores relevantes e, na maioria das vezes, não é indicada a importância relativa entre eles.

Com a revisão realizada constatou-se que, apesar de ser uma questão bastante investigada há pelo menos duas décadas, ainda são necessários avanços que possibilitem auxiliar o processo de tomada de decisão por parte do especialista, sobretudo no Brasil. De fato, não há um consenso entre as diversas opiniões e há, inclusive, divergências em um mesmo país, como nos Estados Unidos, onde muitos estados apresentam suas próprias metodologias para definir os limites de velocidades, o que sugere uma falta de padronização. É possível observar, desta forma, que cada local contemplará suas particularidades e um sistema uniforme é uma tarefa de difícil execução.

Além disso, muitas das variáveis apresentadas nos estudos são de caráter binário e/ou incerto, sendo poucas aquelas que realmente apresentam um valor claro e pouco contestável em termos numéricos, como, por exemplo, velocidade operacional e volume de tráfego. Entretanto, em muitos lugares, o especialista não dispõe de tais informações para definir ou readequar os

limites viários. Destaca-se, portanto, que muitos fatores podem ser classificados como “ruins” ou “bons”, bem como “leve”, “moderado” ou “grave”. Condição do pavimento e ocupação lindeira são dois exemplos desta assertiva, e ambos se encontram em grande parte da literatura como fatores de importância.

Dessa forma, nota-se que um sistema especialista com o foco de diminuir as imprecisões do processo seria de grande utilidade para a devida definição dos limites. Observando a natureza das variáveis, a lógica *fuzzy* mostra-se, de fato, como uma alternativa para a concepção de uma metodologia para o desenvolvimento de um sistema especialista para determinar velocidades limite em áreas rurais e urbanas. Pela revisão realizada observou-se que essa técnica foi utilizada recentemente em um contexto de limites de velocidade variáveis, mas se presume que sua aplicação se estenda a limites de velocidade propriamente ditos.

### 3 - TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

A inteligência artificial (IA) pode ser definida como o ramo da ciência da computação que busca a representação e automação de comportamento inteligente, com o objetivo que sistemas sejam capazes de raciocinar, identificar padrões, aprender ou realizar qualquer outra forma de inferência. Seu foco está em problemas que não possuem soluções algorítmicas simples, sendo estes portadores de informações inexatas, mal definidas ou incompletas (LUGER, 2008). Dessa forma, constata-se que a inteligência artificial tem por objetivo implementar numa máquina a possibilidade de realizar tarefas que, a princípio, somente poderiam ser realizadas por humanos (ROSA, 2011).

Um dos percussores da inteligência artificial foi Alan Turing, após a Segunda Guerra Mundial, ao conceber o chamado *Jogo da Imitação*. Seu objetivo era testar a inteligência de máquinas e, para isso, montou-se um cenário no qual um interrogador humano deveria fazer perguntas a um outro ser humano e a um computador. Após uma série de perguntas, a máquina passaria no teste se o interrogador não fosse mais capaz de distinguir de qual “entrevistado” eram oriundas as respostas (RUSSELL & NORVIG, 2013). Dessa forma, a máquina deveria ter as seguintes características para ser aprovada neste teste:

- Processamento natural da linguagem para se comunicar adequadamente;
- Representação do conhecimento para armazenar seu próprio conhecimento e o adquirido;
- Raciocínio automático para usar as informações armazenadas e chegar a novas conclusões;
- Aprendizado para se adaptar a novas circunstâncias e detectar ou extrapolar padrões.

Posteriormente seu teste foi expandido para um cenário que contemplasse também a percepção de objetos e a manipulação destes por meio da robótica. Tais princípios, principalmente os relativos ao primeiro teste, constituem a base da inteligência artificial até hoje.

Entretanto, é necessário ressaltar que sistemas inteligentes não são sinônimos de sistemas complexos. Bauchspiess (2008) cita o exemplo de um robô que aplica pontos de solda na carroceria de veículos, sendo considerada uma tarefa árdua por possuir uma grande sequência

de movimentos. Entretanto, o supracitado robô não seria capaz de se adaptar a situações novas, e esta é uma das principais características de sistemas inteligentes.

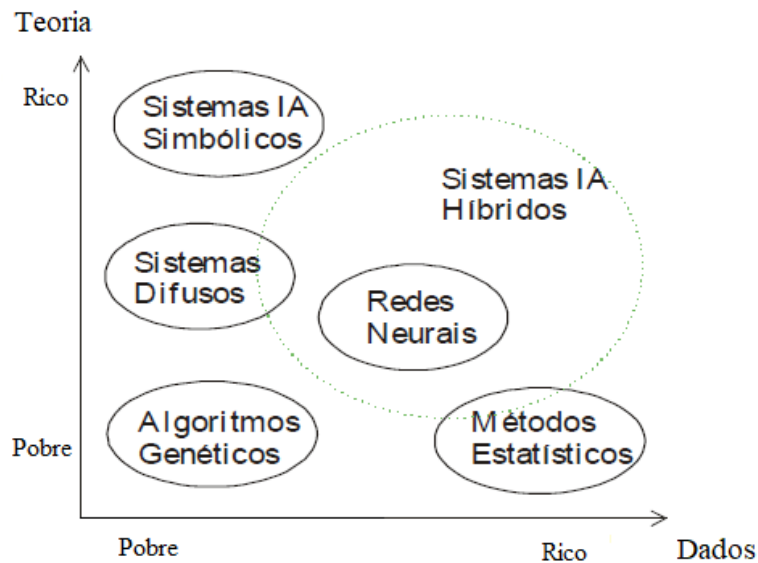
Considerando o aprendizado de máquinas que visa torná-las capazes para a resolução de problemas, Luger (2008) propõe quatro abordagens distintas:

- Simbólica: seus algoritmos tentam inferir novas, válidas e úteis generalizações com base nos dados de entrada, sendo os sistemas especialistas;
- Conexionista: são baseados no cérebro humano, em que as redes aprendem por meio de modificações em sua estrutura e pelo peso da resposta ao treinamento deste processo;
- Evolucionária: são baseados na Teoria da Evolução de Darwin, em que, dada uma população, somente os mais aptos sobrevivem para produzir a próxima geração de possíveis soluções do problema em questão;
- Estocástica: são oriundos de uma abordagem probabilística do Teorema de Bayes, pois a experiência em uma situação condiciona a expectativa para interpretar outros dados neste domínio.

Além dessas abordagens tratadas separadamente, podem ser constituídos sistemas que englobem duas ou mais técnicas de inteligência artificial simultaneamente – os sistemas híbridos. Os sistemas *neurofuzzy*, que constituem uma associação entre as técnicas simbólica e conexionista, constituem um exemplo de sistemas híbridos.

A utilização de cada uma dessas abordagens depende sumariamente da aplicação para a qual o fenômeno se aplica. De acordo com a disponibilidade de dados e a teoria empregada, diversos métodos da intitulada engenharia do conhecimento podem ser utilizados para resolução de problemas (BAUCHSPIESS, 2008), como ilustrado na Figura 3.1.

Pela Figura 3.1 é possível observar que os métodos normalmente utilizados para a elaboração de sistemas especialistas – como os simbólicos e os difusos – não apresentam necessidade de uma grande disponibilidade de dados. Desta forma, tal característica é condizente com o fato de estes sistemas se adaptarem constantemente a situações novas, não sendo tão fundamental uma grande base de informações iniciais.



**Figura 3.1** – Métodos de Engenharia do Conhecimento

Fonte: Bauchspiess, 2008.

As aplicações da IA se estendem a diversas áreas do conhecimento, dentre as quais podem ser citados alguns exemplos: veículos autônomos, reconhecimento de voz, classificação de e-mails em *spam*, planejamento logístico e tradução de documentos (RUSSEL & NORVIG, 2013).

Neste trabalho, serão abordados os tópicos referentes à lógica *fuzzy* e a algoritmos genéticos, tendo em vista que estas técnicas serão utilizadas para o desenvolvimento do sistema especialista para a determinação da velocidade limite em rodovias.

### 3.1 - LÓGICA FUZZY

Alguns problemas práticos não possuem uma classificação definida e estão sujeitos a graus de imprecisão e incerteza. Suponhamos que, em uma pesquisa de campo, seja solicitado que as pessoas sejam classificadas quanto à estatura em altas e baixas. Nesse contexto, caracterizar uma pessoa em termos destas variáveis torna-se uma tarefa difícil por não haver uma distinção clara entre elas e, desta forma, sua definição estar associada a um grau de subjetividade.

Tal aplicação é diferente, por exemplo, da lógica booleana, em que somente são admitidos dois resultados: falso e verdadeiro, geralmente definidos como 0 e 1. Para contornar este problema, Zadeh (1965) desenvolveu a teoria dos conjuntos *fuzzy* (também denominada lógica difusa ou nebulosa) que tornou possível a obtenção de valores intermediários entre os limites 0 e 1.



A lógica *fuzzy* permite criar sistemas especialistas utilizando variáveis linguísticas para conceber uma base de regras, (BAUCHSPIESS, 2008) geralmente expressas da forma “sentença”, em que se torna possível capturar informações vagas e convertê-las em um formato numérico (ANDRADE, 2004). Esta constatação se mostra essencial quando analisado o princípio da incompatibilidade, pois, à medida que se aumenta a complexidade do sistema, torna-se cada vez mais difícil elaborar definições significativas e precisas (ZADEH, 1973), como modelos matemáticos clássicos.

No que tange à natureza humana, destaca-se que a habilidade de transmitir informações está mais associada a informações imprecisas (como variáveis linguísticas) que por meio de valores numéricos absolutos (ZADEH, 1973). Por exemplo, definir um objeto como vermelho é bem mais vago do que definir a cor pelo comprimento de onda, embora a utilização de variáveis linguísticas para este caso seja extensamente mais empregada.

Pode-se definir um conjunto *fuzzy* segundo os preceitos originalmente propostos por Zadeh (1965). Seja  $X$  um espaço de pontos, com um elemento genérico de  $X$  denotado por  $x$ . Um conjunto *fuzzy*  $A$  em  $X$  é caracterizado por uma função de pertinência  $f_A(x)$  que associa cada ponto em  $X$  a um número real no intervalo  $[0,1]$ , isto é:

$$f_A(x): X \Rightarrow [0,1] \quad (3.1)$$

Se  $f_A(x) = 1$ , há um indicativo que  $x$  é completamente compatível com  $A$ , ao passo que, caso  $f_A(x) = 0$ , há uma total incompatibilidade.

A definição desta função de pertinência é subjetiva, pois uma função especificada para uma abordagem particular pode apresentar resultados diferentes caso definida por diferentes pessoas (VAZ, 2006). Esta definição se constitui uma das etapas mais difíceis da aplicação da lógica *fuzzy*. A Tabela 3.1 apresenta as funções de pertinência utilizadas pelo *software* MATLAB<sup>®</sup> em seu módulo de inteligência artificial.

**Tabela 3.1** – Funções de Pertinência do *software* MATLAB®

Função	Descrição	Representação Gráfica
Triangular	$f(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases}$	
Trapezoidal	$f(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases}$	
Gaussiana	$f(x; \sigma, c) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}}$	
Combinação de Gaussianas	<p>Esta função apresenta parâmetros diferentes para os lados esquerdo e direito da curva, resultando em quatro parâmetros.</p> $f(x; \sigma, c) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}}$	
Curva S	$f(x; a, b) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2, & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 1 - 2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2, & \frac{a+b}{2} \leq x \leq b \\ 1, & x \geq b \end{cases}$	
Curva Z	$f(x; a, b) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ 1 - 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2, & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2, & \frac{a+b}{2} \leq x \leq b \\ 1, & x \geq b \end{cases}$	

Função	Descrição	Representação Gráfica
Curva $\pi$	$f(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & x < a \\ 2 \left( \frac{x-a}{b-a} \right)^2 & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 1 - 2 \left( \frac{x-b}{b-a} \right)^2 & \frac{a+b}{2} \leq x \leq b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ 1 - 2 \left( \frac{x-c}{d-c} \right)^2 & c \leq x \leq \frac{c+d}{2} \\ 2 \left( \frac{x-d}{d-c} \right)^2 & \frac{c+d}{2} \leq x \leq d \\ 0 & x \geq d \end{cases}$	
Curva Sino	$f(x; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left  \frac{x-c}{a} \right ^{2b}}$	
Sigmoide	$f(x; a, c) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}}$	
Diferença de Sigmoides	$f(x; a, c) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}}$ Esta função está associada a uma diferença dada por $f_1(x; a, c) - f_2(x; a, c)$ , resultando em quatro parâmetros.	
Produto de Sigmoides	$f(x; a, c) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}}$ Esta função está associada a um produto dado por $f_1(x; a, c) \times f_2(x; a, c)$ , resultando em quatro parâmetros.	

Fonte: MathWorks, 2018.

### 3.1.1 - Principais Propriedades dos Conjuntos *Fuzzy*

Dados dois conjuntos *fuzzy* A e B, de funções de pertinência  $f_A(x)$  e  $f_B(x)$ , respectivamente, Zadeh (1965) definiu uma série de propriedades relevantes à utilização de sua teoria. Cabe

ressaltar que muitas definições são similares às utilizadas na lógica clássica, excetuando-se o fato de agora elas serem apresentadas em termos de funções de pertinência.

O complemento de um conjunto *fuzzy* A é denotado por A', sendo definido por:

$$f_{A'}(x) = 1 - f_A(x) \quad (3.2)$$

O conjunto A está contido em um conjunto B se, e somente se,  $f_A(x) \leq f_B(x)$ . Desta forma, em termos matemáticos, tem-se:

$$A \subset B \Leftrightarrow f_A(x) \leq f_B(x) \quad (3.3)$$

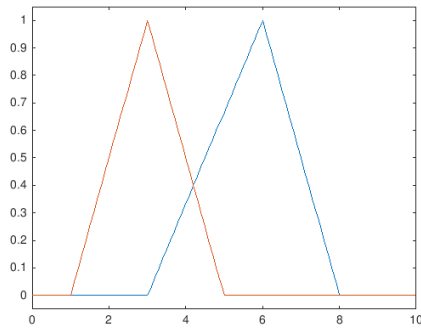
A união entre conjuntos *fuzzy* A e B, resultando num conjunto *fuzzy* C, ocorre desde que a função de pertinência  $f_C(x)$  seja dada pelo máximo das funções  $f_A(x)$  e  $f_B(x)$  em cada ponto do domínio, isto é:

$$C = A \cup B \quad \forall f_C(x) = \text{Max} [f_A(x), f_B(x)], \quad x \in X \quad (3.4)$$

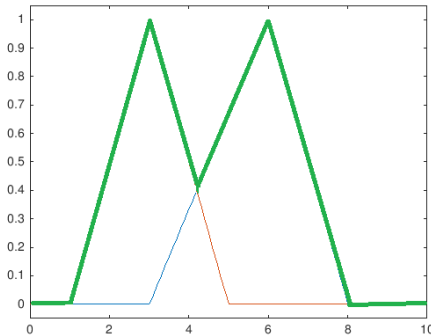
A interseção, por fim, entre conjuntos *fuzzy* A e B, dada por um conjunto *fuzzy* C, decorre desde que a função de pertinência  $f_C(x)$  seja dada pelo mínimo das funções  $f_A(x)$  e  $f_B(x)$  em cada ponto do domínio. Assim, tem-se:

$$C = A \cap B \quad \forall f_C(x) = \text{Min} [f_A(x), f_B(x)], \quad x \in X \quad (3.5)$$

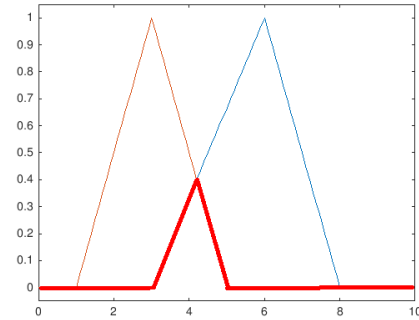
Como exemplos dessas propriedades, tem-se a Figura 3.2 a seguir. Nas Figura 3.2 (b) e Figura 3.2 (c) são apresentadas, nas cores verde e vermelho, respectivamente, as representações das funções de pertinência resultantes da união e da interseção das funções  $f_A(x)$  e  $f_B(x)$  ilustradas na Figura 3.2 (a).



(a) Funções de Pertinência  $f_A(x)$  e  $f_B(x)$  ilustradas separadamente



(b)  $C = A \cup B$

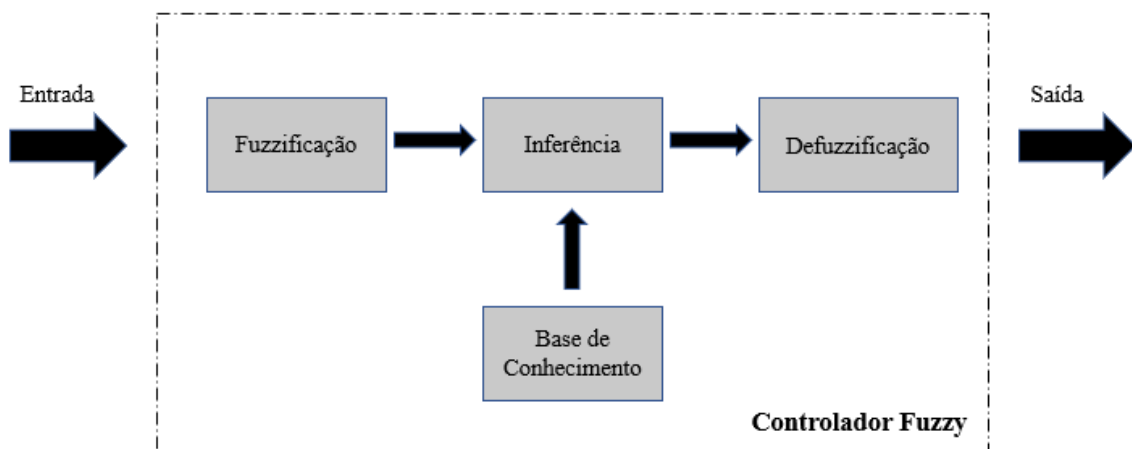


(c)  $C = A \cap B$

**Figura 3.2** – Aplicação da União e da Interseção para Conjuntos *Fuzzy*

### 3.1.2 - Sistemas de Controle *Fuzzy*

Utiliza-se um controle *fuzzy* para modelar as ações a partir de um conhecimento especialista (GOMIDE & GUDWIN, 1994). O diagrama de um processo de um controlador *fuzzy* é apresentado na Figura 3.3, em que são mostrados os quatro principais componentes deste sistema: fuzzificação, inferência, base de conhecimento e defuzzificação.



**Figura 3.3** – Diagrama de Controlador *Fuzzy*

Fonte: Adaptado de Dernoncourt, 2013.

Estes componentes apresentam as seguintes características (GOMIDE & GUDWIN, 1994):

- Fuzzificação: transforma números em conjuntos *fuzzy*, de modo que possam se tornar objetos de avaliação das variáveis linguísticas;
- Base de conhecimento: trata-se de uma base de regras (expressas da forma “se-então”) que caracterizam a estratégia empregada;
- Inferência: processa os dados de entrada, com as regras, de modo a inferir as ações de controle *fuzzy* num contexto de implicação;
- Defuzzificação: transforma as ações de controle *fuzzy* no processo real das variáveis, feita uma compatibilização.

Estes componentes podem ser melhor compreendidos a partir da aplicação prática neste trabalho. A fuzzificação transforma uma variável de entrada numérica (como o percentual de área ocupada nas margens de uma rodovia) em uma variável linguística, isto é, “rural”, “misto” ou “urbano”. A base do conhecimento é expressa em termos de condições e conclusões, como “SE o uso do solo é urbano E a accidentalidade é alta ENTÃO a velocidade limite deve ser baixa”. A inferência é justamente a utilização de um conjunto de sentenças como esta (ou ainda, de uma base de regras) de forma a proporcionar a generalização das conclusões para distintas situações. Por fim, a defuzzificação transforma o fato de a velocidade limite ser baixa, como no exemplo, em um valor numérico, diga-se 70 km/h, por exemplo.

Nesta última etapa (defuzzificação), deve-se escolher uma forma para a conversão dos resultados *fuzzy* para os parâmetros de estudo, isto é, para o universo real. Para isso, podem ser utilizados distintos métodos, sendo os mais empregados o método da média de máximos e o método do centro de gravidade (DERNONCOURT, 2013).

### **3.1.3 - Método *Fuzzy* Multicritério para Tomada de Decisão**

Problemas relativos à tomada de decisão são geralmente incertos sob diversos aspectos. Apesar da tentativa de contornar este problema em termos de teorias da probabilidade e da estatística, a percepção das pessoas ainda é expressa em termos de variáveis linguísticas, o que representa a possibilidade da introdução de conjuntos *fuzzy* (MARDANI *et al.*, 2015).

Assim, destaca-se a importância de levar a consideração o efeito da incerteza quando da tomada de uma decisão que envolve muitos critérios. Por exemplo, como exposto na seção 2.2 - deste trabalho, existe um grande número de fatores que intervêm na velocidade limite e escolher aqueles mais relevantes constitui uma aplicação direta da utilização de método de análise multicritério num contexto *fuzzy*, pelo fato de as variáveis serem de difícil definição. Assim, esta metodologia se destaca por possibilitar a obtenção de pesos que, por sua vez, são capazes de expor as variáveis em termos de uma ordem de relevância.

Carlsson & Fullér (1996) propõem quatro métodos de análise multicritério para tomada de decisão:

- Métodos para encontrar um ranqueamento das variáveis;
- Métodos para auferir a importância relativa entre variáveis;
- Métodos de otimização de programações lineares;
- Métodos para decisões em grupo e para a teoria das negociações.

Neste trabalho, o método empregado comportará elementos necessários à hierarquização de variáveis com o objetivo de minimizar uma função quadrática sujeita a diversas condições de contorno. Tal procedimento será descrito com detalhes no próximo capítulo.

### **3.2 - ALGORITMOS GENÉTICOS**

Algoritmos genéticos (AG) podem ser considerados integrantes da abordagem evolucionária no que tange ao aprendizado de máquinas. Inspirados na Teoria da Evolução de Darwin, eles são métodos heurísticos para a solução de problemas, cuja vantagem principal é a grande redução de custo e tempo (BAUCHSPIESS, 2008). Por sua simplicidade, algoritmos genéticos possuem largas aplicações em diversas áreas do conhecimento como metodologia para otimização de problemas (ARSLAN & KAYA, 2001).

Estes algoritmos começam por meio de uma população inicial aleatória de indivíduos, sendo que cada indivíduo representa uma potencial solução para o problema. Tais indivíduos evoluem em sucessivas gerações e, em cada uma destas, estes indivíduos são avaliados quanto a um grau de aptidão quanto ao problema. O procedimento continua até que uma condição de término previamente estabelecida seja atingida (SAKAWA, 2001).

Os indivíduos em uma população de algoritmos genéticos são representados por meio de cromossomos, e cada *locus* (que representa um gene) possui dois alelos possíveis: 0 e 1. Para criar as sucessivas gerações, são utilizados basicamente três operadores genéticos (MITCHELL, 1998):

- Seleção: seleciona cromossomos na população para reprodução e, quanto mais apto o cromossomo, mais provável se torna a sua escolha para reproduzir;
- Cruzamento: o operador escolhe aleatoriamente um *locus* no cromossomo e efetua a troca de informações antes e depois desta posição em cada dupla;
- Mutação: o valor de um alelo é trocado aleatoriamente em um cromossomo.

Com o intuito de avaliar os indivíduos quanto à seleção natural, são utilizadas técnicas de aptidão e, para isso, são desenvolvidas funções de avaliação. Tais funções constituem importantes meios de ligação entre os algoritmos genéticos e os sistemas, sendo capazes de medir o desempenho do cromossomo numa dada situação. Nesse contexto, é necessário que seja feita uma análise de escala para permitir reorganização dos indivíduos após novas gerações e, conseqüentemente, o aumento da população. Assim, esta análise possibilita que os cromossomos mais fortes se reproduzam e os menos aptos, mesmo que de gerações posteriores, sejam eliminados (ARSLAN & KAYA, 2001).

