

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
CAMPUS TIMÓTEO**

Luiz Guilherme Santos e Souza

**DETECÇÃO DE LOMBADAS BASEADO EM VIBRAÇÃO
UTILIZANDO LÓGICA FUZZY**

Timóteo

2024

Luiz Guilherme Santos e Souza

**DETECÇÃO DE LOMBADAS BASEADO EM VIBRAÇÃO
UTILIZANDO LÓGICA FUZZY**

Monografia apresentada à Coordenação de Engenharia de Computação do Campus Timóteo do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Computação.

Orientador: Ms. Odilon Corrêa da Silva

Timóteo

2024

Luiz Guilherme Santos e Souza

DETECÇÃO DE LOMBADAS BASEADO EM VIBRAÇÃO UTILIZANDO LÓGICA FUZZY

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia de Computação
do Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais, campus Timóteo, como requisito
parcial para obtenção do título de Engenheiro de
Computação.

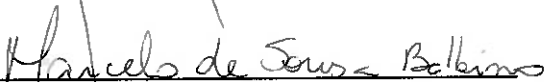
Trabalho aprovado. Timóteo, 11 de fevereiro de 2025:



Prof. Me. Odilon Corrêa da Silva
Orientador



Prof. Dr. Maurílio Alves Martins da Costa
Professor Convidado



Prof. Dr. Marcelo de Sousa Balbino
Professor Convidado

Timóteo
2025

Dedico aos meus pais Valdeci e Ezilda
e ao meu irmão Luan.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus, por ser minha fonte de força, inspiração e sabedoria em todos os momentos desta jornada. Sua presença me sustentou nos desafios e me guiou nas decisões, permitindo que eu chegasse a este importante marco da minha vida acadêmica.

Aos meus familiares, minha eterna gratidão pelo amor, paciência e apoio incondicional. Vocês foram meu porto seguro e a base que me motivou a persistir mesmo diante das dificuldades. Cada palavra de incentivo e gesto de carinho foi essencial para que eu pudesse seguir em frente.

Ao meu orientador, que com dedicação, paciência e sabedoria, me guiou ao longo deste trabalho. Suas orientações não apenas enriqueceram o desenvolvimento deste estudo, mas também foram fundamentais para o meu crescimento acadêmico e profissional.

Aos meus amigos, que estiveram presentes nos momentos de alegria e me ofereceram apoio nos momentos difíceis, meu sincero obrigado. A amizade e a troca de experiências com vocês foram um combustível essencial durante essa jornada.

Aos professores que, ao longo da minha formação, transmitiram conhecimento, valores e dedicação, minha gratidão eterna. Cada aula e orientação contribuíram para moldar minha trajetória acadêmica e me preparar para os desafios que virão.

Por fim, a todos que fizeram parte deste percurso e contribuíram para que eu alcançasse este momento, deixo aqui o meu mais sincero agradecimento.

“Se você quer algo que nunca teve, precisa estar disposto a fazer algo que nunca fez”.
Thomas Jefferson

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema para detecção de lombadas em vias urbanas, utilizando dados de aceleração captados por um acelerômetro de smartphone e analisados por meio da lógica fuzzy. O objetivo principal foi implementar uma metodologia capaz de identificar com precisão a presença de lombadas, baseando-se nas variações de vibração registradas ao longo do trajeto de um veículo. Para isso, foram utilizados o aplicativo Sensor Logger para coleta de dados e o software InFuzzy para modelagem do sistema fuzzy, incluindo a definição de variáveis linguísticas, funções de pertinência e regras fuzzy. A metodologia incluiu as etapas de fuzzificação, inferência fuzzy e defuzzificação, com a aplicação do método do centro de gravidade para obter uma saída nítida. Os testes foram realizados em diferentes trajetos e velocidades, demonstrando que o sistema é capaz de detectar lombadas com um alto nível de precisão, mesmo em condições variáveis de via. A aplicação da lógica fuzzy mostrou-se eficaz para lidar com a incerteza dos dados e adaptar-se a diferentes contextos de uso, proporcionando uma solução viável para a identificação da lombada.