A definição desta função de aptidão (*fitness*) depende das condições do problema e geralmente não apresenta uma forma única. Feita a devida avaliação quanto à aptidão do indivíduo na população, é necessário emular o processo da evolução de Darwin, pautando-se na seleção dos mais fortes. Existem vários métodos presentes na literatura para isso, dentre os quais Gonçalves (2016) destaca:

- Método da Roleta: utiliza-se uma roleta fictícia, na qual cada cavidade desta representa um indivíduo e sua área é proporcional ao seu *fitness*;
- Método baseado em *Rank*: é feito um remapeamento do valor do *fitness* antes da seleção, sendo empregadas técnicas de escalonamento para evitar que a convergência seja feita em poucas gerações;



- Método por Torneio: são escolhidos  $n$  cromossomos aleatoriamente (geralmente se usa  $n = 2$  ou  $n = 3$ ), com probabilidades de escolhas iguais, e o maior *fitness* entre estes é selecionado para gerar descendentes;
- Elitismo: para contornar o problema de os melhores cromossomos serem perdidos de uma geração para outra após a aplicação de operadores genéticos, estes cromossomos são transferidos diretamente de uma geração para outra.

Cabe destacar que o emprego do elitismo acarreta numa melhoria significativa do desempenho de algoritmos genéticos (MITCHEL, 1998), fato este que pode implicar em uma convergência mais rápida.

O método mais empregado é o método da roleta, sendo este primeiramente fundamentado por Holland (1975 *apud* GONÇALVES, 2016), responsável por apresentar a teoria inicial do algoritmo genético. Seu método de seleção é baseado na proporção do *fitness* do indivíduo, dado por:

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{k=1}^N f_k} \quad (3.6)$$

Onde,

$f_i$  é valor do *fitness* do indivíduo  $i$ ;

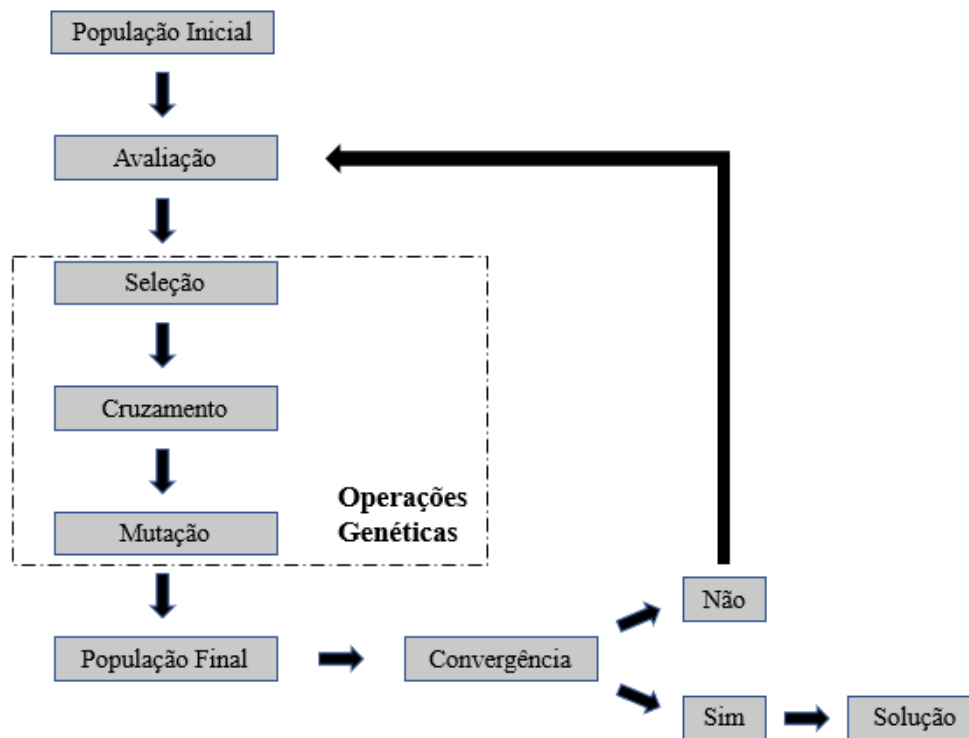
$N$  é o número de indivíduos na população.

Lacerda & Carvalho (1996 *apud* GONÇALVES, 2016) citam que alguns dos principais critérios de parada para a convergência de um algoritmo como o ilustrado na Figura 3.4 são:

- Utilização de um número máximo de gerações;
- Obtenção do valor ótimo da função objetivo, se conhecido;
- Quando não houver melhorias significativas a partir do cromossomo de maior aptidão.

Arslan & Kaya (2001) destacam ainda que o tamanho da população afeta significativamente o desempenho de algoritmos genéticos. Aumentar o número de indivíduos significa um tempo trabalho computacional maior, porém um número menor pode reduzir a precisão das soluções encontradas. É fundamental, portanto, realizar uma análise em termos do número de gerações para que sejam atendidos os critérios de aptidão.

A Figura 3.4 indica um diagrama básico de funcionamento de um algoritmo genético. Destaca-se que cada iteração do processo, representada pelo retorno da população final até a avaliação, é uma geração do algoritmo.



**Figura 3.4** – Diagrama de um Algoritmo Genético

### 3.3 - UTILIZAÇÃO DE ALGORITMOS GENÉTICOS NA LÓGICA FUZZY

A relação entre algoritmos genéticos e lógica *fuzzy* pode ser considerada bidirecional. Em uma direção, algoritmos genéticos são utilizados como ferramentas de otimização para sistemas *fuzzy*, como no caso de otimizar a base de regras para a inferência. Na outra direção, algoritmos genéticos podem ser fuzzificados (KLIR & YUAN, 1995).

Uma aplicação interessante dos algoritmos genéticos na lógica *fuzzy* se refere à obtenção das funções de pertinência, sendo aplicados àquelas que possuem modelos matemáticos bem definidos (ARSLAN & KAYA, 2001).

Sem o auxílio de um algoritmo genético ou de uma rede neural, a definição das funções de pertinência torna-se bastante manual, o que poderia acarretar em um tempo maior para o

processamento do sistema, pois o especialista teria que fazer diversas iterações até que fosse encontrado um resultado satisfatório (CHEN, 1998).

Neste trabalho, a aplicação dos algoritmos genéticos se restringirá à otimização de uma equação construída a partir de um método *fuzzy* multicritério para tomada de decisão.

### **3.4 - TÓPICOS CONCLUSIVOS**

Técnicas de inteligência artificial são empregadas em diversos campos da engenharia e a grande vantagem se refere à capacidade de simular o raciocínio humano para solucionar problemas. Dentre as diversas abordagens empregadas, destacam-se, neste trabalho, a simbólica e a evolucionária, representadas pela lógica *fuzzy* e pelos algoritmos genéticos, respectivamente.

A utilização das duas técnicas em simultâneo tem o objetivo de minimizar o esforço computacional e tornar o processo mais rápido, tendo em vista que os AG podem ser utilizados para a solução de problemas de otimização. Isto se deve, principalmente, à natureza heurística dos algoritmos genéticos, pois estes primam por decisões não totalmente racionais ao ignorar parte do problema (neste caso, eliminar os menos aptos). Contudo, há de se destacar o desenvolvimento de ferramentas que aperfeiçoam este processo, como o elitismo.

Além disso, a *lógica fuzzy* mostra-se como uma interessante ferramenta para o estudo da determinação da velocidade limite, pois admite graus de incerteza e imprecisão nas suas variáveis expressas por meio de termos linguísticos. Neste sentido, a concepção de um sistema especialista para este fim, com a lógica *fuzzy* como instrumento principal, destaca-se como uma alternativa viável.

## **4 - DEFINIÇÃO DOS FATORES QUE INFLUENCIAM A VELOCIDADE LIMITE EM RODOVIAS**

Conforme exposto na seção 2.2 - deste trabalho, o processo de definição da velocidade limite envolve um número considerável de variáveis, que muitas vezes não são claramente definidas e sofrem alterações em função da localidade. Por exemplo, quando analisados o Manual de Sinalização Vertical de Regulamentação (CONTRAN, 2007) e o sistema especialista norte-americano USLIMITS2, conforme descrito por Srinivasan *et al.* (2006), muitas variáveis coincidem, apesar de existirem algumas particulares para cada abordagem.

Somando-se ao número excessivo de variáveis, foram poucos os estudos que observaram uma ordem de relevância entre elas. Marques (2012) e Gregório *et al.* (2015) identificaram os fatores mais importantes através do método da análise hierárquica e do modelo multinomial logit, respectivamente. Apesar de o objetivo de Gregório *et al.* (2015) não ter sido de fato a ordenação dos fatores – e sim um método estatístico para a obtenção da velocidade limite propriamente dita – a magnitude dos coeficientes extraídos da regressão permitiu hierarquizar as variáveis consideradas no modelo.

Ainda, a consideração de uma quantidade elevada de fatores na concepção de um sistema especialista com a lógica *fuzzy* poderia resultar em uma base de regras extremamente grande, acarretando em um modelo excessivamente complexo. Muitas das variáveis, apesar de listadas em muitos manuais, podem não vir a influenciar a velocidade limite tão significativamente quanto outras.

Cabe destacar, a título de exemplo, as condições de pavimento e alinhamento horizontal quando investigadas por Marques (2012). Mais de 50% dos especialistas consultados afirmaram que o estado de conservação e/ou tipo de pavimento não são relevantes quando da definição de velocidades limites, embora tenha sido unânime a decisão de considerar a geometria planimétrica fundamental para este processo. Assim, a incorporação de uma variável como o tipo de pavimento no modelo provocaria um esforço computacional superior ao necessário, além de supostamente não proporcionar resultados tão diferentes caso não fosse incluída.

Por estes motivos, destaca-se a necessidade de definir os fatores que mais influenciam a velocidade limite, hierarquizando-os de forma a considerar, para a concepção de um sistema

especialista com a lógica *fuzzy*, somente as variáveis que tiverem graus de relevância mais significativos.

Para a obtenção destes graus de relevância, foram calculados pesos para as variáveis após uma devida consulta à especialista. Tal procedimento é descrito nas subseções a seguir.

#### **4.1 - SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS**

A escolha das variáveis a serem consideradas no processo baseou-se principalmente na seleção daquelas utilizadas por Marques (2012). Entretanto, houve a inclusão de alguns fatores adicionais e a exclusão de outros. Tais decisões foram pautadas na revisão bibliográfica exposta na seção 2.2 - deste trabalho, além de uma tentativa de tornar os termos mais claros para os especialistas.

Destacam-se os termos relativos à classificação da via (geral, funcional e técnica), que foram expressos em função das características que definem as supracitadas classificações: relevo, uso do solo e volume de tráfego. Assim, o respondente poderia analisar a Classificação Técnica de um trecho rodoviário não por Classes de Projeto (0, I, II, III e IV), mas pelo principal elemento que ampara sua escolha, segundo o DNER (1999): volume de tráfego.

Além disso, quanto às outras velocidades de referência (operacional e de projeto), somente foi considerada a velocidade operacional como instrumento de consulta. Isto ocorreu pelo fato de muitas vezes os especialistas não possuírem acesso aos projetos originais.

Outros fatores, como iluminação e estacionamentos, foram excluídos da análise. O fator “iluminação” não foi observado na revisão bibliográfica com afincamento para que se justificasse sua inclusão e de fato, em se tratando de rodovias brasileiras, sua presença é geralmente limitada a ambientes urbanos e/ou com ocupação lindeira, elementos estes que foram avaliados individualmente. A mesma justificativa se aplica à retirada do fator “estacionamento”, atribuindo-se também ao fato de já estar incluído nos fatores citados anteriormente.

Diante disso, foram delimitadas 20 variáveis, divididas em quatro categorias principais: Características Gerais (englobando os elementos que permitem a classificação da rodovia, segundo o DNER, 1999), Características da Área Lindeira, Características da Via e Características de Tráfego. Tais variáveis são listadas na Tabela 4.1 a seguir.

**Tabela 4.1** – Variáveis Seleccionadas para Consulta a Especialistas

<b>Característica</b>	<b>Variável</b>	
Características Gerais	Uso do Solo	
	Relevo	
	Volume de Tráfego	
Características da Área Lindeira	Elementos nas Margens da Via	
	Uso e Ocupação nas Áreas Lindeiras	
Características da Via	Características do Alinhamento Horizontal	
	Características do Alinhamento Vertical	
	Características da Seção Transversal	
	Presença de Interseções	
	Presença de Retornos	
	Presença de Acessos	
	Presença de Facilidades para Pedestres e Ciclistas	
	Presença de Dispositivos de Proteção	
	Pavimento	
	Sinalização	
	Pontes e Viadutos	
	Características de Tráfego	Presença e Volume de Pedestres e Ciclistas
		Composição do Tráfego Veicular
Velocidade Praticada		
Número de Acidentes		

A descrição de cada uma das variáveis, apresentada aos especialistas para sanar dúvidas quanto entendimento de cada um dos termos, pode ser visualizada no Apêndice A, o qual contempla o questionário utilizado nesta etapa.

#### **4.2 - PROCEDIMENTO PARA CONSULTA A ESPECIALISTAS (QUESTIONÁRIO 01)**

Feita a seleção das variáveis a serem analisadas, foi elaborado um questionário *online*, denominado Questionário 01, desenvolvido através da plataforma *Google Forms*, de forma que fosse possibilitada a divulgação do questionário nas mais diversas regiões do país, sem a necessidade do envio de uma versão física para distintos órgãos.

Neste questionário, todos os fatores da Tabela 4.1 foram apresentados individualmente, em que os especialistas foram questionados quanto ao grau de influência destes na velocidade limite. Para isto, foi considerada uma Escala Likert de 1 a 5, na qual 1 representaria influência muito fraca e 5, por sua vez, influência muito forte.

Ao final de responder a esta questão para as 20 variáveis, o entrevistado deveria ressaltar o seu grau de concordância com uma pergunta de controle: “A definição de fatores para a velocidade

limite é um processo importante para a tomada de decisão”. Para esta pergunta especificamente, os limites da Escala Likert foram alterados, em que 1 significava forte discordância e 5, forte concordância. Esta pergunta de controle é de extrema importância para o modelo matemático utilizado a fim de obter os pesos, sendo este procedimento descrito na próxima seção.

Como ressaltado anteriormente, o Questionário 01 pode ser visualizado, em sua forma integral, no Apêndice A.

Foi obtida uma amostra de 38 respondentes, estes pertencentes às cinco regiões do Brasil. O questionário foi enviado a especialistas que trabalhassem com velocidade limite em órgãos federais e estaduais, superintendentes regionais do DNIT e acadêmicos que já realizaram estudos sobre velocidade em rodovias. O mapa da Figura 4.1 apresenta a localização dos especialistas, indicando também a quantidade de respondentes em cada município.



**Figura 4.1** – Localização e Quantidade de Respondentes do Questionário 01

### 4.3 - METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DOS PESOS

O uso tradicional da Escala Likert assume que todos os respondentes apresentam exatamente a mesma percepção de uma variável linguística. Por exemplo, se duas pessoas citam que um fator influencia muito na velocidade limite (5 para a Escala Likert tradicional), não necessariamente estas respostas seriam iguais entre si se fosse solicitado que os entrevistados atribuíssem um valor para um intervalo maior que a Escala Likert (como 1 a 10).

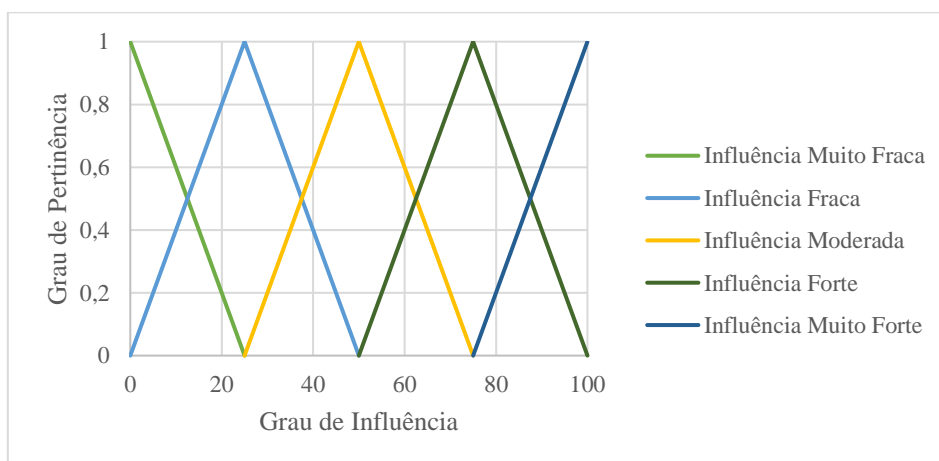
Portanto, a utilização desta escala de forma direta, além de supor que as variáveis linguísticas são igualmente espaçadas, não considera o grau de incerteza e ambiguidade por parte dos respondentes (HU *et al.*, 2011). Tais características sugerem que o método *fuzzy* multicritério para tomada de decisão pode ser uma alternativa para lidar com este problema.

Hu *et al.* (2011) citam um exemplo de funções de pertinência triangulares – e seus respectivos parâmetros correspondentes – para a Escala Likert tradicional. Este exemplo é apresentado na Tabela 4.2. Sua adaptação para a determinação dos fatores que influenciam a velocidade limite, conforme o Questionário 01, por sua vez, é ilustrada graficamente na Figura 4.2.

**Tabela 4.2** – Exemplo de Funções de Pertinência *Fuzzy* para Escala Likert

Variável Linguística	Escala Likert	Parâmetros <i>Fuzzy</i>
Extremamente Insatisfeito	1	(0, 0, 25)
Insatisfeito	2	(0, 25, 50)
Razoável	3	(25, 50, 75)
Satisfeito	4	(50, 75, 100)
Extremamente Satisfeito	5	(75, 100, 100)

Fonte: Hu *et al.*, 2011.



**Figura 4.2** – Funções de Pertinência para o Problema Proposto



Cabe destacar que os parâmetros *fuzzy* da Tabela 4.2 seguiram a notação da Tabela 3.1, em que uma função de pertinência é expressa por valores  $a$ ,  $b$  e  $c$ .

A metodologia para a obtenção dos pesos de cada fator será pautada na proposta por Hu (2009), que utilizou método *fuzzy* multicritério para tomada de decisão a fim de determinar os fatores mais importantes para avaliar a qualidade de *websites* de viagem. Com o objetivo de auferir os graus de importância de cada uma das variáveis de interesse, foi utilizada uma equação, referente a um erro, construída a partir de parâmetros *fuzzy* de funções de pertinência triangulares, sendo esta mesma equação minimizada por meio de um algoritmo genético.

Seja um questionário com  $n$  variáveis,  $m$  respondentes e uma pergunta de controle  $P$ . Sendo as variáveis definidas como  $X$  e cada resposta por  $R$ , tem-se a Tabela 4.3 como resultado da aplicação de um questionário.

**Tabela 4.3** – Respostas após a Aplicação de um Questionário

Variáveis				Pergunta de Controle
$X_1$	$X_2$	...	$X_n$	
$R_{11}$	$R_{12}$	...	$R_{1n}$	$P_1$
$R_{21}$	$R_{22}$	...	$R_{2n}$	$P_2$
...	...	...	...	...
$R_{m1}$	$R_{m2}$	...	$R_{mn}$	$P_m$

Fonte: Adaptado de Hu, 2009.

Como cada resposta  $R$  é referente a um valor da Escala Likert, ela está associada a três parâmetros *fuzzy* relativos às funções de pertinência triangulares. Assim, em que  $a$ ,  $b$  e  $c$  se representam cada um destes valores (mesma notação da Tabela 3.1), a Tabela 4.3 é ampliada conforme a Tabela 4.4. A título de exemplo, se  $R_{11} = 4$ , tem-se que  $R_{11a} = 50$ ,  $R_{11b} = 75$  e  $R_{11c} = 75$ , como observado na Tabela 4.2.

**Tabela 4.4** – Inserção de Parâmetros *Fuzzy* nas Respostas de um Questionário

Variáveis									Pergunta de Controle			
$X_1$			$X_2$			...	$X_n$					
$R_{11a}$	$R_{11b}$	$R_{11c}$	$R_{12a}$	$R_{12b}$	$R_{12c}$	...	$R_{1na}$	$R_{1nb}$	$R_{1nc}$	$P_{1a}$	$P_{1b}$	$P_{1c}$
$R_{21a}$	$R_{21b}$	$R_{21c}$	$R_{22a}$	$R_{22b}$	$R_{22c}$	...	$R_{2na}$	$R_{2nb}$	$R_{2nc}$	$P_{2a}$	$P_{2b}$	$P_{2c}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$R_{m1a}$	$R_{m1b}$	$R_{m1c}$	$R_{m2a}$	$R_{m2b}$	$R_{m2c}$	...	$R_{mna}$	$R_{mnb}$	$R_{mnc}$	$P_{ma}$	$P_{mb}$	$P_{mc}$

A pergunta de controle, neste caso, “A definição de fatores para a velocidade limite é um processo importante para a tomada de decisão”, é utilizada para calcular a diferença entre os valores atribuídos pelas respostas  $R$  e pela pergunta de controle  $P$ , sendo esta diferença denominada um erro. Para as variáveis com maior relevância, espera-se que o erro seja o menor possível pois, se um conjunto de respondentes acredita que um fator influencia fortemente a determinação da velocidade limite e também que a definição de fatores é um processo importante para selecionar uma velocidade, este fator deve ser incorporado ao modelo. Assim, quanto menor o erro, maior a relevância do fator correspondente.

As respostas  $R$  foram ponderadas pelos respectivos pesos de cada variável  $X$ , dados por  $p_1, p_2, \dots, p_n$ . Portanto, o problema se resume a encontrar os pesos que minimizem a seguinte equação, em termos de um erro quadrático médio ( $eqm$ ), conforme Equação 4.1.

$$eqm = \sum_{m=1}^m \sum_{n=1}^n [(P_{ma} - p_n \cdot R_{mna})^2 + (P_{mb} - p_n \cdot R_{mnb})^2 + (P_{mc} - p_n \cdot R_{mnc})^2] \quad (4.1)$$

Nota-se que cada valor *fuzzy* correspondente às funções de pertinência triangulares ( $a, b$  e  $c$ ) foi considerado no modelo, sendo seus erros associados superpostos para cada variável e respondente.

Entretanto, o problema exigiu ainda o atendimento a algumas condições de contorno de forma a obter pesos coerentes com o método *fuzzy* multicritério para tomada de decisão.

Sejam os valores de cada linha da Tabela 4.4 somados, para cada valor das funções de pertinência ( $a, b$  e  $c$ ), variável  $n$  e pergunta de controle  $P$ , tem-se o somatório  $S$  para cada coluna, dado pelas Equações 4.2 e 4.3.

$$S_{xn}(a, b, c) = \left( \sum_{m=1}^m R_{mna}, \sum_{m=1}^m R_{mnb}, \sum_{m=1}^m R_{mnc} \right) \quad (4.2)$$

$$S_p(a, b, c) = \left( \sum_{m=1}^m P_{ma}, \sum_{m=1}^m P_{mb}, \sum_{m=1}^m P_{mc} \right) \quad (4.3)$$

Assim, foram obtidos  $3(n + P)$  valores numéricos, representados pelos somatórios  $S_{xn}$  para as variáveis  $X_1, X_2, \dots, X_n$  e pelos  $S_p$  para a pergunta de controle. Tais valores foram colocados em matrizes e, utilizando a mesma lógica para a minimização do erro quadrático médio, foi realizada uma ponderação com os pesos  $p_1, p_2, \dots, p_n$  nos somatórios  $S_{xn}$  para que se tenha como resposta os somatórios  $S_p$ . Portanto, foram definidas três equações adicionais para o problema, cada uma delas referente aos valores *fuzzy* dos parâmetros das funções de pertinência. A Equação 4.4 ilustra o sistema linear resultante.

$$\begin{bmatrix} S_{x1(a)} & S_{x2(a)} & \dots & S_{xn(a)} \\ S_{x1(b)} & S_{x2(b)} & \dots & S_{xn(b)} \\ S_{x1(c)} & S_{x2(c)} & \dots & S_{xn(c)} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \dots \\ p_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{p(a)} \\ S_{p(b)} \\ S_{p(c)} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Tem-se ainda que o somatório dos pesos deve ser igual à 1, correspondendo a mais uma condição de contorno, expressa pela Equação 4.5.

$$p_1 + p_2 + \dots + p_n = 1 \quad (4.5)$$

Diante disso, o problema se resume à minimização da Equação 4.1 com quatro condições de contorno (Equações 4.4 e 4.5). Neste caso, em se tratando de fatores que intervêm na definição da velocidade limite, foram supostas 20 variáveis, fato este que inviabiliza a obtenção de uma solução analítica pelo número de variáveis ser superior à quantidade de equações.

Por este motivo, a utilização de algoritmos genéticos, aplicáveis a problemas de otimização, mostra-se como uma alternativa para a solução. Osyczka (2002 *apud* HU, 2009) recomenda a adoção de alguns parâmetros para algoritmos com objetivo de realizar classificações com base em lógica *fuzzy*:

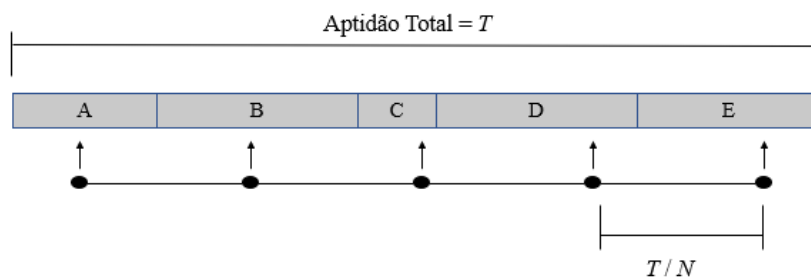
- Tamanho da população: 100 indivíduos;
- Número de gerações: 2000;
- Elitismo: 2 indivíduos;
- Precisão: 3 casas decimais.

Para a minimização do problema proposto neste trabalho, o tamanho da população foi aumentado para 200 indivíduos no intuito de obter resultados mais precisos. Além disso, foi

empregada uma taxa de seleção de 80% e, para a mutação, de 20%. O método utilizado para a aptidão foi o baseado em *rank*, definido pelo MathWorks (2018) como estocástico uniforme.

Neste método, o algoritmo cria uma linha  $T$  em que cada indivíduo corresponde a um fragmento desta linha, com comprimento proporcional a sua expectativa de aptidão. Tais indivíduos são denominados os pais da próxima geração. Em seguida, o algoritmo percorre a linha em passos padrões iguais, expressos em termos de uma proporção da linha  $T$  pelo número de indivíduos  $N$ , alocando os próximos pais para ser realizada a próxima seleção.

A Figura 4.3 ilustra este procedimento para cinco indivíduos ( $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  e  $E$ ). As setas correspondem aos instantes da seleção, em que ocorre modificação dos pais. Cabe destacar, entretanto, que o posicionamento da primeira seleção é aleatório.



**Figura 4.3** – Ilustração do Método Estocástico Uniforme

Fonte: Adaptado de Pecheva *et al.*, 2009.

Assim, como ele percorre a linha inteira, este método reduz a possibilidade de convergência prematura, conforme exposto por Gonçalves (2016).

Após a obtenção dos pesos pela minimização da Equação 4.1 por meio do algoritmo genético, constatou-se que alguns valores não convergiram para o intervalo  $[0,1]$  e sim para  $[-1,1]$ . Dessa forma, fez-se necessário normalizar os pesos. O método empregado foi a normalização mínimo-máximo, que executa uma transformação linear dos valores originais. A equação utilizada para este fim, dados pesos  $p_1, p_2, \dots, p_n$ , é dada por (Han *et al.*, 2006):

$$p' = \frac{p - p_{min}}{p_{max} - p_{min}} \quad (4.6)$$

Como resultado, para o atendimento à Equação 4.5, foi preciso realizar uma renormalização de  $p_1', p_2', \dots, p_n'$  em termos do somatório da Equação 4.7 para obter  $p_1'', p_2'', \dots, p_n''$ .

$$p_n'' = \frac{p_n'}{\sum_1^n p_n'} \quad (4.7)$$

Com os pesos definidos, possibilitando o ranqueamento das variáveis, foi preciso eliminar aquelas que apresentaram resultado pouco expressivo, viabilizando a concepção de um sistema *fuzzy* menos complexo. Como ressaltado anteriormente, o problema em questão foi configurado para 20 variáveis e utilizá-las integralmente poderia acarretar em uma base de regras bastante elevada, possibilitando também a formação de um modelo computacional dispendioso sem necessidade.

Por este motivo, foi utilizado um procedimento de retirada das variáveis menos relevantes e recálculo dos pesos, sendo aplicada a Equação 4.7 novamente. A diferença em relação ao caso anterior se deve ao fato de que a quantidade de variáveis  $n$  não ser fixa pois, a cada iteração  $i$ , tem-se um número de variáveis  $n-i$ . Dado um peso  $p_{n,i}$ , foi calculado o erro quadrático médio entre os pesos de iterações sucessivas (Equação 4.8).

$$eqm = \sum_{i=1}^i \sum_{n=1}^{n-i} (p_{n,i}'' - p_{n,i-1}'')^2 \quad (4.8)$$

Foi definido um número de iterações tal que o erro quadrático médio não resultasse superior a 5%. Assim, pôde-se determinar um número limitado de variáveis para a concepção do sistema especialista.

#### 4.4 - RESULTADOS

Após a aplicação do Questionário 01, foram obtidos valores de 1 a 5 para cada uma das 20 variáveis e para a pergunta de controle. Além disso, foi disponibilizado um espaço para que os respondentes incluíssem outros fatores que julgassem pertinentes quando da definição da velocidade limite em rodovias. Foram citados:

- Atuação dos órgãos fiscalizadores na região;

- Existência de programas educacionais na região;
- Duplicação de rodovias;
- Índice pluviométrico médio da região;
- Nível de serviço;
- Obras;
- Presença de animais;
- Presença de controle de pesagem (balança)
- Sazonalidade;
- Travessias de locais em que existam escolas;
- Volume de tráfego de motocicletas.

Os fatores citados anteriormente foram pontuais, com no máximo um respondente citando cada um deles. Por este motivo, nenhum dos elementos expressos na pergunta adicional foi incorporado ao modelo. Entretanto, em investigações futuras, alguns destes fatores devem ser incluídos para verificar como um grupo de especialistas – e não somente uma pessoa – reagiria ao ser questionado sobre eles especificamente. Nesta categoria, incluem-se elementos como a presença de animais na pista, o índice pluviométrico médio da região e o volume de tráfego de motocicletas.

Alguns dos fatores descritos pelos especialistas já pertencem a outras variáveis. Por exemplo, a duplicação de rodovias é referente ao fator “Características da Seção Transversal” ao passo que a travessia de locais em que existam escolas está associada à variável “Uso e Ocupação do Solo nas Áreas Lindeiras”.

Além disso, algumas respostas sugeriram limites variáveis em função do tempo pela inclusão de fatores como a sazonalidade e a existência de obras.

Com os valores numéricos do Questionário 01, foi calculado o Coeficiente Alfa de Cronbach, uma medida de confiabilidade para auferir a consistência interna de um questionário em termos da homogeneidade de itens em uma escala. Tal coeficiente pode ser definido como a proporção da variância total que é atribuída a um escore comum, presumidamente o correspondente a uma variável latente verdadeira (DEVELLIS, 2017). A Tabela 4.5 apresenta os valores indicativos para auferir a consistência, com base no Coeficiente Alfa de Cronbach.

**Tabela 4.5** – Valores de Consistência para o Coeficiente Alfa de Cronbach

<b>Classificação</b>	<b>Alpha</b>
Excelente	$\alpha > 0,90$
Boa	$0,80 > \alpha > 0,90$
Aceitável	$0,70 > \alpha > 0,80$
Questionável	$0,60 > \alpha > 0,70$
Ruim	$0,50 > \alpha > 0,60$
Inaceitável	$\alpha < 0,50$

Fonte: George & Mallery, 2003.

Foi obtido um Alfa de Cronbach igual a 0,85, fato este que presume uma boa consistência para o questionário empregado nesta etapa.

O procedimento descrito na seção anterior para obtenção dos pesos foi executado no *software* MATLAB®, mais precisamente com auxílio da *Optimization Toolbox*, isto é, um *plug-in* que fornece os parâmetros que minimizam ou maximizam uma função ou um conjunto de funções. Assim, os resultados dos valores de  $p$ ,  $p'$  e  $p''$  são apresentados na Tabela 4.6.

**Tabela 4.6** – Obtenção dos Pesos para os Fatores que Influenciam a Velocidade Limite em Rodovias

<b>Posição</b>	<b>Variável</b>	<b><math>p</math></b>	<b><math>p'</math></b>	<b><math>p''</math></b>
1	Uso do Solo	0,333	1,000	0,120
2	Número de Acidentes	0,308	0,950	0,113
3	Uso e Ocupação do Solo nas Áreas Lindeiras	0,179	0,683	0,082
4	Relevo	0,160	0,644	0,077
5	Características do Alinhamento Horizontal	0,149	0,623	0,074
6	Elementos nas Margens da Via	0,134	0,592	0,071
7	Características do Alinhamento Vertical	0,129	0,581	0,069
8	Presença e Volume de Pedestres e Ciclistas	0,102	0,526	0,063
9	Presença de Interseções	0,087	0,494	0,059
10	Presença de Facilidades para Pedestres e Ciclistas	0,056	0,430	0,051
11	Pavimento	0,039	0,396	0,047
12	Características da Seção Transversal	-0,008	0,299	0,036
13	Velocidade Praticada	-0,009	0,297	0,035
14	Presença de Dispositivos de Proteção	-0,028	0,258	0,031
15	Volume de Tráfego	-0,028	0,257	0,031
16	Sinalização	-0,084	0,142	0,017
17	Composição do Tráfego Veicular	-0,090	0,131	0,016
18	Pontes e Viadutos	-0,125	0,058	0,007
19	Presença de Retornos	-0,149	0,010	0,001
20	Presença de Acessos	-0,154	0,000	0,000

Observa-se que, dentre as variáveis mais relevantes, incluem-se o uso do solo e a ocupação da área lindeira, indicando que o fato de o ambiente ser urbano ou rural e portar residências e/ou escolas, por exemplo, exerce grande influência na definição da velocidade limite, como se esperava. Além disso, o número de acidentes foi encarado pelos especialistas como um fator de alta relevância, pois, conforme visto na seção 2.1 - deste trabalho, a acidentalidade possui forte relação com a velocidade e, por consequência, com os limites de velocidade.

Em se tratando de relevo e volume de tráfego, parâmetros fundamentais para a classificação técnica de rodovias, notou-se que somente o relevo se mostrou preponderante. Tanto o volume quanto a composição do tráfego não se mostraram relevantes, na opinião dos especialistas, quando do estabelecimento de velocidades.

Elementos geométricos – características do alinhamento horizontal e vertical – foram apontados como importantes, embora características de seção transversal, como acostamento, número de faixas e existência de taludes de aterros, bem como a presença de dispositivos de proteção, tenham apresentado classificação inferior.

Destaca-se também a velocidade praticada – V85 – apontada em referências estrangeiras como um dos fatores mais relevantes para este fim. No cenário brasileiro, entretanto, os especialistas não a consideraram de vital importância para o estabelecimento de limites de velocidade.

Em termos de retornos, acessos, interseções, pontes e viadutos, constatou-se que somente as interseções possuem alguma relevância. Tal assertiva é coerente, pois elas se caracterizam como pontos de conflito de tráfego e induzem uma redução da velocidade quando comparada a um trecho de fluxo contínuo. Acessos e retornos, desde que projetados com faixas de desaceleração, por exemplo, não deveriam interferir na velocidade de um trecho rodoviário. A mesma conclusão é válida para pontes e viadutos, que necessitam de um bom projeto geométrico em suas redondezas.

Esperava-se que a presença de pedestres e ciclistas estivesse melhor posicionada, mas pode-se atribuir sua baixa classificação ao fato de possivelmente estarem englobadas no fator “Uso e Ocupação do Solo nas Áreas Lindeiras”. Casas nas margens de rodovias, por exemplo, induzem o tráfego de pedestres.



Além disso, elementos como sinalização – vertical e horizontal – e pavimentos, na opinião dos respondentes, não foram considerados tão relevantes como outros aspectos, como uso do solo e relevo.

A Equação 4.7 foi aplicada nos resultados de  $p''$  da Tabela 4.6 e os valores dos erros quadráticos médios após as sucessivas interações podem ser vistos no Apêndice C, mais precisamente na Tabela C.1. Foi previamente definido um erro máximo admissível de 5% e este foi atingido entre as iterações 14 (4,8%) e 15 (6,9%). Por este motivo, optou-se por selecionar as 6 variáveis referentes à décima quarta iteração:

- Uso do Solo;
- Acidentalidade;
- Uso e Ocupação nas Áreas Lindeiras;
- Relevo;
- Características do Alinhamento Horizontal;
- Elementos nas Margens das Vias.

Como pode ser visto na seção 5.2.5 - deste trabalho, o método de quantificação das variáveis para a avaliação de características do alinhamento horizontal utiliza um modelo de velocidade operacional que inclui também elementos altimétricos. Assim, o sétimo fator da lista, “Características do Alinhamento Vertical”, também será incorporado ao modelo de sistema especialista com a lógica *fuzzy*, resultado no fator “Condição Geométrica”.

#### **4.5 - TÓPICOS CONCLUSIVOS**

Em qualquer problema que envolve uma grande quantidade de variáveis, destaca-se a necessidade de reduzi-lo de forma que sejam selecionados somente os fatores mais relevantes a fim de que, no procedimento da metodologia proposta, não sejam considerados elementos que possam não exercer papel significativo na análise. No problema de definição da velocidade limite, tal assertiva se aplica, pois foram propostas inicialmente 20 variáveis que poderiam influenciar o processo.

Dentre os métodos utilizados para ranquear variáveis, foi empregado o utilizado por Hu (2009), embasado no método *fuzzy* multicritério para tomada de decisão com algoritmos genéticos, pois

se tratava de um problema complexo de otimização que envolvia muitas incertezas, dentre as quais a Escala Likert. Os resultados após a aplicação do método convergiram com o esperado em termos de variáveis mais relevantes.

A única exceção, contudo, estaria relacionada à presença de pedestres e ciclistas no modelo. Admitiu-se, por outro lado, que fosse absorvida pela variável denominada “Uso e Ocupação nas Áreas Lindeiras”. Esta constatação indica a possibilidade de aplicação de outras técnicas para redução de variáveis, como Análise de Componentes Principais e Análise Fatorial. Tais ferramentas não foram empregadas neste trabalho pois se objetivava utilizar o método *fuzzy* de análise multicritério para ranquear as variáveis, e não as eliminar de maneira imediata. Entretanto, em estudos futuros, estas técnicas podem vir a ser utilizadas para instrumento de comparação.

Além disso, pode-se observar que a V85 não se mostrou com a mesma relevância como apontada em referências estrangeiras. Pode-se supor que isto tenha ocorrido pela falta de dados por parte dos especialistas, que muitas vezes não possuem acessos aos dados de velocidade operacional quando definem limites de velocidade.

Quando comparado com os resultados de Marques (2012), que podem ser observados na Tabela 2.3, nota-se que as condições de alinhamento horizontal, relevo (em termos da classificação funcional), uso do solo (em termos da classificação geral), elementos na margem da via, acidentalidade e uso e ocupação do solo nas áreas lindeiras foram representadas no estudo da autora como de alta relevância, assim como o obtido neste trabalho. Entretanto, elementos como “Volume de Tráfego” e “Presença e Volume de Pedestres e Ciclistas” tiveram mais importância quando empregadas pela supracitada autora.

Assim, apesar de os resultados com o método *fuzzy* multicritério para tomada de decisão terem demonstrado a aplicabilidade da ferramenta, em termos de conclusões satisfatórias, destaca-se a importância da utilização de técnicas adicionais – como a Análise de Componentes Principais – para uma melhor comparação dos resultados.

## 5 - CONCEPÇÃO DO SISTEMA ESPECIALISTA

Após a seleção das variáveis mais importantes para o estudo, este capítulo detalha os procedimentos realizados para a concepção do sistema *fuzzy* especialista, incluindo uma segunda consulta a especialistas para que fossem obtidas as funções de pertinência e a base de regras.

O sistema consistiu em seis variáveis de entrada (*inputs*) – uso do solo, acidentalidade, uso e ocupação nas áreas lindeiras, relevo, condição geométrica (características do alinhamento horizontal + características do alinhamento vertical) e elementos nas margens da via – e uma única variável de saída (*output*): velocidade limite.

### 5.1 - PROCEDIMENTO PARA CONSULTA A ESPECIALISTAS (QUESTIONÁRIO 02)

Foi elaborado um segundo questionário, denominado Questionário 02, em que os especialistas foram expostos a 20 cenários de trechos rodoviários e solicitados que classificassem cada segmento diante de alguns aspectos. Ao final, eles deveriam selecionar uma velocidade limite por meio de uma variável linguística e também atribuir um valor numérico a ela, entre 40 e 120 km/h.

Estes 20 cenários propostos continham distintas características quanto ao uso do solo, à acidentalidade, ao uso e ocupação da área lindeira, ao relevo, à geometria viária e à quantidade de elementos nas margens da rodovia. A classificação funcional deles, bem como outros elementos, é apresentada na Tabela D.1 do Apêndice D. A Tabela 5.1 ilustra cada uma das variáveis questionadas aos especialistas e os termos linguísticos utilizados para julgamento.

**Tabela 5.1** – Termos Linguísticos Utilizados no Questionário 02

Objeto de Avaliação	Termos Linguísticos		
Uso do Solo	Rural	Misto	Urbano
Acidentalidade	Baixa	Média	Alta
Uso e Ocupação nas Áreas Lindeiras	Baixa	Média	Alta
Relevo	Plano	Ondulado	Montanhoso
Condição Geométrica	Ruim	Mediana	Boa
Elementos nas Margens das Vias	Poucos	Eventuais	Muitos
Velocidade Limite	Baixa	Média	Alta

Para a construção destes cenários, foi utilizado o *software* Infracad®<sup>®</sup>, que possibilita a visualização de projetos de infraestrutura – como rodovias, pontes e estruturas de drenagem – em três dimensões. Tal *software* gera vídeos, como se o veículo percorresse o segmento e, com esta ferramenta, foram elaborados vídeos de duração entre 20 e 30 segundos para a representação destes 20 cenários. A velocidade da câmera foi mantida uniforme e igual em todos os casos, evitando que o especialista tivesse uma percepção tendenciosa em termos de uma velocidade limite recomendada para a via.

O Questionário 02, que pode ser observado com detalhes no Apêndice B, também foi desenvolvido *online*, com auxílio do *Google Forms*. Os entrevistados deveriam responder as mesmas questões para todos os cenários, de modo que suas respostas permitissem a construção de uma base de regras e a montagem das funções de pertinência.

Este questionário foi enviado para os mesmos respondentes do Questionário 01, isto é, pessoas que já trabalharam com definições de velocidade limite em órgãos federais e estaduais, superintendentes regionais do DNIT e acadêmicos os quais já desenvolveram trabalhos referentes a velocidades em rodovias. Foram obtidas sete respostas de diferentes lugares do Brasil, representadas no mapa da Figura 5.1. Nesta fase, os especialistas concentraram-se nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste.



**Figura 5.1** – Localização e Quantidade de Respondentes do Questionário 02

## **5.2 - PROCEDIMENTO PARA QUANTIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS**

Apesar de a lógica *fuzzy* permitir a utilização de variáveis linguísticas, é necessário que estas sejam mensuradas numericamente a fim de serem obtidos os intervalos de validade das funções de pertinência, bem como os seus parâmetros. Por este motivo, nos tópicos a seguir, são descritos os procedimentos para a quantificação dos seis fatores que mais interferem na velocidade limite de rodovias.

Os especialistas julgaram cada cenário de acordo com a Tabela 5.1, após uma análise somente visual, isto é, sem acesso a valores numéricos. Entretanto, cada cenário foi controlado conforme os critérios descritos nos tópicos desta seção de forma que, para cada variável linguística empregada para caracterização, existisse um valor quantitativo capaz de expressar a opinião dos especialistas. Este processo serviu como subsídio à construção das funções de pertinência.

A única exceção deste procedimento foi a variável “Acidentalidade”, por não ser possível expressá-la através dos vídeos. Assim, os especialistas foram apresentados a indicadores de segurança viária para que pudessem realizar a avaliação, também em termos de variáveis linguísticas.

Como destacado anteriormente, o quinto fator, “Características do Alinhamento Horizontal”, foi substituído pela variável “Condição Geométrica”. Esta mudança se deve ao fato de o modelo utilizado de quantificação englobar também o sétimo fator, “Características do Alinhamento Vertical”.

Cabe destacar que todos os valores numéricos, para cada um dos 20 cenários e suas respectivas variáveis, foram calculados com base nos métodos descritos nesta seção e foram apresentados nas tabelas do Apêndice D. Além disso, no que refere à velocidade limite, a própria resposta numérica dos especialistas foi empregada para a montagem das funções de pertinência.

### **5.2.1 - Uso do Solo**

A definição do uso do solo, em uma rodovia, é de caráter bastante subjetivo. No que concerne a esta classificação geral, o DNIT (2007) estabelece dois conceitos:

- Rodovia em área urbana: trechos de rodovias localizados dentro do perímetro urbano das cidades ou municípios;

- Rodovia em área rural: trechos de rodovias que conectam áreas urbanas e industriais, pontos de geração de tráfego e pontos significativos dos segmentos modais, atravessando área rural.

Neste trabalho, foi proposto o cálculo de um percentual da área lindeira ocupada: o somatório dos comprimentos das frentes dos lotes foi dividido pelo dobro da extensão do segmento, sendo possível, portanto, avaliar a ocupação em ambas as margens da rodovia. A unidade da medida empregada na concepção do sistema foi de m / m. Seus valores numéricos, para cada cenário, estão disponíveis na Tabela D.2 do Apêndice D.

### **5.2.2 - Acidentalidade**

Os números de acidentes de trânsito são geralmente considerados em termos de taxas a fim de possibilitar a comparação da acidentalidade viária em diferentes localidades, bem como com outras causas de mortes, tendo como exemplo doenças e homicídios. Assim, estas taxas são geralmente expressas pelo quociente entre a quantidade de acidentes ou mortos e alguma outra variável de interesse, podendo esta ser a população, o volume de veículos ou a extensão do segmento (FERRAZ *et al.*, 2012).

Um dos índices mais utilizados, neste contexto, é o de mortes por 100.000 habitantes, este sendo empregado pela OMS (2015) nos relatórios estatísticos.

Como padrão de resposta, foram citados, aos especialistas, três exemplos de índices obtidos pela OMS (2015) em distintas localidades a fim de permitir que eles tivessem uma referência quanto ao significado do valor apresentado:

- Suécia: 2,8 mortes / 100.000 pessoas;
- Estados Unidos: 10,6 mortes / 100.000 pessoas;
- Brasil: 23,4 mortes / 100.000 pessoas.

Assim, mesmo para aqueles que não estivessem familiarizados com indicadores de segurança viária, tornou-se possível atribuir uma variável linguística à acidentalidade.

Como ressaltado previamente, esta foi a única variável que não deveria ser avaliada visualmente pelos especialistas. Enquanto que, para todas as outras eles deveriam fazer o julgamento com base nos vídeos, para auferir a acidentalidade, em cada cenário, foi citado um número de mortes por 100.000 habitantes. Tal valor deveria servir como subsídio à classificação da acidentalidade em “baixa”, “média” ou “alta”. Seus valores numéricos estão representados na Tabela D.4 do Apêndice D.

### 5.2.3 - Uso e Ocupação nas Áreas Lindeiras

De forma a quantificar a ocupação lindeira das rodovias, foi utilizado o conceito de polos geradores de viagens. Segundo Diniz *et al.* (2018), polos geradores de viagens (PGVs) são empreendimentos ou mega construções que, devido à oferta de bens e serviços, geram viagens motorizadas, não motorizadas e a pé. A implantação de um *shopping*, por exemplo, exerce grande influência sobre o uso e a ocupação do solo, alterando a rotina da vizinhança e causando impactos no trânsito.