Palavras-chave: detecção de lombadas, lógica fuzzy, acelerômetro, Sensor Logger, InFuzzy.

Abstract

This study presents the development of a system for speed bump detection in urban roads, using acceleration data captured by a smartphone accelerometer and analyzed through fuzzy logic. The main objective was to implement a methodology capable of accurately identifying the presence of speed bumps based on vibration variations recorded along a vehicle's trajectory. For this purpose, the Sensor Logger app was used for data collection, and the InFuzzy software was employed for fuzzy system modeling, including the definition of linguistic variables, membership functions, and fuzzy rules. The methodology comprised the steps of fuzzification, fuzzy inference, and defuzzification, with the application of the center of gravity method to produce a crisp output. Tests were conducted on different routes and at varying speeds, demonstrating that the system can detect speed bumps with a high level of accuracy, even under variable road conditions. The application of fuzzy logic proved effective in handling data uncertainty and adapting to different usage contexts, providing a viable solution for speed bump detection.

Keywords: speed bump detection, fuzzy logic, accelerometer, Sensor Logger, InFuzzy.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Diagrama do procedimento metodológico	25
Figura 2 – Mapa do bairro Jardim Panorama, Ipatinga-MG	25
Figura 3 – Dados coletados do bairro Jardim Panorama, Ipatinga-MG	28
Figura 4 – Dados de coordendas disponibilizados pelo aplicativo em extensão .kml	28
Figura 5 – Dados de coordendas disponibilizados pelo aplicativo em tabela	29
Figura 6 – Sistema Fuzzy	30
Figura 7 – Funções Eixo Y	31
Figura 8 – Funções Eixo Z	31
Figura 9 – Funções Eixo X	32
Figura 10 – Regras do Sistema	33
Figura 11 – Saída do Sistema	33
Figura 12 – Resultado Primeira Lombada Rua Pelotas	35
Figura 13 – Mapa Primeira Lombada Rua Pelotas	36
Figura 14 – Defuzificação Primeira Lombada Rua Pelotas	37
Figura 15 – Resultado Segunda Lombada Rua Pelotas	38
Figura 16 – Mapa Segunda Lombada Rua Pelotas	38
Figura 17 – Resultado Lombada Rua Serra do Mar	39
Figura 18 – Mapa Rua Serra do Mar	39
Figura 19 – Irregularidade Lombada Rua Serra do Mar	40
Figura 20 – Resultado Primeira Lombada Av. JK	40
Figura 21 – Mapa Primeira Lombada Av. JK	41
Figura 22 – Resultado Segunda Lombada Av. JK	41
Figura 23 – Mapa Segunda Lombada Av. JK	42
Figura 24 – Resultado Rua Serra Negra	42
Figura 25 – Mapa Rua Serra Negra	43
Figura 26 – Resultado Rua Serra Geral	43
Figura 27 – Mapa Rua Serra Geral	44
Figura 28 – Defuzificação Lombada Primeiro Trajeto Rua Pelotas	48
Figura 29 – Defuzificação Não Lombada Rua Pelotas	50