O Governo do Distrito Federal (GDF, 1998) considera como polos geradores de viagem:

- Centros de compras e *shoppings centers*;
- Mercados, supermercados e hipermercados;
- Lojas de departamento;
- Hospitais e maternidades;
- Prontos-socorros, clínicas, consultórios, laboratórios de análise e ambulatórios;
- Universidades, faculdades, cursos supletivos, cursos preparatórios às escolas superiores, cursos não seriados;
- Edifícios comerciais e de escritórios.

Para cada um destes PGVs, tem-se um número de vagas demandadas, em termos da área construída (*ac*) ou da quantidade de leitos (*ql*), cujos valores estão expressos na Tabela 5.2.

Além disso, para administrações públicas e organizações religiosas, o Governo do Distrito Federal (GDF, 2017) definiu, através da Nota Técnica N° 04/2017, um número de vagas de 1/50 m<sup>2</sup>.

**Tabela 5.2** – Número de Vagas Associados a Cada PGV

Atividade	Área Construída Total	Número de Vagas / m <sup>2</sup>
Centros de compras e shopping centers	$ac \leq 1200 \text{ m}^2$	1 / 50 m <sup>2</sup>
	$1200 \text{ m}^2 < ac \leq 2500 \text{ m}^2$	1 / 35 m <sup>2</sup>
	$5500 \text{ m}^2 < ac$	1 / 25 m <sup>2</sup>
Mercados, supermercados e hipermercados	$400 \text{ m}^2 \leq ac \leq 2500 \text{ m}^2$	1 / 50 m <sup>2</sup>
	$2500 \text{ m}^2 < ac$	1 / 35 m <sup>2</sup>
Lojas de departamento	$500 \text{ m}^2 \leq ac \leq 1200 \text{ m}^2$	1 / 75 m <sup>2</sup>
	$1200 \text{ m}^2 < ac \leq 2500 \text{ m}^2$	1 / 50 m <sup>2</sup>
	$2500 \text{ m}^2 < ac$	1 / 45 m <sup>2</sup>
Hospitais e maternidades	$ql \leq 50$	1 / ql
	$50 < ql \leq 200$	1 / 1,5 ql
	$200 \text{ nl} < ac$	1 / 2 ql
Universidades, faculdades e cursos	$300 \text{ m}^2 \leq ac \leq 1200 \text{ m}^2$	1 / 75 m <sup>2</sup>
	$1200 \text{ m}^2 < ac \leq 2500 \text{ m}^2$	1 / 50 m <sup>2</sup>
	$2500 \text{ m}^2 < ac$	1 / 25 m <sup>2</sup>
Edifícios comerciais e escritórios	$ac \leq 500 \text{ m}^2$	1 / 50 m <sup>2</sup>
	$500 \text{ m}^2 < ac \leq 1500 \text{ m}^2$	1 / 45 m <sup>2</sup>
	$1500 \text{ m}^2 < ac$	1 / 35 m <sup>2</sup>

Fonte: Adaptado de Kneib *et al.*, 2010.

A quantidade de vagas para cada tipo de edificação foi utilizada como ferramenta para a quantificação da variável referente à uso e ocupação do solo. Para habitações unifamiliares, foi atribuída uma vaga por residência. Em caso de prédios residenciais multifamiliares, admitiram-se apartamentos padrão com 100 m<sup>2</sup> de área construída e 3,0 metros de pé direito, sendo destinada uma única vaga para cada unidade habitacional.

Diante da grande variabilidade de cenários, o número de vagas foi tratado como uma variável não necessariamente inteira. A título de exemplo, uma loja de departamento com 700 m<sup>2</sup> resultaria em 9,33 vagas, conforme Tabela 5.2. Seus valores numéricos, para cada cenário, são apresentados no Tabela D.3 do Apêndice D.

#### 5.2.4 - Relevô

A AASHTO (2011) define, no manual denominado *A Policy on Geometric Designs of Highways and Streets*, popularmente conhecido como *Green Book*, classes de relevô, tendo em vista que a topografia influencia significativamente os alinhamentos, principalmente no que se refere ao vertical. Tal classificação também é empregada pelo DNER (1999) quando do estabelecimento das diretrizes para a elaboração de projetos rodoviários no Brasil. Há, dessa forma, três classes:



- Plano: condição em que as distâncias de visibilidade, permitidas pela geometria, podem resultar suficientemente longas sem que para isso se tenham maiores dificuldades ou custos elevados;
- Ondulado: condição em que as declividades do terreno natural passam a exigir constantes cortes e aterros para a conformação do perfil da rodovia, com ocasionais inclinações mais acentuadas que oferecem alguma restrição ao desenvolvimento do traçado;
- Montanhoso: Caracterizado por mudanças abruptas de elevações entre o terreno natural e a plataforma da rodovia, longitudinal e transversalmente, demandando frequentes cortes e aterros para conformar de maneira aceitável com a geometria.

Nota-se que a classificação topográfica, segundo a AASHTO (2011), não possui critérios claros e objetivos. No Brasil, contudo, a antiga norma ferroviária estabelecia uma análise em termos da inclinação transversal: plano se igual ou inferior a 8%, ondulado entre 8% e 20% e montanhoso quando acima de 20% (ANTAS *et al.*, 2010).

Para a obtenção da declividade dos cenários propostos, foram calculadas declividades entre duas estacas consecutivas, isto é, espaçadas a cada 20 metros. Ao final, foi realizada uma média aritmética das declividades, obtendo-se, portanto, uma declividade média para cada cenário, em %. Seus valores numéricos são apresentados na Tabela D.4 do Apêndice D.

As cotas foram obtidas com auxílio do *software* AutoCAD Civil 3D<sup>®</sup>, desenvolvido pela mesma fabricante do Infracad<sup>®</sup>, o que torna a comunicação entre ambos os *softwares* possível. Como o AutoCAD Civil 3D<sup>®</sup> é mais adaptado para o detalhamento de projetos rodoviários, e não apenas concepções, sua precisão é consideravelmente maior que o Infracad<sup>®</sup>, além de possuir ferramentas específicas para a extração de planilhas de relatório, motivando sua escolha para esta etapa do trabalho.

### **5.2.5 - Condição Geométrica**

Para auferir a condição geométrica das vias, em termos de características do alinhamento horizontal e vertical, foi considerado o modelo de velocidade operacional proposto por Garcia (2008). Foram utilizadas, na ocasião de sua elaboração, quatro rodovias situadas no Rio Grande do Sul (RS-020, RS-040, RS-040 e BR-116), todas elas de pista simples.

A velocidade operacional pode ser definida como aquela que descreve a velocidade real de um grupo de veículos em uma seção de uma rodovia (FITZPATRICK *et al.*, 2003). Esta velocidade oferece indicativo sobre as condições geométricas da via, permitindo identificar se os elementos estão ou não equilibrados. Dessa forma, destaca-se a importância de modelos de estimativa que busquem caracterizar uma relação de causa e efeito entre variados elementos geométricos e a velocidade operacional (GARCIA, 2008).

Foi desenvolvido um modelo para a V85 por meio de uma análise de componentes principais, técnica que permite inferir acerca de medidas multivariadas e modelos lineares. Tal abordagem permite que a redução do número de variáveis com base em correlações e a separação de variáveis com base em características comuns (GARCIA, 2008). Foi obtida, dessa forma, a Equação 5.1.

$$V_{85} = 93,1545 - \frac{166,1716}{R} - 1,1872 \cdot L - 0,4654 \cdot |I| - 1,3426 \cdot A \quad (5.1)$$

$R^2 = 0,5470$

Onde,

$V_{85}$  = velocidade operacional, em km/h;

$R$  = raio da curva, em m;

$L$  = *dummy* lado da curva [1 – esquerda, 0 – direita ou sem curva];

$I$  = declividade, em %;

$A$  = *dummy* aclone [1 – aclone, 0 – declive ou nível].

Dentre a grande quantidade de modelos de velocidade operacional disponíveis na literatura, o proposto por Garcia (2008) foi escolhido por conter elementos relativos tanto à planimetria quanto à altimetria, além de ter sido desenvolvido especificamente para rodovias brasileiras.

Entretanto, a Equação 5.1 foi desenvolvida somente para rodovias de pista simples, e, neste trabalho, objetiva-se a construção de um sistema especialista que contemple também rodovias de pista dupla. Buss (2000 *apud* ELVIK, 2009), contudo, observou que um incremento do número de faixas em uma rodovia provoca um aumento da velocidade em 21%. Dessa forma, para corrigir a supramencionada equação em termos do número de faixas, foi aplicado um fator de majoração desta magnitude em caso de pista dupla, conforme Equação 5.2.

$$V_{85\_dupla} = 1,21 \cdot V_{85} \quad (5.2)$$

Onde,

$V_{85\_dupla}$  = velocidade operacional para pista dupla, em km/h;

Os valores numéricos, para cada cenário, podem ser visualizados na Tabela D.5 do Apêndice D.

Além disso, cabe ressaltar que as velocidades operacionais foram calculadas para a condição mais crítica do segmento, isto é, para a seção que resultasse no menor valor de  $V_{85}$ . Tais situações estariam associadas aos menores valores de raio  $R$  e maiores declividades em aclave, principalmente.

Desta forma, como raios elevados e greides praticamente planos favorecem o desenvolvimento de velocidades, quanto piores as condições geométricas em termos destas variáveis, pior seria a classificação dos especialistas e, por consequência, menores os valores da velocidade operacional do trecho analisado.

### **5.2.6 - Elementos nas Margens das Vias**

Para a contabilização dos elementos nas margens das vias, definiu-se que estes deveriam estar desprotegidos, isto é, sem a presença de barreiras de concreto *New Jersey* ou defensas metálicas, que poderiam evitar o choque de veículos nestes obstáculos. Assim, incluem-se nesta categoria, árvores, postes e pilares de viadutos e passarelas.

A quantidade de obstáculos foi dividida pela extensão do segmento, em quilômetros, para que fosse obtido um número de elementos / km. Seus valores numéricos, para cada cenário, podem ser visualizados na Tabela D.6 do Apêndice D.

## **5.3 - CONSTRUÇÃO DAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA**

A definição das funções de pertinência é uma das etapas mais difíceis quando da concepção de sistemas *fuzzy* (SANTOS, 2003). Pela natureza das variáveis linguísticas ser essencialmente subjetiva, encontrar um formato de uma função que seja capaz de expressar a base de conhecimento requerida para um problema específico é uma tarefa árdua. Muitas vezes, recorre-se à utilização de algoritmos genéticos ou redes neurais.

Neste trabalho, será adotado o método indutivo de aprendizado, proposto por Sebag & Schoenauer (1994). Tal metodologia pode ser empregada tanto para funções de pertinência quanto para base de regras.

Seja  $T$  um conjunto de premissas que generaliza um exemplo  $Ex$ . Em se tratando de conclusões qualitativas, a conclusão associada às premissas  $T$  é meramente uma conclusão do exemplo  $Ex$ , isto é, a conclusão da maioria dos exemplos cobertos pelas premissas  $T$ . Assim, tem-se a notação de que  $Ex < \bullet T$  para que um exemplo  $Ex$  é coberto por um conjunto de premissas  $T$ .

Tal constatação pode ser entendida por meio de um exemplo. Existe uma *premissa* que a acidentalidade é baixa, mas existem diversos *exemplos* de número de mortes por 100.000 habitantes que possam indicar uma acidentalidade baixa. No questionário aplicado, o conjunto *fuzzy* referente à variável linguística “Acidentalidade Baixa” foi  $\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 8\}$ . Assim, pode-se afirmar, a título de exemplo, que 2 mortes por 100.000 habitantes é um *exemplo* da *premissa* que a acidentalidade em uma região é baixa.

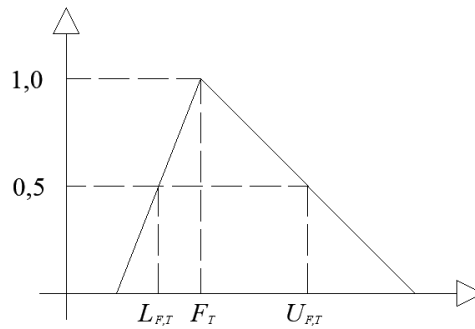
Seja uma função de pertinência  $F$ , utilizada a fim de que as *premissas* sejam quantificadas em termos de *exemplos* de forma mais clara. Tais funções são primeiramente aproximadas por triângulos, por uma questão de simplicidade.

O topo do triângulo corresponde à média dos *exemplos* das *premissas*,  $F_T$ , com grau de pertinência igual a 1. Portanto, as médias superior e inferior da função de pertinência  $F$  com respeito a  $T$ , denotadas por  $U_{F,T}$  e  $L_{F,T}$ , são:

$$U_{F,T} = \text{Média} \{F(Ex), Ex < \bullet T, F(Ex) > F_T\} \quad (5.3)$$

$$L_{F,T} = \text{Média} \{F(Ex), Ex < \bullet T, F(Ex) < F_T\} \quad (5.4)$$

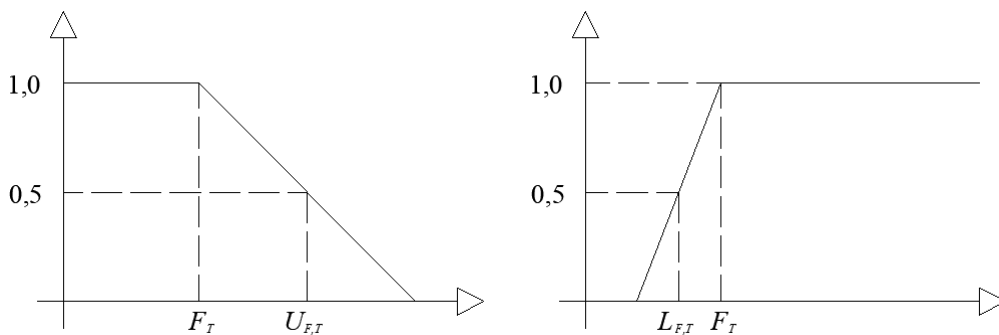
Assume-se que a altura média do triângulo, isto é, grau de pertinência igual a 0,5 seja correspondente aos valores de  $U_{F,T}$  e  $L_{F,T}$ . Graficamente, a Figura 5.2 ilustra a função resultante.



**Figura 5.2** – Construção de Função de Pertinência Triangular a partir do Método Indutivo de Aprendizado

Existem casos, entretanto, que o valor máximo do grau de pertinência pode ser atingido para  $F_T$  e se estender até a borda do domínio dos valores que constituem os *exemplos*. Como se pode observar na *premissa* “Acidentalidade Baixa”, espera-se que o fato de não haver mortes no trânsito também se enquadre nesta categoria, apesar de não haver um *exemplo* com zero mortes por 100.000 habitantes no conjunto *fuzzy* correspondente.

Esse procedimento pode ocorrer tanto em termos de uma borda inferior quando de uma borda superior. Assim, resultaria na formação apresentada na Figura 5.3 a seguir, representando, portanto, funções de pertinência trapezoidais.



**Figura 5.3** – Construção de Funções de Pertinência Trapezoidais a partir do Método Indutivo de Aprendizado

Embora Sebag & Schoenauer (1994) não tenham definido qual média utilizar, foi adotada, para o cálculo, a média aritmética simples, assim como Santos (2003).

A seguir, são apresentadas a Tabela 5.3 e Tabela 5.4, que contém o resumo dos resultados da aplicação do método indutivo de aprendizado para posterior obtenção das funções de

pertinência para as variáveis de entrada e para a saída do sistema, respectivamente. Os conjuntos completos referentes a cada variável linguística, constituindo os intervalos, podem ser visualizados nas Tabela D.7 e Tabela D.8 do Apêndice D.

Para os *inputs*, adotaram-se funções de pertinência triangulares para a variável linguística intermediária e trapezoidais para as situadas nos bordos dos intervalos. Tal decisão se deu por se supor que a pertinência das variáveis linguísticas externas não se altere à medida que esta se aproxime do limite inferior ou do limite superior. Dessa forma, seria possível abranger o maior número de casos possíveis para uma eventual expansão do sistema além dos intervalos obtidos pela consulta a especialistas.

Para o *output*, por outro lado, foram utilizadas funções de pertinência triangulares para as três variáveis linguísticas, pois os resultados com estas funções se mostraram com uma variabilidade razoável em termos dos limites inferiores e superiores (50 km/h e 120 km/h, vide Tabela 5.4) e a mudança para funções trapezoidais nos bordos não traria benefícios significativos.

**Tabela 5.3** – Resumo dos Resultados Numéricos para as Variáveis de Entrada considerando o Método Indutivo de Aprendizado

Variável de Entrada	Variável Linguística	Mínimo	Máximo	$F_T$	$L_{F,T}$	$U_{F,T}$
Uso do Solo	Rural	0,000	0,173	0,066	0,024	0,150
	Misto	0,000	0,397	0,155	0,083	0,238
	Urbano	0,034	1,000	0,286	0,168	0,699
Acidentalidade	Baixa	1	8	4,000	2,500	6,333
	Média	4	11	8,000	5,500	9,500
	Alta	7	20	14,000	10,000	17,000
Uso e Ocupação nas Áreas Lindeiras	Baixa	0,000	6183,533	1239,729	11,534	3696,118
	Média	6,506	29571,629	3537,715	927,506	13108,480
	Alta	23,528	29571,629	5101,464	1451,146	17877,581
Relevo	Plano	1,900	23,780	6,074	3,333	12,650
	Ondulado	1,900	23,780	8,983	4,590	15,572
	Montanhoso	7,000	23,780	14,898	9,990	18,170
Condição Geométrica	Ruim	36,531	108,183	79,640	48,649	89,970
	Mediana	36,531	111,653	85,175	70,987	96,782
	Boa	40,777	111,653	87,971	78,611	105,132
Elementos nas Margens das Vias	Poucos	0,000	44,559	19,423	9,955	32,048
	Eventuais	0,000	44,559	21,965	11,282	34,429
	Muitos	0,000	126,189	30,013	13,314	63,410

**Tabela 5.4** – Resumo dos Resultados Numéricos para a Velocidade Limite considerando o Método Indutivo de Aprendizado

Variável Linguística	Mínimo	Máximo	$F_T$	$L_{F,T}$	$U_{F,T}$
Baixa	50	70	60	50	70
Média	60	90	75	65	85
Alta	80	120	100	85	115

Para a obtenção dos parâmetros das funções de pertinência (três para as triangulares e quatro para as trapezoidais, como visto na Tabela 3.1), foram calculadas os coeficientes relativos a duas equações de reta: (1) entre  $(0,5 ; L_{F,T})$  e  $(1,0 ; F_T)$  e (2) entre  $(1,0 ; F_{E,T})$  e  $(0,5 ; U_{F,T})$ . Uma equação de reta assume a forma  $y_r = a_r \cdot x_r + b_r$ , em que, neste caso,  $y_r$  se refere ao grau de pertinência e  $x_r$  à variável numérica para as retas  $r$  correspondentes.

Como se deseja o ponto que a reta cruza o eixo das variáveis, deve ser utilizada a seguinte sequência de equações:

$$a_r = \frac{0,5}{F_T - \{L_{F,T} \text{ ou } U_{F,T}\}} \quad (5.5)$$

$$b_r = 1,0 - a_r \cdot F_T \quad (5.6)$$

$$x_0 = -\frac{b_r}{a_r} \quad (5.7)$$

Com os valores de  $x_0$ , tem-se os valores das abscissas quando a ordenada é nula e estes são justamente os parâmetros  $a$  e  $c$ , por exemplo, de funções de pertinência triangulares, conforme notação da Tabela 3.1.

As Tabela 5.5 e Tabela 5.6 a seguir apresentam os parâmetros e os tipos de função para cada variável linguística empregada, para os *inputs* e para o *output*, respectivamente. Convém destacar a escolha dos limites dos intervalos para as variáveis de entrada. Inferiormente, eles foram fixados em zero. Superiormente, por sua vez, foi definido um número inteiro próximo ao último valor do intervalo, conforme disposto na Tabela D.7 do Apêndice D.

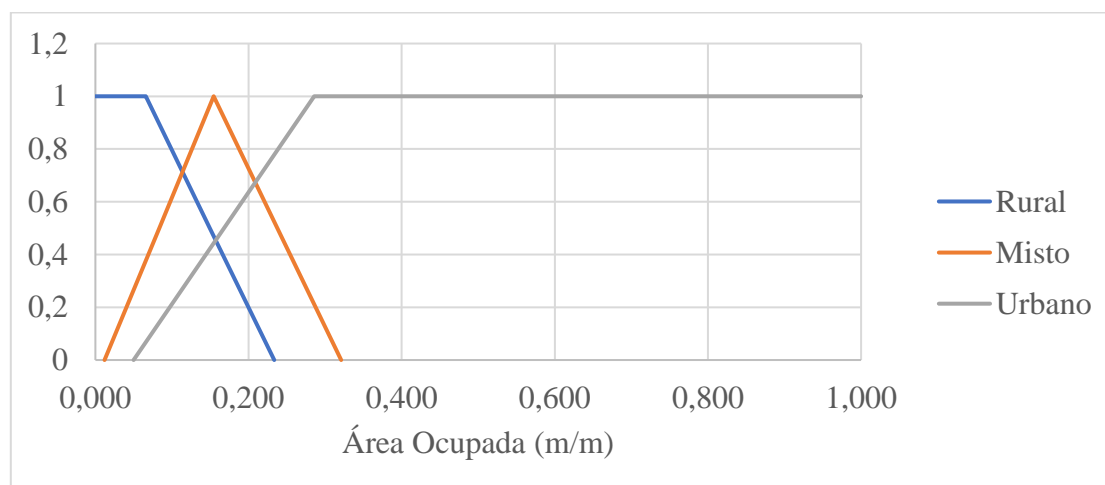
Com auxílio destes dados, foi possível traçar as funções de pertinência, estas representadas a seguir (Figura 5.4 a Figura 5.10).

**Tabela 5.5** – Parâmetros das Funções *Fuzzy* para as Variáveis de Entrada

Variável de Entrada	Variável Linguística	Tipo	Parâmetros
Uso do Solo	Rural	Trapezoidal	[0,000 ; 0,000 ; 0,066 ; 0,234]
	Misto	Triangular	[0,012 ; 0,155 ; 0,321]
	Urbano	Trapezoidal	[0,050 ; 0,286 ; 1,000 ; 1,000]
Acidentalidade	Baixa	Trapezoidal	[0,000 ; 0,000 ; 4,143 ; 8,524]
	Média	Triangular	[3,500 ; 7,500 ; 11,500]
	Alta	Trapezoidal	[6,500 ; 13,500 ; 25,000 ; 25,000]
Uso e Ocupação nas Áreas Lindeiras	Baixa	Trapezoidal	[0,000 ; 0,000 ; 1239,729 ; 6152,507]
	Média	Triangular	[-1682,702 ; 3537,715 ; 22679,245]
	Alta	Trapezoidal	[-2199,173 ; 5101,464 ; 30000,000 ; 30000,000]
Relevo	Plano	Trapezoidal	[0,000 ; 0,000 ; 6,074 ; 19,226]
	Ondulado	Triangular	[0,197 ; 8,983 ; 22,161]
	Montanhoso	Trapezoidal	[5,082 ; 14,898 ; 35,000 ; 35,000]
Condição Geométrica	Ruim	Trapezoidal	[0,000 ; 0,000 ; 79,640 ; 100,300]
	Mediana	Triangular	[56,800 ; 85,175 ; 108,390]
	Boa	Trapezoidal	[69,250 ; 87,971 ; 130,000 ; 130,000]
Elementos nas Margens das Vias	Poucos	Trapezoidal	[0,000 ; 0,000 ; 19,423 ; 44,672]
	Eventuais	Triangular	[0,599 ; 21,965 ; 46,892]
	Muitos	Trapezoidal	[-3,385 ; 30,013 ; 140,000 ; 140,000]

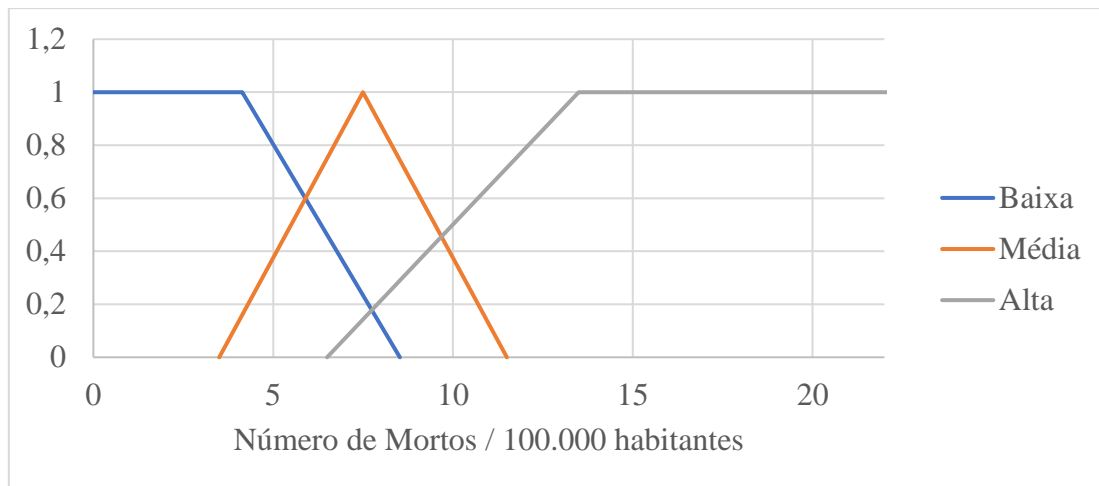
**Tabela 5.6** – Parâmetros das Funções *Fuzzy* para a Velocidade Limite

Variável Linguística	Tipo	Parâmetros
Baixa	Triangular	[40 ; 60 ; 80]
Média	Triangular	[55 ; 75 ; 95]
Alta	Triangular	[70 ; 100 ; 130]

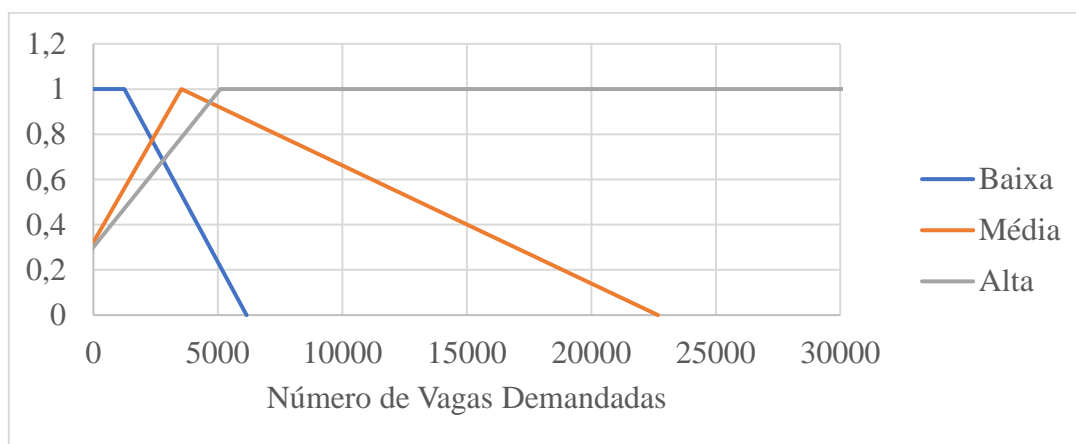


**Figura 5.4** – Funções de Pertinência para a Variável “Uso do Solo”

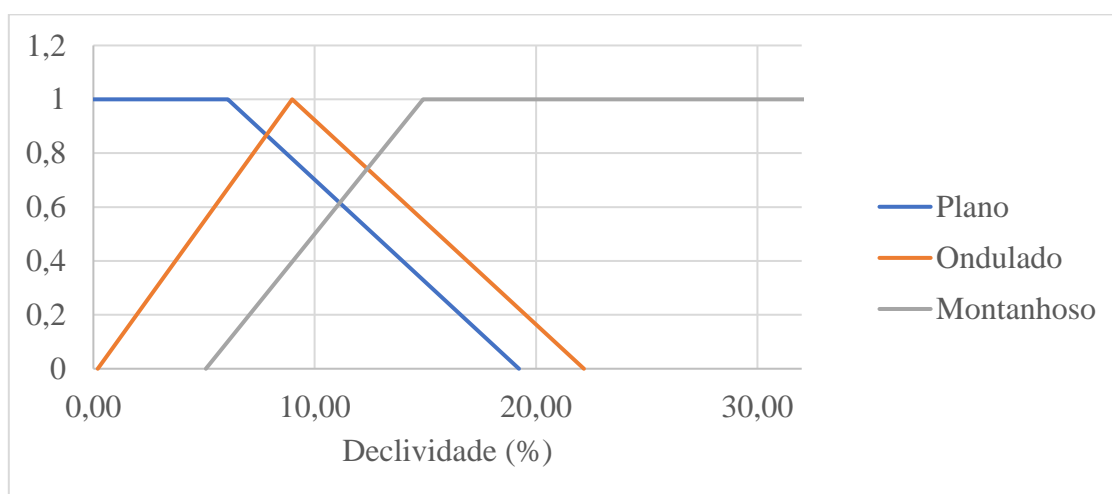




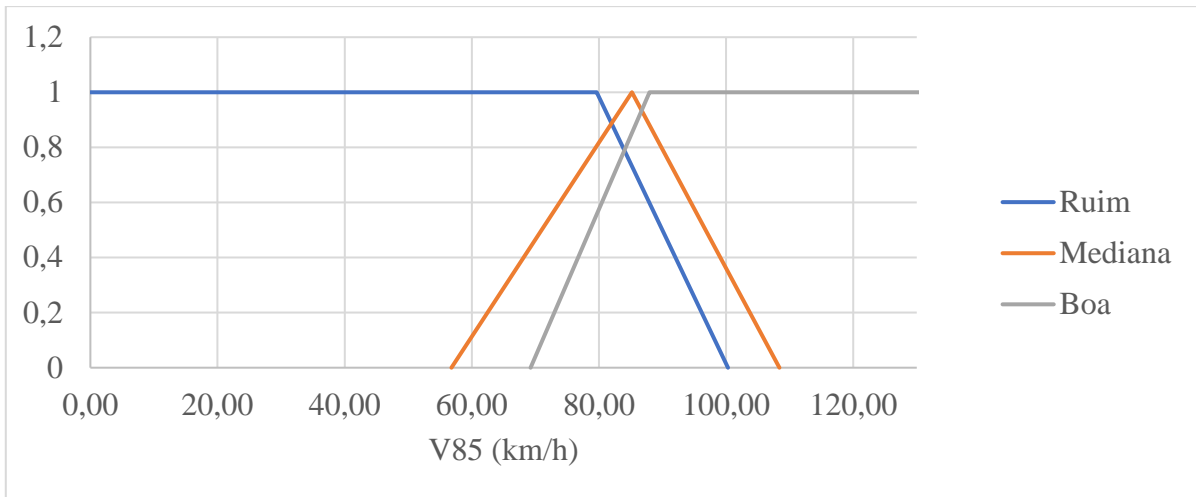
**Figura 5.5** – Funções de Pertinência para a Variável “Acidentalidade”



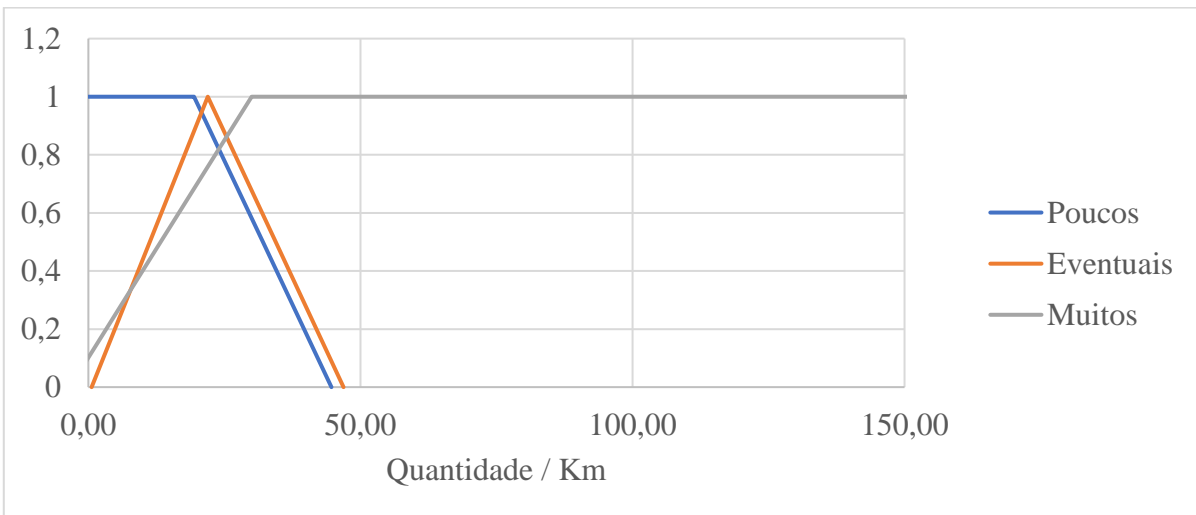
**Figura 5.6** – Funções de Pertinência para a Variável “Uso e Ocupação nas Áreas Lindeiras”



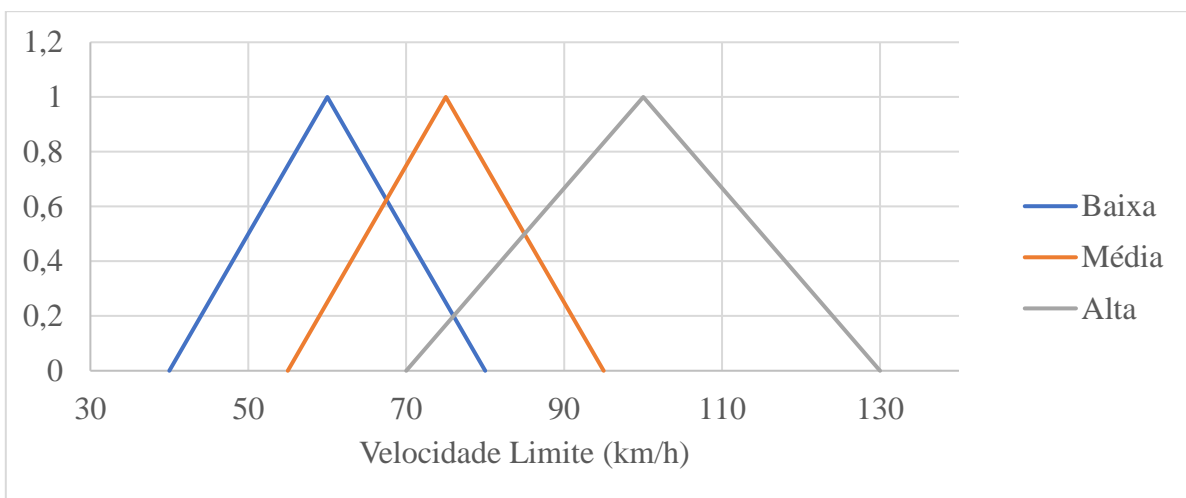
**Figura 5.7** – Funções de Pertinência para a Variável “Relevo”



**Figura 5.8** – Funções de Pertinência para a Variável “Condição Geométrica”



**Figura 5.9** – Funções de Pertinência para a Variável “Elementos nas Margens das Vias”



**Figura 5.10** – Funções de Pertinência para a Saída “Velocidade Limite”

Nota-se que todas as funções de fato apresentaram uma progressão entre as variáveis linguísticas empregadas, demonstrando que o emprego dos métodos de quantificação das variáveis foi satisfatório. Entretanto, para algumas variáveis específicas – tais como uso e ocupação nas áreas lindeiras (Figura 5.6), condição geométrica (Figura 5.8) e elementos nas margens das vias (Figura 5.9) – as funções referentes aos termos intermediários ficaram bastante superpostos com as funções adjacentes.

Além disso, os resultados dos outros conjuntos foram coerentes com o esperado. Para o uso do solo (Figura 5.4), existe uma tendência natural de considerar uma mínima ocupação como algo já urbano, o que justifica o intervalo largo para a função correspondente. Conclusão semelhante pode ser constatada na Figura 5.5, que trata da acidentalidade, pois muitos especialistas partiram do pressuposto que perder vidas, mesmo que em índices comparáveis a países desenvolvidos já ser um fator que merece atenção. No caso do relevo (Figura 5.7), notou-se o fato de os respondentes empregarem mais os termos linguísticos dos bordos, embora o termo intermediário – ondulado – ainda assim, tenha mostrado significância.

Finalmente, no que se refere à saída do sistema, as funções destacaram-se como regularmente espaçadas, excetuando-se o intervalo ligeiramente maior para a velocidade limite alta (Figura 5.10). Assim, pelo fato de ela abranger grande parte das velocidades possíveis de serem regulamentadas em rodovias, observa-se que a substituição nos bordos não necessariamente faria grande diferença para o problema em questão.

#### **5.4 - CONSTRUÇÃO DO SISTEMA ESPECIALISTA POR MEIO DE UM CONTROLADOR FUZZY**

Existem, segundo Sugeno (1985), dois tipos de controladores a serem empregados quando da utilização de sistemas *fuzzy* e tal diferença se refere às funções de pertinência utilizadas no *output*. Os mais utilizados, na literatura, são os de Mamdani e Sugeno.

Enquanto o de Mamdani possui funções de pertinência na saída, sendo necessário realizar uma defuzzificação para obter valores numéricos claros, o de Sugeno já possui um valor numérico como resposta direta (ANDRADE & JACQUES, 2008).

Para a devida aplicação, convém citar um exemplo simplificado com duas variáveis de entrada. SE o uso do solo é urbano E a acidentalidade é baixa, ENTÃO se questiona quanto deveria ser

a velocidade limite. Caso a resposta seja um termo linguístico, como “baixa”, “média” ou “alta”, trata-se do controlador de Mamdani, sendo preciso realizar uma fuzzificação posterior. Por outro lado, se a resposta for diretamente 60 km/h, por exemplo, sem que uma função de pertinência esteja associada, tem-se o controlador de Sugeno. No que se refere a este último tipo de controlador, estes valores numéricos específicos, não associados a variáveis linguísticas, mas sim a valores constantes, sendo assim denominados *singletons*.

O método para aplicação neste trabalho consistiu em utilizar o controlador de Mamdani com vista a simplificar a base de regras. Assim, há apenas três possíveis respostas para a conclusão delas: “baixa”, “média” ou “alta”. Caso fosse empregado o de Sugeno, o número de prováveis conclusões aumentaria consideravelmente, englobando valores inteiros múltiplos de 10 entre 40 e 120 km/h (nove possíveis respostas).

Entretanto, em se tratando do controlador de Mamdani, faz-se necessária a adoção de um método de defuzzificação. Os empregados no MATLAB<sup>®</sup> são (LABANCA, 2009):

- Critério de Máximo: o *output* é o valor referente ao máximo dos valores de pertinência do conjunto *fuzzy* de resposta;
- Método do Bissetor de Área: o *output* é o referente à abcissa para o qual a área à esquerda é igual à área da direita;
- Método da Média dos Máximos: o *output* é o ponto médio dos valores máximos das funções de pertinência do conjunto *fuzzy*;
- Método do Centro de Gravidade: o *output* é obtido pelo centro de gravidade da forma que representa o conjunto *fuzzy* de resposta;
- Método do Menor dos Máximos: o *output* é o menor dos valores máximos das funções de pertinência do conjunto *fuzzy*.

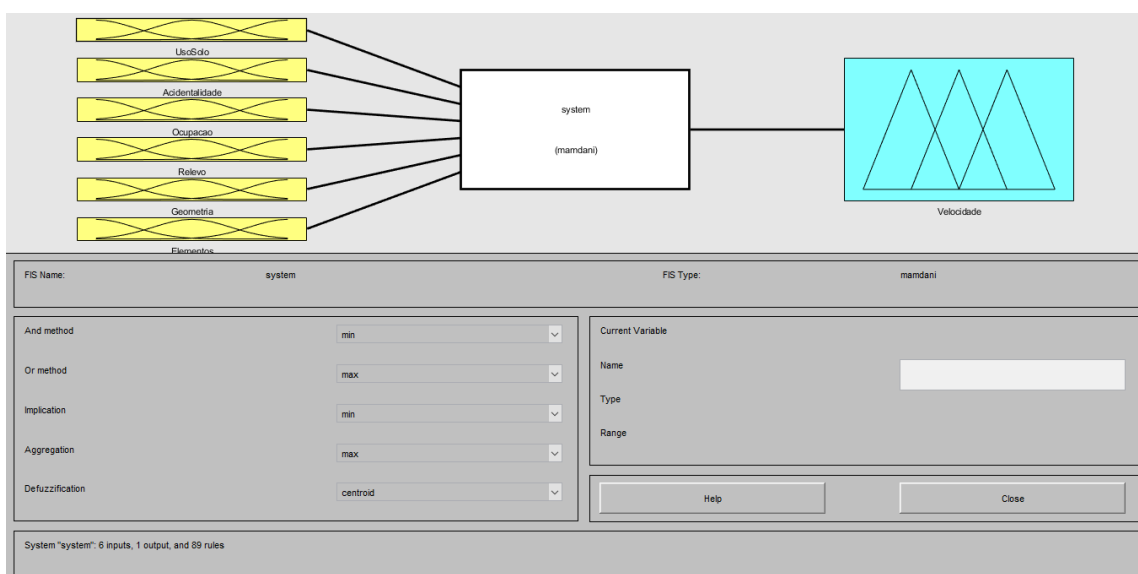
O método mais empregado é o do centro de gravidade (MATHWORKS, 2018) e, como se trata de um primeiro estudo do tema com aplicação da lógica *fuzzy*, este será o empregado neste trabalho. O referido *software* ainda solicita a inclusão de métodos de operação, implicação e agregação.

Para a operação, será utilizada a definição clássica dos conjuntos *fuzzy*, como visualizado na Figura 3.2. Para a implicação, leva-se em consideração a inclusão de pesos para as regras e, como isto não foi considerado na concepção do sistema, foram definidas as considerações padrão do *software*. Por fim, o método da agregação é responsável por agrupar os conjuntos *fuzzy* provenientes de distintas regras e resultar em um *output* final. Foi adotado, por efeito de simplicidade, o método máximo, semelhantemente ao operador de união da Figura 3.2.

As respostas dos especialistas permitiram a criação de 89 regras, que podem ser visualizadas na Tabela E.1 do Apêndice E. As regras foram obtidas com base nas variáveis empregadas pelos especialistas para caracterizar os trechos e definir uma velocidade limite. Como se trataram de 7 respondentes para 20 cenários, seriam possíveis 140 regras. Nota-se, portanto, uma sobreposição de 51 premissas que se repetiram.

A título de exemplo, uma das regras visualizadas na Tabela E.1 é: SE Uso do Solo = Rural E Acidentalidade = Alta E Uso e Ocupação nas Áreas Lindeiras = Alta E Relevo = Plano E Condição Geométrica = Mediana E Quantidade de Elementos nas Margens da Via = Muitos, ENTÃO Velocidade Limite = Baixa. Assim, observa-se que as variáveis de entrada foram relacionadas por meio de uma interseção a fim de fornecer uma conclusão quanto à velocidade limite.

A Figura 5.11 ilustra a interface do sistema *fuzzy* obtida no MATLAB®.



**Figura 5.11** – Interface do Sistema *Fuzzy* para Definição de Velocidade Limite em Rodovias

## 5.5 - TESTE DO SISTEMA ESPECIALISTA

O controlador *fuzzy* foi concebido no MATLAB<sup>®</sup> conforme os preceitos descritos nas seções anteriores. Diante disso, por meio da inserção de variáveis de entrada (*inputs*), ele foi capaz de gerar uma saída (*output*), que representava a velocidade limite.

Para testar as saídas do sistema, foram inseridos, no controlador, os valores numéricos dos cenários utilizados como base para a construção das funções de pertinência, disponíveis detalhadamente no Apêndice D. Ao processar a inferência diante do conhecimento estruturado pela base de regras, isto é, pela opinião dos especialistas, foram obtidas 20 saídas do sistema para distintos trechos de rodovias, conforme Tabela 5.7 a seguir.

**Tabela 5.7 – Outputs do Sistema para os 20 Cenários Propostos**

Cenário	Uso do Solo	Acidentalidade	Ocupação Lindeira	Relevo	Condição Geométrica	Quantidade de Elementos na Margem	Output – VELOCIDADE LIMITE
1	0,0314	7	17,69	3,30	76,85	44,56	78,5
2	0,0000	2	0,00	3,03	108,18	0,00	94,9
3	0,3974	13	6183,53	2,92	106,04	15,01	83,3
4	0,2179	12	3258,77	2,39	83,46	18,07	82,9
5	0,2283	16	221,29	1,90	86,97	41,95	84,6
6	0,0000	9	0,00	23,78	83,00	0,00	69,3
7	0,0000	10	0,00	15,55	36,53	0,00	83,8
8	0,0152	4	6,51	16,62	99,31	27,87	88,3
9	0,1243	17	23,53	9,32	86,58	40,95	82,4
10	0,1731	6	3570,28	6,53	84,63	23,72	83,1
11	0,2089	19	38,00	4,98	86,82	11,97	85,0
12	0,0434	15	11,03	5,62	40,78	12,97	85,6
13	0,2011	20	2263,57	12,98	68,64	0,00	84,5
14	1,0000	14	29571,63	3,38	102,75	126,19	83,2
15	0,1515	11	1771,89	7,00	102,86	11,84	84,9
16	0,0179	8	6,51	15,18	80,42	0,00	86,3
17	0,0000	3	0,00	5,25	86,82	0,00	92,4
18	0,0964	18	14,00	3,35	86,62	9,11	86,5
19	0,1329	5	2580,97	1,98	84,58	27,54	86,2
20	0,0343	1	13,01	1,90	111,65	0,00	96,7

Nota: As unidades para cada uma das variáveis são: Uso do Solo (m/m); Acidentalidade (número de mortes / 100.000 habitantes); Ocupação Lindeira (número de vagas demandadas); Relevo (%); Condição Geométrica (km/h); Quantidade de Elementos na Margem (número / km). Para a saída, a velocidade limite, a unidade é dada em km/h.

Durante a aplicação do questionário, para cada cenário proposto, foram obtidos sete valores de velocidade limite pelo fato de haverem sete respondentes. Diante disso, foi calculada uma

média desses valores e, para os 20 cenários, as médias foram comparadas com as saídas do sistema *fuzzy* por meio de um erro percentual, expresso pela equação a seguir:

$$E\% = \frac{|M-R|}{M} \times 100 \quad (5.8)$$

Onde,

E% = erro percentual;

R = média dos respondentes;

O = *outputs* do sistema.

Como o CONTRAN (2007) estabelece que a velocidade regulamentada para a via deve ser sempre múltipla de 10 km/h, o erro também foi calculado admitindo-se arredondamentos sempre para baixo, considerando as questões de segurança viária. Assim, a Tabela 5.8 ilustra o cálculo do erro percentual para ambas as situações.