Lista de abreviaturas e siglas

GPS	Sistema de Posicionamento Global
GNSS	Sistema Global de Navegação por Satélite
RNA	Rede Neural Artificial
SVM	Máquina de Vetor de Suporte
CTB	Código de Trânsito Brasileiro
DER/PR	Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Problema	13
1.2	Justificativa	13
1.3	Objetivos	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Pavimentos e vias públicas	15
2.2	Acelerômetro	15
2.3	GPS	16
2.4	Lógica Fuzzy	16
2.4.1	Conjunto Fuzzy	17
2.4.2	Operações Básicas na Lógica Fuzzy	17
2.4.3	Funções de Pertinência	18
2.4.4	Fuzzificação	20
2.4.5	Inferência - Método Mamdani	20
2.4.6	Defuzzificação - Método pelo Centro de Gravidade	21
3	TRABALHOS RELACIONADOS	23
4	MATERIAIS E METÓDOS	25
5	DESENVOLVIMENTO	27
5.1	Experimento	27
5.1.1	Contextualização	27
5.1.2	Coleta de Dados	27
5.2	Ferramentas Computacionais	29
5.2.1	<i>Sensor Logger</i>	29
5.2.2	<i>InFuzzy</i>	29
5.3	Implementação do Modelo Matemático	30
5.3.1	Entradas do sistema	30
5.3.2	Regras do Sistema	32
5.3.3	Saída do Sistema	33
6	ESTUDOS DE CASO	35
6.1	Estudo de Caso: Rua Pelotas - Ipatinga/MG	35
6.2	Estudo de caso: Rua Serra do Mar - Ipatinga/MG	38
6.3	Estudo de caso: Avenida JK - Ipatinga/MG	40
6.4	Estudo de Caso: Rua Serra Negra - Ipatinga/MG	42
6.5	Estudo de Caso: Rua Serra Geral - Ipatinga/MG	43

7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
Anexo I		46
	REFERÊNCIAS	51

1 Introdução

“A tecnologia move o mundo”.

Steve Jobs

As sinalizações de trânsito são destinadas para orientar o trânsito, controlando e protegendo seus usuários. Para garantir sua assimilação é necessário que ela esteja empregada de maneira eficiente, precisa, clara e visível uniformemente (SILVA, 2017).

Em seus trabalhos, Silva (2017) e Renz (2015) compartilham do mesmo pensamento no qual é importante a presença de uma sinalização visando proteger as pessoas reduzindo os números de acidentes de trânsito.

A falta de sinalização, ou a má projeção desta, tem repercussão direta e imediata em um fator da circulação de veículos: os acidentes de trânsito. Dentro da engenharia de tráfego, este é considerado um problema de primeira magnitude, visto que envolve risco de vida (RENZ, 2015).

De acordo com dados retirados do site governamental da Polícia Rodoviária Federal, a ausência da sinalização, a deficiência do sistema de iluminação/sinalização ou sinalização mal posicionada são fatores expressivos e recorrentes de acidentes nas rodovias brasileiras.

Há muitos estudos da influência da tecnologia no trânsito. Seguindo estudo de Howard e Dai (2013), a tecnologia pode ser um bom caminho para a redução de acidentes no trânsito. Um exemplo de como a tecnologia pode beneficiar as pessoas são os carros autônomos que podem melhorar questões envolvendo a segurança no tráfego, congestionamento e o gasto de combustível (HOWARD, 2013). No entanto, seu custo ainda é um fator que limita sua aquisição em grande escala.

Atualmente, existem diversos aplicativos que auxiliam os motoristas na condução de seus veículos. Alguns são utilizados para abastecimento do veículo, para consulta de dados, para localizar pontos de estacionamentos, dentre outros. Os programas mais recorrentes pelos motoristas são relacionados ao Sistema de Posicionamento Global (GPS) onde o intuito é ajudá-los em suas rotas.

Com o desenvolvimento da tecnologia e o surgimento de empresas inovadoras, estes aplicativos estão evoluindo. Eles já são capazes de, além de demonstrar o percurso até o destino, exibem onde o trânsito está mais lento, pontos onde houve acidente recente, pontos onde há fiscalização eletrônica de velocidade entre outras funcionalidades que podem ser vistos dentro do mesmo dispositivo. Alguns deles conseguem até informar aos seus usuários se há buracos no trajeto. Ou seja, a contribuição vai muito além de apenas informar o motorista, mas o deixa preparado para evitar alguns tipos de acidentes.