**Tabela 5.8** – Comparação entre *Outputs* e Respostas dos Especialistas

Cenário	Sem arredondamento			Com arredondamento		
	<i>Output</i> (km/h)	Resposta (km/h)	Erro	<i>Output</i> (km/h)	Resposta (km/h)	Erro
1	78,5	81,4	3,6%	70	80	12,5%
2	94,9	112,9	15,9%	90	110	18,2%
3	83,3	74,3	12,1%	80	70	14,3%
4	82,9	67,1	23,5%	80	70	14,3%
5	84,6	62,9	34,6%	80	60	33,3%
6	69,3	87,1	20,5%	60	90	33,3%
7	83,8	78,6	6,7%	80	80	0,0%
8	88,3	97,1	9,1%	80	100	20,0%
9	82,4	61,4	34,1%	80	60	33,3%
10	83,1	71,4	16,3%	80	70	14,3%
11	85	62,9	35,2%	80	60	33,3%
12	85,6	70,0	22,3%	80	70	14,3%
13	84,5	71,4	18,3%	80	70	14,3%
14	83,2	64,3	29,4%	80	60	33,3%
15	84,9	84,3	0,7%	80	80	0,0%
16	86,3	87,1	1,0%	80	90	11,1%
17	92,4	104,3	11,4%	90	100	10,0%
18	86,5	70,0	23,6%	80	70	14,3%
19	86,2	70,0	23,1%	80	70	14,3%
20	96,7	88,6	9,2%	90	90	0,0%
Erro Médio: 17,5%			Erro Médio: 16,9%			

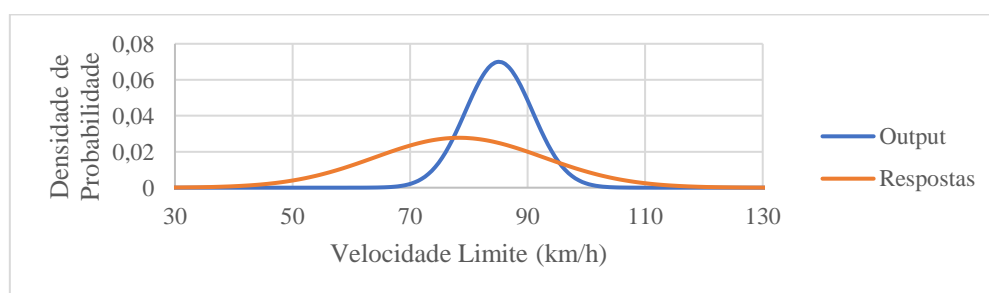
Constata-se que os erros médios foram aproximadamente da mesma magnitude admitindo as saídas como números reais e como números inteiros arredondados para múltiplos de 10. Entretanto, alguns cenários – 5, 9, 11 e 14 – apresentaram erros superiores a 25% quando não houve arredondamento e, conforme as informações contidas no Apêndice D, observa-se que estes trechos são referentes a trechos com ocupação do solo mista e intensa atividade de pedestres tendo em vista a característica de sua ocupação lindeira.

A fim de atingir outras conclusões, foram extraídas medidas estatísticas referentes aos 20 *outputs* obtidos pelo sistema *fuzzy* e às 20 médias das respostas dos especialistas, sem arredondamento. Foram realizados, ainda, os testes de normalidade Shapiro-Wilk e Kolmogorov-Smirnov, através do SAS®, expressos por meio de um valor-p. A Tabela 5.9 apresenta tais medidas.

**Tabela 5.9** – Medidas Estatísticas para os *Outputs* e para as Respostas dos Especialistas para a Velocidade Limite

Parâmetro		<i>Output</i>	Resposta
Média (km/h)		85,12	78,36
Desvio Padrão (km/h)		5,70	14,39
Máximo (km/h)		96,70	112,86
Mínimo (km/h)		69,30	61,43
Valor-p	Shapiro-Wilk	0,02	0,06
	Kolmogorov-Smirnov	0,01	0,07

Assim, segundo os testes de Shapiro-Wilk e Kolmogorov-Smirnov, as distribuições dos *outputs* e das respostas podem ser admitidas como normais a níveis de significância de 5% e 10%, respectivamente. A Figura 5.12 apresenta a distribuição dos *outputs* e das médias das respostas, considerando os parâmetros da Tabela 5.9.



**Figura 5.12** – Distribuição Normal para os *Outputs* e para as Respostas dos Respondentes



Nota-se que visualmente os resultados foram diferentes entre os *outputs* e as médias das respostas. De fato, a aplicação de testes de equivalência não produziu resultados satisfatórios para comprovar que ambas as distribuições possam ter comportamento semelhante. Cabe ainda destacar que a normalidade da distribuição das respostas (dos especialistas) tem significância somente a 10%, o que não seria satisfatório.

Além disso, a natureza das curvas é diferente pelo desvio padrão de cada uma. Como este parâmetro é bem maior para a distribuição das respostas dos especialistas, a curva correspondente adquiriu um formato mais alongado, enquanto que a curva das saídas do sistema é bem propícia à distribuição normal.

Tal característica – o fato de a média das respostas não convergir para uma distribuição normal, apesar de proveniente dos *outputs* se adequar a ela – destaca novamente a natureza subjetiva da definição da velocidade limite em rodovias.

## 5.6 - TÓPICOS CONCLUSIVOS

A concepção de um sistema *fuzzy* especialista é indicada quando as variáveis são essencialmente subjetivas, pois tal lógica lida exatamente com incertezas e imprecisões em detrimento de assertivas claras e definidas. Assim, a utilização desta técnica se mostra adequada para solucionar o problema da determinação de velocidades limites.

Entretanto, apesar de as variáveis serem linguísticas e estarem associadas a funções de pertinência, que admitem intervalos para a sua aplicação, uma das necessidades – e maiores dificuldades – do processo de fuzzificação se refere a quantificar variáveis para que estas proporcionem intervalos numéricos. Em muitos exemplos práticos da lógica *fuzzy*, como idade de pessoas e comprimentos de onda para definir cores, os métodos de quantificação são precisos e facilmente interpretáveis. Este caso, contudo, não é o das variáveis de entrada do presente estudo, para as quais foi necessário utilizar métodos não convencionais para a transformação dos termos linguísticos em números propriamente ditos.

Assim, variáveis como “Uso e Ocupação nas Áreas Lindeiras”, “Condição Geométrica” e “Elementos nas Margens das Vias” (Figura 5.6, Figura 5.8 e Figura 5.9, respectivamente) apresentaram funções de pertinência não visualmente satisfatórias, com pouca importância para a função intermediária. Isto se deve, provavelmente, a um número de variáveis linguísticas

maior que o necessário ou mesmo a uma inadequação quanto ao método de quantificação. Entretanto, o fato de as funções serem progressivas entre si corrobora com o fato de que há certo fundamento quanto aos resultados obtidos.

O controlador foi estruturado de forma que sua abordagem fosse referente exatamente a uma primeira exploração do tópico, empregando os métodos mais convencionais em termos de escolha do método de defuzzificação e de agregação. Além disso, o controlador de Mamdani foi adotado para que não fosse gerado um número excessivo de regras. Tais elementos podem vir a ser aperfeiçoados posteriormente para a obtenção de outras conclusões.

Quanto aos resultados obtidos e às comparações com as respostas dos especialistas, que subsidiaram a concepção do sistema, notou-se que eles não foram inteiramente satisfatórios por apresentarem um erro percentual de cerca de 18% em relação aos dados originais. De fato, a natureza dos dados originais é tão divergente que provocou o não atendimento à normalidade, apesar de o próprio sistema aderir a esta distribuição.

Para uma primeira exploração do tema com esta técnica, pode-se afirmar que os resultados não foram completamente incoerentes, apesar de aparentemente inconsistentes em uma primeira análise. Muitos dos métodos que serviram como base para a concepção do sistema podem ser aperfeiçoados, como com a otimização das funções de pertinência e da base de regras, além de alternativas quanto à montagem do controlador. Uma metodologia possível para atingir estes resultados, em termos de maior adequação aos resultados dos especialistas, seria utilizar algoritmos genéticos a fim de otimizar os parâmetros que subsidiaram a construção do sistema especialista.

A utilização de algoritmos genéticos se mostrou eficiente para a resolução do problema da determinação dos fatores que intervêm na velocidade limite e, por serem técnicas essencialmente de otimização, podem ser aplicadas a diversas situações, tais como as apresentadas neste capítulo.

Cabe destacar que os pontos com maior divergência em relação aos resultados dos respondentes foram aqueles que continham uma intensa ocupação da área lindeira, manifestada em termos da possível existência de pedestres em razão da quantidade de residências às margens da via.

Esta foi uma das funções de pertinência que apresentou, visualmente, o comportamento mais destoante em relação às demais, vide Figura 5.6.

Estes casos específicos devem ser reavaliados a fim de que se verifique a necessidade da inclusão de uma condição específica na saída do sistema – podendo esta ser intrínseca à lógica *fuzzy* ou não – que considere esta variável de forma mais clara, tendo em vista a sua importância para a segurança viária. É possível, por outro lado, que os refinamentos descritos anteriormente sejam capazes de corrigir este problema.

Assim, nota-se que existem mecanismos de melhoramento destas saídas a fim de que o sistema apresente maior confiabilidade e possa vir de fato a ser utilizado na prática. Ressalta-se, portanto, para uma primeira abordagem do assunto, os resultados dos *outputs* foram parcialmente satisfatórios.

## 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 6.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

A definição da velocidade limite, como ressaltado anteriormente, é um fator que traz muita subjetividade por depender da experiência do especialista. Para contornar este problema, foi proposta a concepção de um sistema especialista com utilização da lógica *fuzzy*, tendo em vista que esta técnica de inteligência artificial trabalha adequadamente com variáveis linguísticas representativas de fenômenos imprecisos por definição.

O sistema especialista resultante proporcionou saídas parcialmente satisfatórias, visto que diferiram cerca de 18% em relação às médias dos respondentes para cada cenário. Como este trabalho trata de uma primeira abordagem da técnica para o tema, pode-se dizer que os resultados estiveram coerentes dentro das limitações do estudo. Não de ser feitos esforços adicionais com base em diversas propostas de estudos futuros a fim de que os *outputs* se assemelhem mais às respostas originalmente fornecidas, contudo.

O processo metodológico foi executado conforme, basicamente, os procedimentos descritos nos capítulos 4 e 5.

Foram listadas seis variáveis que mais influenciam a determinação da velocidade limite, sendo isto realizado com base no método *fuzzy* de análise multicritério para hierarquizá-las. Tal metodologia se mostrou aceitável, convergindo a resultados coerentes no que se refere ao ranqueamento.

A hierarquização e a seleção das variáveis serviram como subsídio à concepção do sistema aqui apresentado. Realizadas estas etapas, foi possível elaborar um questionário mais simplificado – com menos variáveis de interesse – que servisse como base para extração de conhecimento dos especialistas e, com isso, montar uma base de regras e funções de pertinência.

Nota-se, portanto, que apesar de o processo de concepção do sistema ter sido elaborado com diversos fundamentos, as saídas dele não apresentaram uma precisão adequada, como algo em torno de 5%. Este erro admissível foi o mesmo empregado quando da seleção das variáveis mais relevantes para a modelagem do sistema *fuzzy*.

Em suma, a lógica *fuzzy* se mostrou como uma boa ferramenta para a modelagem do problema. O fato é que ela precisa ser aperfeiçoada e explorada com maiores detalhes a fim de verificar até qual ponto ela pode se aproximar da opinião dos especialistas e, com isso, destacar-se como um sistema especialista para a determinação de velocidades limites. O primeiro passo para isso é utilizar com mais afinco os algoritmos genéticos como otimizadores, para que sejam encontradas soluções mais satisfatórias.

Assim, com as devidas alterações esperadas com estudos adicionais, busca-se que este estudo não fique restrito ao espaço acadêmico, mas sim se expanda aos órgãos federais e estaduais, com vista a auxiliar o processo de decisão dos especialistas que definem os limites de velocidade.

## **6.2 - CUMPRIMENTO DOS OBJETIVOS**

Este trabalho consistiu em um objetivo geral e três objetivos específicos e pode-se afirmar que estes foram cumpridos com rigor.

Foi concebido um sistema especialista que visasse facilitar a tomada de decisão, apesar de ele não ter convergido a resultados inteiramente satisfatórios. Para que chegasse a este ponto, foi realizada uma revisão bibliográfica acerca da definição da velocidade limite no Brasil e em outros países para que fossem determinados os fatores que mais intervissem na velocidade limite.

O método *fuzzy* de análise multicritério para tomada de decisão subsidiou a redução das variáveis para a modelagem do sistema especialista que, embora ainda sim contivesse seis *inputs*, foi bem mais simplificado do que as 20 variáveis supostas inicialmente.

Por fim, as saídas do sistema foram comparadas com as médias das respostas dos entrevistados e, por meio disso, foram auferidos se *outputs* estavam coerentes.

## **6.3 - LIMITAÇÕES DO ESTUDO**

O estudo conteve algumas limitações com o objetivo de simplificar algumas decisões, estas que contribuíram para a concepção do sistema especialista. A primeira delas se refere ao número reduzido de variáveis, pois, se consideradas de forma integral, poderiam acarretar em um sistema muito complexo com uma base de regras excessivamente grande.

Apesar de o número de respondentes não ser um problema tão grave para a lógica *fuzzy*, 38 entrevistados para o Questionário 01 e 7 para o Questionário 02 constituem uma quantidade pequena quando avaliado que o Brasil contém 26 unidades federativas e um Distrito Federal, com uma malha rodoviária bastante extensa. O número de pessoas que trabalha com a definição de velocidades limite é certamente superior ao quantitativo de especialistas consultados neste trabalho.

Um número maior de respondentes auxiliaria no que tange à um refinamento dos pesos para a seleção das variáveis e também a uma base de regras mais estruturada, englobando os mais variados casos. Além disso, uma magnitude maior permitiria a realização de outros estudos que poderiam ser utilizados para auferir a confiabilidade do sistema – isto é, instrumentos de comparação – como o modelo multinomial logit. Sete respondentes dificilmente forneceriam coeficientes de regressão adequados para um nível de significância de 5%.

Além disso, foram apresentados somente 20 cenários para extração de conhecimento. Como o questionário foi *online*, aumentar o número de vídeos poderia ocasionar um número ainda menor de respostas. Caso as coletas de dados fossem realizadas presencialmente, a quantidade de cenários poderia ser maior e as funções de pertinência poderiam apresentar intervalos mais precisamente delimitados. Entretanto, o fato de o Brasil ser um país de dimensões continentais impede, caso o objetivo seja elaborar um sistema especialista para todo o território, como foi o deste trabalho, realizar pesquisas *in loco*, pois isto seria muito dispendioso.

Foram adotados 20 cenários para que o questionário não resultasse excessivamente longo, e mesmo assim, o número de respondentes não foi tão elevado. E, como a lógica *fuzzy* trata de imprecisões, quanto maior for a variabilidade de cenários, maior é a possibilidade de obter melhores resultados.

#### **6.4 - SUGESTÕES DE ESTUDOS FUTUROS**

Como este trabalho foi a primeira aplicação da lógica *fuzzy* no contexto de definição de velocidades limites, há diversas sugestões de estudos futuros que devem possibilitar o aprimoramento do sistema especialista. Tais sugestões envolvem não somente as técnicas de inteligência artificial, mas também um refinamento dos métodos utilizados para quantificação das variáveis linguísticas.

Quanto ao sistema *fuzzy*, podem ser citados:

- Alteração dos métodos de defuzzificação e de agregação para avaliar as soluções que mais convirjam às médias das respostas dos especialistas, alterando o controlador descrito na seção 5.4 - ;
- Utilização de algoritmos genéticos para refinar as funções de pertinência – em termos dos parâmetros e do tipo de função. Foram testadas, neste trabalho, funções triangulares e trapezoidais, que geralmente constituem a primeira abordagem quando da concepção de sistemas *fuzzy*. Os algoritmos genéticos permitem a alteração para os distintos formatos apresentados na Tabela 3.1;
- Refinamento da base de regras, para a qual também podem ser empregados algoritmos genéticos. Neste trabalho, foram inseridas todas as regras citadas pelos especialistas, o que tornou o sistema com um tempo de processamento ligeiramente elevado. Assim, a redução de muitas delas poderia fazer com que as saídas fossem obtidas de forma mais rápida e, ainda, poderia evitar qualquer explosão de regras em caso da inserção de um número excessivo delas;
- Avaliação do número de variáveis linguísticas, como para as variáveis “Uso e Ocupação nas Áreas Lindeiras”, “Condição Geométrica” e “Elementos nas Margens das Vias”, como apresentado nas Figura 5.6, Figura 5.8 e Figura 5.9. As funções intermediárias ficaram bastante superpostas às demais e uma possível redução delas poderia trazer resultados benéficos, além de uma simplificação do sistema;
- Teste do sistema com aumento do número de variáveis para verificar se, de fato, uma maior quantidade delas acarretaria em mínimas diferenças em relação às saídas do sistema obtidas neste trabalho;
- Avaliação da necessidade de uma condição específica para casos em que há volume elevado de pedestres e ciclistas, pois casos como estes foram os que apresentaram a maior divergência em relação às médias das respostas dos especialistas.

Quanto à quantificação das variáveis utilizadas para a definição dos parâmetros das funções de pertinência, pode-se dizer que outras alternativas são:

- Desenvolvimento de um modelo de velocidade operacional próprio, que englobasse também características de pista dupla. Outra alternativa seria o emprego (ou

desenvolvimento) de um índice de consistência geométrica para avaliar a qualidade dos traçados;

- Elaboração de um modelo numérico que avalie o potencial de segurança de um trecho em função somente da ocupação da área lindeira, este adaptado à realidade brasileira.

Além disso, podem ser citados aspectos gerais, como:

- Utilização das técnicas estatísticas de Análise dos Componentes Principais e Análise Fatorial para agregação das variáveis que influenciam a determinação da velocidade limite em rodovias;
- Emprego da clusterização para realizar abordagens mais regionais, tendo em vista que foram obtidas respostas de especialistas de diversas regiões do país. Tal abordagem possibilitaria sistemas especialistas para partes específicas do Brasil, dos moldes do executado nos Estados Unidos;
- Calibração e refinamento dos resultados do sistema pelo método estatístico da inferência bayesiana. Esta técnica tem diversas aplicações na teoria de aprendizado de máquinas e poderia ser utilizada para a obtenção de resultados mais coerentes com a opinião dos especialistas;
- Aplicação do sistema fuzzy concebido em uma rodovia real a fim de verificar se o resultado obtido é compatível com a velocidade regulamentada. É importante ressaltar que a rodovia selecionada para esse estudo deve ser previamente indicada por especialistas como uma via que possui velocidade compatível a sua geometria e, sendo possível, com bons indicadores de segurança viária.



## REFERÊNCIAS

- AARTS, L. & SCHAGEN, I. (2006) Driving speed and the risk of road crashes: A review. *Accident Analysis and Prevention*, v. 38, p. 215-224.
- AASHTO (2011) American Association of State Highway and Transportation Officials. *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*. Washington, DC.
- ALJANAHI, A. A. M.; RHODES, A. H.; METCALF, A. V. (1999) Speed, speed limits and road traffic accidents under free flow conditions. *Accident Analysis and Prevention*, v. 31, p. 161-168.
- ANDRADE, M. (2004) *Estudo para Aprimoramento da Operação de Controladores Semafóricos Fuzzy*. Dissertação de Mestrado em Transportes, Publicação T. DM – 012 A/2004. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 137p.
- ANDRADE, M. & JACQUES, M. A. P. (2008) Estudo comparativo de controladores de Mamdani e Sugeno para controle de tráfego em interseções isoladas. *Information Sciences*, v. XVI, n. 2, p. 24-31.
- ANTAS, P. M.; VIEIRA, A.; GONÇALO, E. A.; LOPES, L. A. S. (2010) Estradas: projeto geométrico e de terraplenagem. Interciência, Rio de Janeiro, RJ, 282p.
- ARSLAN, A. & KAYA, M. (2001) Determination of fuzzy logic membership functions using genetic algorithms. *Fuzzy Sets and Systems*, v. 118, p. 297-306.
- AUSTROADS (2005) *Balance between Harm Reduction and Mobility in Setting Speed Limits: A Feasibility Study*. Research Report AP-R272/05. Sydney, Austrália. 67p.
- BRASIL (2016) Lei Nº 13.281, de 4 de maio de 2016. Altera a Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997 (Código de Trânsito Brasileiro), e a Lei nº 13.146, de 6 de julho de 2015. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/2016/lei/113281.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2016/lei/113281.htm). Acesso em: 11/04/2018.
- BASSO, J. A. (2008) *Estabelecimento de Limites de Velocidade em Rodovias no Rio Grande do Sul*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 146p.
- BAUCHSPIESS, A. (2008) *Introdução aos Sistemas Inteligentes*. Apostila da disciplina Introdução ao Controle Inteligente Numérico. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, 78p. Disponível em: <http://www.ene.unb.br/adolfo/Lectures/ICIN/isi.pdf>. Acesso em: 20/06/2018.
- BUNDESGERICHTSHOF (1992) Urt. v. 17.03.1992, Az.: VI ZR 62/91. Disponível em: [https://www.jurion.de/urteile/bgh/1992-03-17/vi-zr-62\\_91/](https://www.jurion.de/urteile/bgh/1992-03-17/vi-zr-62_91/). Acesso em: 25/11/2018.
- CARLSSON, C. & FULLÉR, R. (1996) Fuzzy multiple criteria decision making: Recent developments. *Fuzzy Sets and Systems*, v. 78, p. 139-153.

- CETIN, V. R.; YILMAZ, H. H.; ERKAN, V. (2018) The impact of increasing speed limit in Turkey: The case of Ankara-Sivrihisar road section. *Case Studies on Transport Policy*, v. 6, p. 72-80.
- CHEN, J. (1998) *Derivation of Membership Functions for Fuzzy Variables using Genetic Algorithms*. Dissertação de Mestrado em Ciência da Computação. Mississippi State University, 46p.
- CONTRAN (2007) Conselho Nacional de Trânsito. *Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito. Sinalização Vertical de Regulamentação – Volume 1. 2ª Edição*.
- CORREIA, G. H. A. & SILVA, A. B. (2011) Setting Speed Limits on Rural Two-Lane Highways by Modeling the Relationship between Expert Judgment and Measurable Roadside Characteristics. *Journal of Transportation Engineering*, v. 137, n° 3, p. 184-192.
- DERNONCOURT, F. (2013) *Introduction to Fuzzy Logic*. Massachusetts Institute of Technology, 21p.
- DfT (2012) Department of Transportation. *Setting local speed limits*. DfT Circular 01/2013. Londres, Reino Unido. 42p.
- DEVELLIS, R. F. (2017) *Scale Development: Theory and Applications*. SAGE, Thousands Oaks, CA, 306p.
- DINIZ, I. C.; CARDOSO, A. S. C. S.; BELLO, L. A. L.; COSTA, T. C. D. (2018) Polos Geradores de Viagens e Suas Interferência na Circulação Viária: Caso do Parque Shopping Belém. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 10, p. 20-40.
- DNER (1999) Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais*. Publicação 706. 195 p.
- DNIT (2007) Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. *Terminologias Rodoviárias Usualmente Utilizadas*. Versão 1.1. 14 p.
- ELVIK, R. (2002) Optimal Speed Limits – Limits of Optimality Models. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n° 1818, p. 32-38.
- ELVIK, R. (2009) *The Power Model of the Relationship between Speed and Road Safety. Update and New Estimates*. Institute of Transport Economics (TOI) Report 1034/2009. Oslo, Noruega.
- ELVIK, R.; HØYE, A.; VAA, T.; SØRENSEN, M. (2009) *The Handbook of Road Safety Measures*. Emerald, Bingley, Reino Unido, 1124p.
- ELVIK, R. (2010) A restatement of the case for speed limits. *Transport Policy*, v. 17, p. 196-204.
- FERRAZ, C.; RAIA JR., A.; BEZERRA, B.; BASTOS, T.; RODRIGUES, K. (2012) *Segurança Viária*. Suprema Gráfica e Editora, São Carlos, SP, 322p.

FHWA (1985) Federal Highway Administration. *Speed Zoning Synthesis, a USDOT study*. Report n° FHWA/RD-85/096. Disponível em: <https://www.motorists.org/issues/speed-limits/zoning-synthesis/>. Acesso em: 29/05/2018

FITZPATRICK, K.; CARLSON, P.; BREWER M. A.; WOOLDRIDGE, M. D.; MIAOU, S. (2003) *Design Speed, Operating Speed, and Posted Speed Practices*. Transportation Research Board. National Cooperative Highway Research Program. Report 504. Washington, D.C., Estados Unidos.

FORBES, G. J.; GARDNER, T.; MCGEE, H.; SRINIVASAN, R. (2012) *Methods and Practices for Setting Speed Limits: An Informational Report*. Federal Highway Administration. Report No. FHWA-SA-12-004. Washington, D.C., Estados Unidos.

GARCIA, D. S. P. (2008) *Método para Análise da Consistência Geométrica de Rodovias Brasileiras de Pista Simples*. Tese de Doutorado em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 352p.

GDF (1998) Governo do Distrito Federal. Lei N° 1.890, de 13 de fevereiro de 1998.

GDF (2017) Governo do Distrito Federal. Nota Técnica N. 04/2017 – DIPLAN / COPLAN / SUPLAN. Vagas de estacionamentos para veículos. 22p.

GEORGE, L. E. & MALLERY, P. (2003) *SPSS for Windows step by step: A simple guide and reference*. Allyn and Bacon, Boston, MA, 386 p.

GOMIDE, F. A. C. & GUDWIN, R. R. (1994) Modelagem, Controle, Sistemas e Lógica Fuzzy. *SBA Controle & Automação*, v. 4, n° 3, p. 97-115.

GONÇALVES, F. (2016) *Algoritmos Genéticos*. Unicamp, 20p.

GREGÓRIO, N.; SILVA, A. B.; SECO, A. (2015) Speed management in rural two-way roads: speed limit definition through expert-based system. *Transportation Research Procedia*, v. 13, p. 166-175.

HAUER, E. (2009) Speed and Safety. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n° 2013, p. 10-17.

HAN, J.; PEI, J.; KAMBER, M. (2006) *Data Mining*. Pearson, Elsevier, San Francisco, CA 800 p.

HU, Y. (2009) Fuzzy multiple-criteria decision making in the determination of critical criteria for assessing service quality of travel websites. *Expert Systems with Applications*, v. 36, p. 6439-6445.

HU, J. W.; HU, Y.; BEIN, H. (2011) Constructing a Corporate Social Responsibility Fund Using Fuzzy Multiple Criteria Decision Making. *International Journal of Fuzzy Systems*, v. 13, p. 195-205.

- LABANCA, F. G. (2009) *Projeto de Controladores Semafóricos Fuzzy com o uso de Algoritmos Genéticos*. Projeto Final em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 72p.
- LTR (2017) Land Transport Rule. *Setting of Speed Limits*. Rule 54001/2017. Ministry of Transport. Wellington, Nova Zelândia.
- LI, D. & RANJITKAR, P. (2015) A fuzzy logic-based variable speed limit controller. *Journal of Advanced Transportation*, v. 49, p. 913-927.
- LUGER, G. F. (2008) *Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem Solving*. Pearson, Boston, MA, 733 p.
- KLIR, G. J. & YUAN, B. (1995) *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic – Theory and Applications*. Prentice Hall, New Jersey, NJ, 547 p.
- KLOEDEN C.N.; MCLEAN, A.J., MOORE, V.M.; PONTE, G. (1997) *Traveling Speed and the Risk of Crash Involvement*. NHMRC Road Accident Research Unit. Camberra, Austrália.
- KNEIB, E. C.; LEMOS, D.; ANDRADE, E. P.; PALHARES, M. (2010) *Polos Geradores de Viagens Orientados à Qualidade de Vida e Ambiental*. COPPE/UFRJ.
- MANNER, H. & WÜNSCH-ZIEGLER, L. (2013) Analyzing the severity of accidents on the German Autobahn. *Accident Analysis and Prevention*, v. 57, p. 40-48.
- MARDANI, A.; JUSOH, A.; ZAVADSKAS, E. K. (2015) Fuzzy multiple criteria decision-making techniques and applications – Two decades review from 1994 to 2014. *Expert Systems with Applications*, v. 42, p. 4126-4148.
- MARQUES, E. C. S. (2012) *Fatores a Serem Considerados para a Definição de Velocidade Limite em Rodovias Brasileiras*. Dissertação de Mestrado em Transportes, Publicação T. DM – 006 A/2012. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 126p.
- MATHWORKS (2018) Plataforma online de suporte ao software MATLAB®. Disponível em: [https://www.mathworks.com/?s\\_tid=gn\\_logo](https://www.mathworks.com/?s_tid=gn_logo). Acesso em: 30/11/2018.
- MELLO, R. & CHIODI, R. D. (2018) A safe speed guidance model for highways. *International Journal of Injury Control and Safety Promotion*. No prelo.
- MITCHELL, M. (1998) *An Introduction to Genetic Algorithms*. The MIT Press, Boston, MA, 162 p.
- MUTCD (2009) *Manual on Uniform Traffic Control Devices for Streets and Highways*. Edição de 2009. Washington, D.C., Estados Unidos.
- NILSON, G. (2004) *Traffic Safety Dimensions and the Power Model to Describe the Effect of Speed on Safety*. Tese de Doutorado, Department of Technology and Society, Lund Institute of Technology, Lund, Suécia.

- OMS (2015) Organização Mundial da Saúde. *Global Status Report on Road Safety 2015*. Geneva, Suíça, 325p.
- PAUW, E. D.; DANIELS, S.; FRANCKX, L.; MAYERES, I. (2018) Safety effects of dynamic speed limits on motorways. *Accident Analysis and Prevention*, v. 114, p. 83-89.
- PECHEVA, A.; ATANASSOV, K.; SHANNON, A. (2009) Modelling of a Stochastic Universal Sampling Selection Operator in Genetic Algorithms. *Tenth International Workshop on Generalized Nets*, Sofia, v.1, p. 1-7.
- ROSA, J. L. G. (2011) Fundamentos da Inteligência Artificial. LTC, Rio de Janeiro, RJ, 206 p.
- RUSSELL, S. & NORVIG, P. (2013) Artificial Intelligence: A Modern Approach. Pearson, New Jersey, NJ, 286 p.
- SAKAWA, M. (2001) Genetic Algorithms and Fuzzy Multiobjective Optimization. Interfaces, Norwell, MA, 1093 p.
- SANTOS, D. B. L. M. (2003) *Procedimento para a Construção dos Conjuntos Fuzzy Utilizados em Controladores Semafóricos*. Dissertação de Mestrado em Transportes, Publicação TU.DM – 006 A/03. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 106p.
- SEBAG, M. & SCHOENAUER, M. (1994) *Inductive Learning of Membership Functions and Fuzzy Rules*. Uncertainty Modeling: Theory and Applications, serie Machine Intelligence and Pattern Recognition. North Holland.
- SOLOMON, D. (1964) *Accidents on Main Rural Highways Related to Speed, Driver and Vehicle*. Traffic Systems Research Division, U.S. Department of Commerce. Washington, D.C., Estados Unidos.
- SRINIVASAN, R.; PARKER, M.; HARKEY, D.; THARPE, D.; SUMMER, R. (2006) *Expert System for Recommending Speed Limits in Speed Zones*. Transportation Research Board. National Cooperative Highway Research Program. Project No. 3-67. Washington, D.C., Estados Unidos.
- SUGENO, M. (1985) An Introductory Survey of Fuzzy Control. *Information Sciences*, v. 36, p. 59-83.
- TINGVALL, C. & HAWORTH N. (1999) Vision Zero – An ethical approach to safety and mobility. *Proceedings from the 6<sup>th</sup> ITE International Conference Road Safety & Traffic Enforcement*, 6th ITE International Conference Road Safety & Traffic Enforcement: Beyond 2000, Melbourne, Austrália. Disponível em: <https://www.monash.edu/muarc/our-publications/papers/visionzero>. Acesso em: 02/06/2018.
- TRB (1998) Transportation Research Board. *Managing Speed: Review of Current Practice for Setting and Enforcing Speed Limits*. Special Report 254. Washington, D.C., Estados Unidos.
- VADEBY, A. & FORSMAN, A. (2018) Traffic safety effects of new speed limits in Sweden. *Accident Analysis and Prevention*, v. 114, p. 34-39.

VAZ, A. M. (2006) *Estudo das Funções de Pertinência para Conjuntos Fuzzy Utilizados em Controladores Semafóricos Fuzzy*. Dissertação de Mestrado em Transportes, Publicação T. DM – 005 A/2006. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 158p.

VERNON, D. D.; COOK, L. J.; PETERSON, K. J.; DEAN, J. M. (2018) Effect of repeal of the national maximum speed limit law on occurrence of crashes, injury crashes, and fatal crashes on Utah highways. *Accident Analysis and Prevention*, v. 36, p. 223-229.

WANG, X.; ZHOU, Q.; QUDDUS, M.; FAN, T.; FANG, S. (2018) Speed, speed variation and crash relationships for urban arterials. *Accident Analysis and Prevention*, v. 113, p. 236-243.

YOWELL, R. O. (2005) The evolution and devolution of speed limit law and the effect on fatality rates. *Rev. Policy Res.*, v. 22, p. 501-518.

ZADEH, L. A. (1965) Fuzzy Sets. *Information and Control*, v.8, p. 338-353.

ZADEH, L. A. (1973) Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. *IEEE Transactions on Systems, Man, And Cybernetics*, v. SMC-3, nº 1.

ZINEDDIN, A. & CASTLE J. (2010) Setting Appropriate Posted Speed Limits in The Emirate of Abu Dhabi. *Proceedings from RS4C conference in Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2010, Road Safety on Four Continents, Abu Dhabi*, v.1, p. 1177-1188.

## APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO 01: DEFINIÇÃO DOS FATORES QUE INFLUENCIAM A VELOCIDADE LIMITE EM RODOVIAS

Prezados,

Sou Gabriel Andrade Lanzaro, aluno do último semestre de Engenharia Civil na Universidade de Brasília (UnB). Estou desenvolvendo, sob orientação da Professora Michelle Andrade, um projeto final para a concepção de um sistema especialista que objetiva simplificar o processo de definição da velocidade limite em rodovias brasileiras. Atualmente, a definição dos limites de velocidade é feita de forma subjetiva e um dos objetivos finais deste trabalho é uniformizar a escolha de valores, entre 40 e 120 km/h, para diferentes tipos de rodovias.

Este questionário trata da primeira etapa de consulta aos especialistas, em que é perguntado como alguns fatores possam vir a influenciar a definição da velocidade limite em rodovias. A seguir, seguem listados diversos fatores e solicito que você julgue se eles influenciam ou não quando da determinação da velocidade limite. Para isto, será utilizada uma escala para esta INFLUÊNCIA, em que 1 = Influência Muito Fraca e 5 = Influência Muito Forte.

Ao final, você terá a oportunidade de acrescentar fatores não listados e que julga necessários, atribuindo também um grau de influência (valor entre 1 e 5).

O objetivo é justamente selecionar os fatores de maior relevância para que estes sejam englobados a um sistema de fácil utilização.

Ressalta-se que este questionário é simples e que você levará entre 5 e 10 minutos para respondê-lo por completo.

Desde já agradeço.

Nome: \_\_\_\_\_  
Instituição / Órgão: \_\_\_\_\_  
Cidade / Estado: \_\_\_\_\_  
E-mail: \_\_\_\_\_

### SEÇÃO 01 – CARACTERÍSTICAS GERAIS

Para cada um dos fatores abaixo, atribua um valor de 1 a 5 em termos de INFLUÊNCIA para a determinação da velocidade limite, em que:

- 1 = Influência Muito Fraca ou Inexistente;
- 2 = Influência Fraca;
- 3 = Influência Moderada;
- 4 = Influência Forte;
- 5 = Influência Muito Forte.

**Uso do Solo:** Rural ou Urbano. Não considerar o caso de rodovias expressas ou *freeways*, ou seja, vias totalmente segregadas do espaço lindeiro.

	1	2	3	4	5	
Influência Muito Fraca	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Influência Muito Forte

**Relevo:** Plano, Ondulado ou Montanhoso.

	1	2	3	4	5	
Influência Muito Fraca	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Influência Muito Forte

**Volume de Tráfego:** Volumes médios diários de tráfego, considerando-se tráfego misto, nas condições usuais das rodovias brasileiras.

	1	2	3	4	5	
Influência Muito Fraca	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Influência Muito Forte

## SEÇÃO 02 – CARACTERÍSTICAS DA ÁREA LINDEIRA

Para cada um dos fatores abaixo, atribua um valor de 1 a 5 em termos de INFLUÊNCIA para a determinação da velocidade limite, em que:

- 1 = Influência Muito Fraca ou Inexistente;
- 2 = Influência Fraca;
- 3 = Influência Moderada;
- 4 = Influência Forte;
- 5 = Influência Muito Forte.

**Elementos nas Margens da Via:** Afastamento das edificações, pontos de ônibus e de elementos isolados (árvores, postes, pilares, etc) NÃO PROTEGIDOS por dispositivos como defensas.

	1	2	3	4	5	
Influência Muito Fraca	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Influência Muito Forte

**Uso e Ocupação do Solo nas Áreas Lindeiras:** Uso predominante do solo (residencial, industrial, comercial, agrícola) e intensidade da ocupação. Considerar também áreas escolares, postos de gasolina e outros polos geradores de viagens.

	1	2	3	4	5	
Influência Muito Fraca	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Influência Muito Forte



### SEÇÃO 03 – CARACTERÍSTICAS DA VIA

Para cada um dos fatores abaixo, atribua um valor de 1 a 5 em termos de INFLUÊNCIA para a determinação da velocidade limite, em que:

- 1 = Influência Muito Fraca ou Inexistente;
- 2 = Influência Fraca;
- 3 = Influência Moderada;
- 4 = Influência Forte;
- 5 = Influência Muito Forte.

**Características do Alinhamento Horizontal:** Número e elementos de projeto das curvas horizontais (raio e comprimento de transição, por exemplo). Levar em consideração a sinuosidade da pista, em termos de excesso de curvas.

	1	2	3	4	5	
Influência Muito Fraca	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Influência Muito Forte

**Características do Alinhamento Vertical:** Inclinação e extensão das rampas, número e elementos de projeto de curvas verticais, como comprimento de curvas. Levar em consideração a possível existência de mergulhos, que poderiam impactar a distância de visibilidade.

	1	2	3	4	5	
Influência Muito Fraca	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Influência Muito Forte

**Características da Seção Transversal:** Número e largura de faixas, presença e largura dos acostamentos, presença de meio-fio, sarjeta e inclinação dos taludes.

	1	2	3	4	5	
Influência Muito Fraca	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Influência Muito Forte

**Presença de Interseções:** Número médio por quilômetro (densidade) e tipo de interseção (em nível, por exemplo).

	1	2	3	4	5	
Influência Muito Fraca	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Influência Muito Forte

**Presença de Retornos:** Número médio de retornos por quilômetro (densidade) e características, tal como a existência de faixa de aceleração.

	1	2	3	4	5	
Influência Muito Fraca	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Influência Muito Forte

**Presença de Acessos:** Número médio por quilômetro (densidade) de acessos a propriedades lindeiras e/ou áreas de estacionamento (áreas de serviço como postos de gasolina, conveniência, restaurantes, etc.).

	1	2	3	4	5	
Influência Muito Fraca	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Influência Muito Forte

**Presença de Facilidades para Pedestres e Ciclistas:** Faixa de pedestre, passarelas, ciclovias ou ciclofaixas.

	1	2	3	4	5	
Influência Muito Fraca	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Influência Muito Forte

**Presença de Dispositivos de Proteção:** Presença e tipo de separador de fluxos opostos (barreiras de concreto, canteiro central, defensas) avaliados longitudinalmente, bem como destes elementos nas margens das rodovias.

	1	2	3	4	5	
Influência Muito Fraca	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Influência Muito Forte

**Pavimento:** Tipo de pavimento (rígido ou flexível) e estado de conservação.

	1	2	3	4	5	
Influência Muito Fraca	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Influência Muito Forte

**Sinalização:** Tipo de sinalização presente ou faltante (horizontal e vertical), bem como estado de conservação.

	1	2	3	4	5	
Influência Muito Fraca	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Influência Muito Forte

**Pontes e Viadutos:** Presença de pontes e viadutos no trecho.

	1	2	3	4	5	
Influência Muito Fraca	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Influência Muito Forte

## SEÇÃO 04 – CARACTERÍSTICAS DE TRÁFEGO

Para cada um dos fatores abaixo, atribua um valor de 1 a 5 em termos de INFLUÊNCIA para a determinação da velocidade limite, em que:

- 1 = Influência Muito Fraca ou Inexistente;
- 2 = Influência Fraca;
- 3 = Influência Moderada;
- 4 = Influência Forte;
- 5 = Influência Muito Forte.

**Presença e Volume de Pedestres e Ciclistas:** Volume médio de pedestres e ciclistas, com base em estimativas e contagens.

	1	2	3	4	5	
Influência Muito Fraca	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Influência Muito Forte

**Composição do Tráfego Veicular:** Identificação do percentual de veículos pesados.

	1	2	3	4	5	
Influência Muito Fraca	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Influência Muito Forte

### EM CASO DE VIAS EXISTENTES...

Para cada um dos fatores abaixo, atribua um valor de 1 a 5 em termos de INFLUÊNCIA para a determinação da velocidade limite, em que:

- 1 = Influência Muito Fraca ou Inexistente;
- 2 = Influência Fraca;
- 3 = Influência Moderada;
- 4 = Influência Forte;
- 5 = Influência Muito Forte.

**Velocidade Praticada:** A V85 para a via, por exemplo.

	1	2	3	4	5	
Influência Muito Fraca	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Influência Muito Forte

**Número de Acidentes:** Histórico de Acidentes, considerando últimos 5 anos.

	1	2	3	4	5	
Influência Muito Fraca	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Influência Muito Forte

## SEÇÃO 05 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para a pergunta a seguir, verifique se você **CONCORDA** com a assertiva, numa escala de 1 a 5.

- 1 = Discordo Fortemente;
- 2 = Discordo;
- 3 = Indiferente;
- 4 = Concordo;
- 5 = Concordo Fortemente.

**A definição de fatores para a velocidade limite é um processo importante para a tomada de decisão.**

	1	2	3	4	5	
Discordo Fortemente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo Fortemente

Há algum fator não contemplado neste levantamento que você considera relevante para a determinação da velocidade limite? Insira também um fator de 1 a 5.

---



---



---



---

## APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO 02: DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE LIMITE EM RODOVIAS

Prezados,

Sou Gabriel Andrade Lanzaro, aluno do último semestre de Engenharia Civil na Universidade de Brasília (UnB). Estou desenvolvendo, sob orientação da Professora Michelle Andrade, um projeto final para a concepção de um sistema especialista que objetiva simplificar o processo de definição da velocidade limite em rodovias brasileiras. Atualmente, a definição dos limites de velocidade é feita de forma subjetiva e um dos objetivos deste trabalho é uniformizar a escolha de valores, entre 40 e 120 km/h, para diferentes tipos de rodovias.

Este questionário trata da segunda etapa de consulta aos especialistas, em que você deve apresentar suas percepções considerando diferentes cenários de trechos rodoviários. Serão apresentados 20 vídeos de aproximadamente 25 segundo em que você apresentará a SUA PERCEPÇÃO em relação aos elementos:

- Uso do Solo (rural, misto ou urbano);
- Acidentalidade (baixa, média ou alta);
- Ocupação das Áreas Lindeiras (baixa, média ou alta);
- Relevo (plano, ondulado ou montanhoso);
- Condição de Projeto Geométrico (ruim, mediana, boa);
- Quantidade de Elementos na Margem da Via Desprotegidos, como árvores e postes (poucos, eventuais ou muitos).

Ao final, você deverá dizer se a velocidade limite recomendada para o trecho deve ser BAIXA, MÉDIA ou ALTA, atribuindo um valor inteiro entre 40 e 120 km/h, sendo estes valores múltiplos de 10. Cabe destacar que você avaliará o trecho o qual o "veículo" percorre, isto é, não você não deverá atribuir uma velocidade para as vias marginais.

Todos os trechos apresentados não portam sinalização vertical. A ausência desta, portanto, não deve ser avaliada para a definição da velocidade limite.

Como referência, são apresentados alguns índices de mortos no trânsito em alguns países do mundo (OMS, 2015):

- 1 - Suécia: 2,8 a cada 100.000 pessoas
- 2 - Estados Unidos: 10,6 a cada 100.000 pessoas
- 3 - Brasil: 23,4 a cada 100.000 pessoas

Ocorrendo dúvida em relação à classificação de qualquer elemento, adote um critério que considere adequado a sua percepção. Você levará cerca de 20 minutos para responder ao questionário por completo. Os vídeos poderão ser revistos quantas vezes você julgar necessário.

Desde já agradeço.

Nome: \_\_\_\_\_

Instituição / Órgão: \_\_\_\_\_

Cidade / Estado: \_\_\_\_\_

E-mail: \_\_\_\_\_

## **CENÁRIO 1**

Sobre este cenário de rodovia, responda às perguntas a seguir quanto a sua percepção da circulação no trecho apresentado.

### **DISPONIBILIZAÇÃO DO VÍDEO**

#### **Uso do Solo:**

- Rural
- Misto
- Urbano

#### **Se o número de mortos é de 7 a cada 100.000 habitantes, você considera a acidentalidade:**

- Baixa
- Média
- Alta

#### **Ocupação das Áreas Lindeiras:**

- Baixa
- Média
- Alta

#### **Relevo:**

- Plano
- Ondulado
- Montanhoso

#### **Condição de Projeto Geométrico:**

- Ruim
- Mediana
- Boa

#### **Quantidade de Elementos na Margem da Via:**

- Poucos
- Eventuais
- Muitos

#### **Sobre a Velocidade Limite que VOCÊ recomendaria:**

##### **A Velocidade Limite deve ser:**

- Baixa
- Média
- Alta

#### **Escolha um valor, em km/h, para a Velocidade Limite que você selecionaria para este trecho:**

- 40
- 50
- 60
- 70

- ( ) 80
- ( ) 90
- ( ) 100
- ( ) 110
- ( ) 120

OBS: O questionário segue este modelo do Cenário 1 ao Cenário 20. As diferenças se referem ao vídeo disponibilizado e ao número de mortos por 100.000 habitantes (que variou entre 1 e 20 nos cenários).

Os vídeos disponibilizados podem ser acessados pelos *links* da Tabela D.1, do Apêndice D.

## **CENÁRIO 2 ... CENÁRIO 20**

### **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

**Você gostaria de incluir algum cenário não contemplado pelos trechos anteriores que seria determinante para a definição da velocidade limite?**

Você pode citar o exemplo de uma situação que necessitaria de um limite específico de velocidade.

---

---

---

---

Após clicar no botão "enviar", não será mais possível alterar suas respostas.

## APÊNDICE C – SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS A PARTIR DO CÁLCULO DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO

**Tabela C.1 – Cálculo do Erro Quadrático Médio após Recálculo dos Pesos**

Iteração	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Variáveis	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
<b>Pesos</b>	1	0,1195	0,1195	0,1196	0,1205	0,1224	0,1246	0,1287	0,1331	0,1386	0,1446	0,1534	0,1642	0,1787	0,1972	0,2227	0,2565	0,3053	0,3799	0,5129	1,0000
	2	0,1135	0,1135	0,1136	0,1144	0,1162	0,1183	0,1222	0,1264	0,1316	0,1373	0,1456	0,1559	0,1697	0,1872	0,2115	0,2436	0,2898	0,3607	0,4871	-
	3	0,0816	0,0816	0,0817	0,0822	0,0836	0,0850	0,0879	0,0909	0,0946	0,0987	0,1047	0,1121	0,1220	0,1346	0,1520	0,1751	0,2084	0,2594	-	-
	4	0,0769	0,0769	0,0770	0,0776	0,0788	0,0802	0,0828	0,0857	0,0892	0,0931	0,0987	0,1057	0,1150	0,1269	0,1434	0,1651	0,1965	-	-	-
	5	0,0744	0,0744	0,0745	0,0750	0,0762	0,0776	0,0801	0,0829	0,0863	0,0900	0,0955	0,1022	0,1112	0,1228	0,1386	0,1597	-	-	-	-
	6	0,0707	0,0707	0,0708	0,0713	0,0724	0,0737	0,0762	0,0788	0,0820	0,0856	0,0908	0,0972	0,1057	0,1167	0,1318	-	-	-	-	-
	7	0,0694	0,0694	0,0695	0,0700	0,0711	0,0724	0,0748	0,0773	0,0805	0,0840	0,0891	0,0954	0,1038	0,1146	-	-	-	-	-	-
	8	0,0628	0,0628	0,0629	0,0633	0,0643	0,0655	0,0677	0,0700	0,0729	0,0760	0,0806	0,0863	0,0939	-	-	-	-	-	-	-
	9	0,0590	0,0590	0,0591	0,0595	0,0604	0,0615	0,0635	0,0657	0,0684	0,0714	0,0757	0,0810	-	-	-	-	-	-	-	-
	10	0,0514	0,0514	0,0514	0,0518	0,0526	0,0536	0,0553	0,0572	0,0596	0,0622	0,0659	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	11	0,0473	0,0473	0,0473	0,0477	0,0484	0,0493	0,0509	0,0527	0,0548	0,0572	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	12	0,0357	0,0357	0,0358	0,0360	0,0366	0,0372	0,0385	0,0398	0,0414	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	13	0,0354	0,0354	0,0355	0,0357	0,0363	0,0369	0,0382	0,0395	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	14	0,0309	0,0309	0,0309	0,0311	0,0316	0,0322	0,0333	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	15	0,0307	0,0307	0,0308	0,0310	0,0315	0,0320	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	16	0,0170	0,0170	0,0170	0,0171	0,0174	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	17	0,0156	0,0156	0,0157	0,0158	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	18	0,0069	0,0069	0,0069	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	19	0,0012	0,0012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	20	0,0000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Erro Individual		0,000%	0,000%	0,005%	0,027%	0,033%	0,111%	0,120%	0,170%	0,189%	0,362%	0,486%	0,743%	1,015%	1,541%	2,099%	3,211%	5,181%	10,092%	47,444%	
Erro Acumulado		0,000%	0,000%	0,005%	0,032%	0,065%	0,176%	0,296%	0,466%	0,655%	1,017%	1,503%	2,247%	3,261%	4,803%	6,902%	10,113%	15,294%	25,386%	72,830%	



## APÊNDICE D – VALORES UTILIZADOS PARA MONTAGEM DAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA DOS CONJUNTOS FUZZY

**Tabela D.1** – Classe de Cada Cenário e *Links* para Visualização

Cenário	Extensão	Classe	Vídeo
1	695,70	IV	<a href="https://youtu.be/CVyVsk04q9U">https://youtu.be/CVyVsk04q9U</a>
2	585,60	0	<a href="https://youtu.be/TiPvmniksoc">https://youtu.be/TiPvmniksoc</a>
3	999,25	0	<a href="https://youtu.be/cSdp403-Wgg">https://youtu.be/cSdp403-Wgg</a>
4	995,96	III	<a href="https://youtu.be/AHY_OT7Qi7k">https://youtu.be/AHY_OT7Qi7k</a>
5	739,02	III	<a href="https://youtu.be/wZWcs203_S8">https://youtu.be/wZWcs203_S8</a>
6	708,87	III	<a href="https://youtu.be/kfmHdUKe4-g">https://youtu.be/kfmHdUKe4-g</a>
7	832,99	IV	<a href="https://youtu.be/_cC9fNOP-1o">https://youtu.be/_cC9fNOP-1o</a>
8	825,31	0	<a href="https://youtu.be/oB6A9an8Xyc">https://youtu.be/oB6A9an8Xyc</a>
9	781,52	I	<a href="https://youtu.be/NR7Q7_SW0kA">https://youtu.be/NR7Q7_SW0kA</a>
10	969,85	II	<a href="https://youtu.be/E6gT1OF7Wh4">https://youtu.be/E6gT1OF7Wh4</a>
11	918,78	I	<a href="https://youtu.be/uU9FSbDC5Cg">https://youtu.be/uU9FSbDC5Cg</a>
12	771,04	IV	<a href="https://youtu.be/99UmFm5wJ_4">https://youtu.be/99UmFm5wJ_4</a>
13	817,08	III	<a href="https://youtu.be/hc8O4DANnOw">https://youtu.be/hc8O4DANnOw</a>
14	911,33	0	<a href="https://youtu.be/tKR8GMjxfW4">https://youtu.be/tKR8GMjxfW4</a>
15	844,56	0	<a href="https://youtu.be/FYf052J0gmY">https://youtu.be/FYf052J0gmY</a>
16	746,57	II	<a href="https://youtu.be/rOGL_RbO29g">https://youtu.be/rOGL_RbO29g</a>
17	895,16	I	<a href="https://youtu.be/M4A5g5ID_dw">https://youtu.be/M4A5g5ID_dw</a>
18	878,53	I	<a href="https://youtu.be/yOiHoe5Re-Q">https://youtu.be/yOiHoe5Re-Q</a>
19	798,94	III	<a href="https://youtu.be/R8rCPXMozS8">https://youtu.be/R8rCPXMozS8</a>
20	763,76	0	<a href="https://youtu.be/OOCFB2xRdSQ">https://youtu.be/OOCFB2xRdSQ</a>

**Tabela D.2** – Valores Numéricos para a Variável “Uso do Solo”

Cenário	Comprimento Ocupado	Extensão Total	% Ocupação
1	43,70	695,70	3,14%
2	0,00	585,60	0,00%
3	794,20	999,25	39,74%
4	434,10	995,96	21,79%
5	337,40	739,02	22,83%
6	0,00	708,87	0,00%
7	0,00	832,99	0,00%
8	25,10	825,31	1,52%
9	194,30	781,52	12,43%
10	335,70	969,85	17,31%
11	383,80	918,78	20,89%
12	67,00	771,04	4,34%
13	328,70	817,08	20,11%
14	1822,62	911,33	100,00%
15	255,90	844,56	15,15%
16	26,80	746,57	1,79%
17	0,00	895,16	0,00%
18	169,40	878,53	9,64%
19	212,30	798,94	13,29%
20	52,40	763,76	3,43%

**Tabela D.3** – Descrição das Ocupações e Valores Numéricos para a Variável Uso e Ocupação nas Áreas Lindeiras

Cenário	Quantidade de Construções	Número de Vagas	Descrição da Ocupação Lindeira
1	2	17,69	1 Posto de Gasolina (325,3 m <sup>2</sup> ) + 1 Correio Pequeno (559,0 m <sup>2</sup> )
2	0	0,00	Sem Ocupação
3	14	6183,53	8 Casas + 1 Posto de Gasolina (325,3 m <sup>2</sup> ) + 1 Igreja (176,4 m <sup>2</sup> ) + 1 Correio Grande (3184,4 m <sup>2</sup> ) + 1 Correio Pequeno (559,0 m <sup>2</sup> ) + 1 Prédio (8135,7 m <sup>2</sup> x 20,0 m) + 1 Prédio (10595,6 m <sup>2</sup> x 45,0 m)
4	8	3258,77	6 Casas + 1 Posto de Gasolina (325,3 m <sup>2</sup> ) + 1 Prédio (17042,9 m <sup>2</sup> x 20,0 m)
5	17	221,29	15 Casas + 1 Igreja (176,4 m <sup>2</sup> ) + 1 Prédio (2129,0 m <sup>2</sup> x 10,0 m)
6	0	0,00	Sem Ocupação
7	0	0,00	Sem Ocupação
8	1	6,51	1 Posto de Gasolina (325,3 m <sup>2</sup> )
9	21	23,53	20 Casas + 1 Igreja (176,4 m <sup>2</sup> )
10	2	3570,28	1 Correio Grande (3184,4 m <sup>2</sup> ) + 1 Prédio (9204,8 m <sup>2</sup> x 40,0 m)
11	38	38,00	38 Casas
12	3	11,03	1 Casa + 1 Posto de Gasolina (325,3 m <sup>2</sup> ) + 1 Igreja (176,4 m <sup>2</sup> )
13	24	2263,57	20 Casas + 1 Posto de Gasolina (325,3 m <sup>2</sup> ) + 1 Correio Grande (3184,4 m <sup>2</sup> ) + 1 Prédio (2020,7 m <sup>2</sup> x 60,0 m) + 1 Prédio (1782,6 m <sup>2</sup> x 60,0 m)
14	2	29571,63	1 Prédio (50683,2 m <sup>2</sup> x 30,0 m) + 1 Prédio (52817,5 m <sup>2</sup> x 30,0 m)
15	3	1771,89	1 Posto de Gasolina (325,3 m <sup>2</sup> ) + 1 Correio Grande (3184,4 m <sup>2</sup> ) + 1 Prédio (6617,7 m <sup>2</sup> x 27,0 m)
16	1	6,51	1 Posto de Gasolina (325,3 m <sup>2</sup> )
17	0	0,00	Sem Ocupação
18	14	14,00	14 Casas
19	8	2580,97	4 Casas + 1 Posto de Gasolina (325,3 m <sup>2</sup> ) + 1 Correio Grande (3184,4 m <sup>2</sup> ) + 1 Prédio (6111,0 m <sup>2</sup> x 20,0 m) + 1 Prédio (7049,6 m <sup>2</sup> x 20,0 m)
20	2	13,01	1 Posto de Gasolina (325,3 m <sup>2</sup> ) + 1 Posto de Gasolina (325,3 m <sup>2</sup> )

**Tabela D.4** – Valores Numéricos para as Variáveis “Acidentalidade” e “Declividade”

Cenário	Acidentalidade	Declividade
1	7	3,30
2	2	3,03
3	13	2,92
4	12	2,39
5	16	1,90
6	9	23,78
7	10	15,55
8	4	16,62
9	17	9,32
10	6	6,53
11	19	4,98
12	15	5,62
13	20	12,98
14	14	3,38
15	11	7,00
16	8	15,18
17	3	5,25

Cenário	Acidentalidade	Declividade
18	18	3,35
19	5	1,98
20	1	1,90

**Tabela D.5** – Valores Numéricos para a Variável “Condição Geométrica”

Cenário	Raio Crítico	Rampa Crítica	Pista Simples	Curva Esquerda?	Active?	Se Esquerda	Se Active	V85
1	135,56	5,74	SIM	NÃO	SIM	0,00	1,34	76,85
2	653,19	2,57	NÃO	NÃO	NÃO	0,00	0,00	108,18
3	569,00	2,68	NÃO	NÃO	SIM	0,00	1,34	106,04
4	236,74	1,82	SIM	SIM	SIM	0,47	1,34	83,46
5	328,83	2,41	SIM	NÃO	NÃO	0,00	0,00	86,97
6	258,68	7,98	SIM	NÃO	NÃO	0,00	0,00	83,00
7	32,35	10,00	SIM	SIM	NÃO	0,47	0,00	36,53
8	215,00	4,27	NÃO	NÃO	SIM	0,00	1,34	99,31
9	439,64	5,98	SIM	NÃO	NÃO	0,00	0,00	86,58
10	390,85	6,28	SIM	NÃO	SIM	0,00	1,34	84,63
11	827,00	5,39	SIM	SIM	SIM	0,47	1,34	86,82
12	36,11	9,50	SIM	SIM	SIM	0,47	1,34	40,78
13	90,00	10,01	SIM	NÃO	SIM	0,00	1,34	68,64
14	333,00	4,06	NÃO	NÃO	SIM	0,00	1,34	102,75
15	373,11	5,03	NÃO	NÃO	SIM	0,00	1,34	102,86
16	208,00	7,26	SIM	NÃO	SIM	0,00	1,34	80,42
17	586,00	7,51	SIM	NÃO	NÃO	0,00	0,00	86,82
18	435,00	2,92	SIM	NÃO	SIM	0,00	1,34	86,62
19	255,00	1,50	SIM	NÃO	SIM	0,00	1,34	84,58
20	1,00E+20	1,89	NÃO	NÃO	NÃO	0,00	0,00	111,65

**Tabela D.6** – Valores Numéricos para a Variável – Elementos nas Margens das Vias

Cenário	Quantidade	Quantidade / km (postes e árvores)
1	31	44,56
2	0	0,00
3	15	15,01
4	18	18,07
5	31	41,95
6	0	0,00
7	0	0,00
8	23	27,87
9	32	40,95
10	23	23,72
11	11	11,97
12	10	12,97
13	0	0,00
14	115	126,19
15	10	11,84
16	0	0,00
17	0	0,00
18	8	9,11

Cenário	Quantidade	Quantidade / km (postes e árvores)
19	22	27,54
20	0	0,00

**Tabela D.7** – Conjuntos *Fuzzy* para as Variáveis Linguísticas das Variáveis de Entrada

Variável de Entrada	Variável Linguística	Conjunto <i>Fuzzy</i>
Uso do Solo	Rural	{0 ; 0,015 ; 0,018 ; 0,031 ; 0,034 ; 0,043 ; 0,124 ; 0,151 ; 0,173}
	Misto	{0 ; 0,034 ; 0,043 ; 0,096 ; 0,124 ; 0,133 ; 0,151 ; 0,173 ; 0,201 ; 0,209 ; 0,218 ; 0,228 ; 0,397}
	Urbano	{0,034 ; 0,133 ; 0,151 ; 0,201 ; 0,209 ; 0,218 ; 0,228 ; 0,397 ; 1}
Acidentalidade	Baixa	{1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 8}
	Média	{4 ; 5 ; 6 ; 7 ; 8 ; 9 ; 10 ; 11}
	Alta	{7 ; 8 ; 9 ; 10 ; 11 ; 12 ; 13 ; 14 ; 15 ; 16 ; 17 ; 18 ; 19 ; 20}
Uso e Ocupação nas Áreas Lindeiras	Baixa	{0 ; 6,51 ; 6,51 ; 11,03 ; 13,01 ; 14 ; 17,69 ; 23,53 ; 1771,89 ; 3258,77 ; 3570,28 ; 6183,53}
	Média	{6,51 ; 11,03 ; 13,01 ; 14 ; 23,53 ; 38 ; 221,29 ; 1771,89 ; 2263,57 ; 2580,97 ; 3258,77 ; 3570,28 ; 6183,53 ; 29571,63}
	Alta	{23,53 ; 38 ; 221,29 ; 1771,89 ; 2263,57 ; 2580,97 ; 3258,77 ; 6183,53 ; 29571,63}
Relevo	Plano	{1,9 ; 1,9 ; 1,98 ; 2,39 ; 2,92 ; 3,03 ; 3,3 ; 3,35 ; 3,38 ; 4,98 ; 5,25 ; 5,62 ; 6,53 ; 7 ; 9,32 ; 16,62 ; 23,78}
	Ondulado	{1,9 ; 3,3 ; 3,35 ; 3,38 ; 4,98 ; 5,25 ; 5,62 ; 6,53 ; 7 ; 9,32 ; 12,98 ; 15,18 ; 15,55 ; 16,62 ; 23,78}
	Montanhoso	{7 ; 12,98 ; 15,18 ; 15,55 ; 23,78}
Condição Geométrica	Ruim	{36,53 ; 40,78 ; 68,64 ; 80,42 ; 83,46 ; 84,63 ; 86,58 ; 86,62 ; 86,82 ; 86,97 ; 106,04 ; 108,18}
	Mediana	{36,53 ; 40,78 ; 68,64 ; 76,85 ; 80,42 ; 83 ; 83,46 ; 84,58 ; 84,63 ; 86,58 ; 86,62 ; 86,82 ; 86,82 ; 86,97 ; 99,31 ; 102,75 ; 102,86 ; 106,04 ; 108,18 ; 111,65}
	Boa	{40,78 ; 68,64 ; 76,85 ; 80,42 ; 83 ; 83,46 ; 84,58 ; 86,58 ; 86,62 ; 86,82 ; 86,97 ; 99,31 ; 102,75 ; 102,86 ; 106,04 ; 108,18 ; 111,65}
Elementos nas Margens das Vias	Poucos	{0 ; 11,84 ; 12,97 ; 15,01 ; 23,72 ; 27,87 ; 44,56}
	Eventuais	{0 ; 9,11 ; 11,84 ; 11,97 ; 12,97 ; 15,01 ; 18,07 ; 23,72 ; 27,54 ; 27,87 ; 40,95 ; 41,95 ; 44,56}
	Muitos	{0 ; 9,11 ; 11,84 ; 11,97 ; 12,97 ; 15,01 ; 18,07 ; 27,54 ; 40,95 ; 41,95 ; 44,56 ; 126,19}

**Tabela D.8** – Conjuntos *Fuzzy* para as Variáveis Linguísticas da Velocidade Limite

Variável Linguística	Conjunto <i>Fuzzy</i>
Baixa	{50 ; 60 ; 70}
Média	{60 ; 70 ; 80 ; 90}
Alta	{80 ; 90 ; 100 ; 110 ; 120}

## APÊNDICE E – BASE DE REGRAS

**Tabela E.1** – Base de Regras como Resultado da Consulta a Especialistas

SE Uso do Solo	E Acidentalidade	E Uso e Ocupação nas Áreas Lindeiras	E Relevo	E Condição Geométrica	E Elementos nas Margens da Via	ENTÃO Velocidade Limite
Rural	Alta	Alta	Plano	Mediana	Muitos	Baixa
Rural	Alta	Baixa	Montanhoso	Boa	Poucos	Média
Rural	Alta	Baixa	Montanhoso	Mediana	Eventuais	Média
Rural	Alta	Baixa	Montanhoso	Mediana	Poucos	Média
Rural	Alta	Baixa	Montanhoso	Ruim	Poucos	Baixa
Rural	Alta	Baixa	Montanhoso	Ruim	Poucos	Média
Rural	Alta	Baixa	Ondulado	Boa	Poucos	Alta
Rural	Alta	Baixa	Ondulado	Mediana	Eventuais	Média
Rural	Alta	Baixa	Ondulado	Mediana	Muitos	Média
Rural	Alta	Baixa	Ondulado	Mediana	Poucos	Média
Rural	Alta	Baixa	Ondulado	Ruim	Poucos	Alta
Rural	Alta	Baixa	Plano	Boa	Muitos	Média
Rural	Alta	Baixa	Plano	Boa	Poucos	Alta
Rural	Alta	Baixa	Plano	Boa	Poucos	Média
Rural	Alta	Baixa	Plano	Mediana	Eventuais	Média
Rural	Alta	Baixa	Plano	Mediana	Poucos	Média
Rural	Alta	Baixa	Plano	Ruim	Poucos	Média
Rural	Alta	Média	Ondulado	Ruim	Eventuais	Baixa
Rural	Baixa	Baixa	Montanhoso	Boa	Poucos	Média
Rural	Baixa	Baixa	Ondulado	Boa	Poucos	Alta
Rural	Baixa	Baixa	Ondulado	Boa	Poucos	Média
Rural	Baixa	Baixa	Ondulado	Mediana	Poucos	Alta
Rural	Baixa	Baixa	Ondulado	Mediana	Poucos	Média
Rural	Baixa	Baixa	Plano	Boa	Eventuais	Alta
Rural	Baixa	Baixa	Plano	Boa	Eventuais	Média
Rural	Baixa	Baixa	Plano	Boa	Poucos	Alta
Rural	Baixa	Baixa	Plano	Mediana	Muitos	Média
Rural	Baixa	Baixa	Plano	Mediana	Poucos	Alta
Rural	Baixa	Baixa	Plano	Ruim	Poucos	Alta
Rural	Baixa	Média	Ondulado	Mediana	Eventuais	Média
Rural	Média	Baixa	Montanhoso	Boa	Poucos	Média
Rural	Média	Baixa	Montanhoso	Mediana	Poucos	Média
Rural	Média	Baixa	Ondulado	Boa	Eventuais	Alta
Rural	Média	Baixa	Ondulado	Boa	Eventuais	Média
Rural	Média	Baixa	Ondulado	Boa	Poucos	Alta
Rural	Média	Baixa	Ondulado	Boa	Poucos	Média
Rural	Média	Baixa	Ondulado	Mediana	Poucos	Média
Rural	Média	Baixa	Ondulado	Ruim	Eventuais	Baixa
Rural	Média	Baixa	Ondulado	Ruim	Poucos	Média

<b>SE Uso do Solo</b>	<b>E Acidentalidade</b>	<b>E Uso e Ocupação nas Áreas Lindeiras</b>	<b>E Relevo</b>	<b>E Condição Geométrica</b>	<b>E Elementos nas Margens da Via</b>	<b>ENTÃO Velocidade Limite</b>
Rural	Média	Baixa	Plano	Boa	Muitos	Média
Rural	Média	Baixa	Plano	Mediana	Eventuais	Média
Rural	Média	Baixa	Plano	Ruim	Poucos	Alta
Misto	Alta	Alta	Ondulado	Mediana	Muitos	Baixa
Misto	Alta	Alta	Ondulado	Mediana	Muitos	Média
Misto	Alta	Alta	Plano	Boa	Muitos	Média
Misto	Alta	Alta	Plano	Mediana	Muitos	Média
Misto	Alta	Alta	Plano	Ruim	Muitos	Baixa
Misto	Alta	Baixa	Ondulado	Boa	Poucos	Alta
Misto	Alta	Baixa	Ondulado	Ruim	Eventuais	Baixa
Misto	Alta	Baixa	Ondulado	Ruim	Eventuais	Média
Misto	Alta	Baixa	Plano	Boa	Eventuais	Média
Misto	Alta	Baixa	Plano	Boa	Poucos	Alta
Misto	Alta	Média	Montanhoso	Boa	Eventuais	Alta
Misto	Alta	Média	Montanhoso	Boa	Eventuais	Média
Misto	Alta	Média	Ondulado	Boa	Eventuais	Baixa
Misto	Alta	Média	Ondulado	Boa	Eventuais	Média
Misto	Alta	Média	Ondulado	Mediana	Eventuais	Média
Misto	Alta	Média	Ondulado	Mediana	Muitos	Baixa
Misto	Alta	Média	Ondulado	Mediana	Muitos	Média
Misto	Alta	Média	Ondulado	Ruim	Eventuais	Baixa
Misto	Alta	Média	Plano	Boa	Eventuais	Média
Misto	Alta	Média	Plano	Mediana	Eventuais	Baixa
Misto	Alta	Média	Plano	Mediana	Eventuais	Média
Misto	Alta	Média	Plano	Mediana	Muitos	Alta
Misto	Alta	Média	Plano	Mediana	Muitos	Média
Misto	Alta	Média	Plano	Ruim	Muitos	Média
Misto	Baixa	Baixa	Plano	Mediana	Poucos	Média
Misto	Baixa	Média	Ondulado	Ruim	Eventuais	Média
Misto	Baixa	Média	Plano	Boa	Eventuais	Alta
Misto	Baixa	Média	Plano	Boa	Eventuais	Média
Misto	Baixa	Média	Plano	Mediana	Eventuais	Média
Misto	Média	Alta	Plano	Mediana	Muitos	Baixa
Misto	Média	Baixa	Plano	Ruim	Eventuais	Média
Misto	Média	Média	Ondulado	Mediana	Eventuais	Média
Misto	Média	Média	Plano	Boa	Muitos	Média
Misto	Média	Média	Plano	Mediana	Eventuais	Média
Urbano	Alta	Alta	Montanhoso	Ruim	Muitos	Baixa
Urbano	Alta	Alta	Plano	Boa	Eventuais	Média
Urbano	Alta	Alta	Plano	Boa	Muitos	Alta
Urbano	Alta	Alta	Plano	Boa	Muitos	Baixa
Urbano	Alta	Alta	Plano	Boa	Muitos	Média

<b>SE Uso do Solo</b>	<b>E Acidentalidade</b>	<b>E Uso e Ocupação nas Áreas Lindeiras</b>	<b>E Relevo</b>	<b>E Condição Geométrica</b>	<b>E Elementos nas Margens da Via</b>	<b>ENTÃO Velocidade Limite</b>
Urbano	Alta	Alta	Plano	Mediana	Eventuais	Baixa
Urbano	Alta	Alta	Plano	Mediana	Muitos	Baixa
Urbano	Alta	Alta	Plano	Mediana	Muitos	Média
Urbano	Alta	Alta	Plano	Ruim	Muitos	Baixa
Urbano	Alta	Média	Ondulado	Mediana	Muitos	Baixa
Urbano	Alta	Média	Plano	Mediana	Eventuais	Média
Urbano	Baixa	Alta	Plano	Mediana	Muitos	Média
Urbano	Baixa	Média	Plano	Boa	Eventuais	Média