1.1 Problema

A falta ou irregularidade na sinalização de lombadas é evidente (uma realidade) no Brasil. É comum encontrar sinalizações cobertas por vegetação, com estrutura danificada, sem iluminação adequada ou até mesmo ausentes. Essa situação pode resultar em acidentes ou quase acidentes gerando desde danos materiais como a danificação de objetos transportados ou do próprio veículo até consequências fatais.

A sinalização, seja ela vertical ou horizontal, é um importante fator de organização e segurança no trânsito (BRASIL, 2007). A falta de sinalização de lombadas acaba se tornando um problema no trânsito, visto que motoristas são pegos de surpresas nessa situação. Não há números oficiais divulgados sobre acidentes dentro das cidades referente a falta desse tipo de sinalização, mas é relevante que essa condição contribua para sua ocorrência.

Sendo assim, este trabalho busca responder à seguinte questão de pesquisa: é possível identificar e mapear lombadas utilizando ferramentas computacionais, a fim de oferecer assistência aos motoristas em casos de ausência de sinalização?

1.2 Justificativa

Ao observar as falhas nas sinalizações de trânsito e a falta da informação de um aviso de lombada em aplicativos utilizados por motoristas em seus trajetos, percebe-se o quão pode ser necessário o mapeamento de quebra-molas para evitar problemas que foram mencionados anteriormente.

Sabe-se que há maneiras de poder mapear as lombadas - como é mencionado na Revisão Bibliográfica - mas o intuito deste trabalho é cumprir com o objetivo da detecção de quebra-molas tendo como principal dispositivo um celular com um acelerômetro que marcará as acelerações no decorrer do caminho. Ou seja, um objeto popular e simples de se manusear.

1.3 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver um modelo baseado em logica fuzzy para identificar e mapear lombadas em vias urbanas utilizando dados de aceleração coletados por sensores de smartphones. Para alcançar o objetivo geral proposto, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

1. Coletar dados de vibração em vias públicas utilizando por meio do acelerômetro embutido em smartphones, com o objetivo de obter informações relevantes para a detecção de lombadas;
2. Implementar um modelo matemático baseado em lógica fuzzy, capaz de identificar padrões de vibração associados à presença de lombadas em trajetos urbanos;
3. Validar o sistema proposto realizando testes em diferentes trajetos urbanos e comparando os resultados com suas localizações reais;

4. Ilustrar os resultados em um mapa geográfico, destacando os trajetos percorridos e a localização das lombadas identificadas.

2 Referencial teórico

Esta seção demonstra conceitos fundamentais para o entendimento deste trabalho. São abordados conceitos necessários de pavimentos, vias públicas, sinalização e lombadas. Além disso, a compreensão da Primeira e Segunda Lei de Newton é crucial para entender o funcionamento do acelerômetro, responsável pela geração dos dados. Conceitos de GPS e Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) também são indispensáveis para este estudo.

2.1 Pavimentos e vias públicas

O pavimento de uma rodovia é uma grande estrutura composta por um sistema de camadas de espessuras finitas, nos quais estão apoiadas sobre um semi-espaço teoricamente infinito, chamada de subleito (IPR, 2006).

De acordo com o Artigo 2, Capítulo I - Disposições Preliminares - do CTB (1997a), vias públicas são vias que podem ser tanto terrestres urbanas quanto terrestres rurais. Assim, nelas se encaixam as estradas, rodovias e passagens por exemplo. Seu uso tem que ser regulamentado por algum órgão ou entidade com definições sobre elas.

Segundo Artigo 80, Capítulo VII - Da Sinalização de Trânsito - do CTB (1997b), uma via pavimentada só pode ser entregue após sua construção ou reaberta após obras caso estiver devidamente sinalizada tanto vertical quanto horizontalmente garantindo condições seguras em sua circulação.

Segundo Contran (2007), a sinalização vertical tem o objetivo de informar aos usuários das vias afim de que eles possam tomar comportamentos adequados, ordenando os fluxos de tráfegos e orientando os usuários de modo que aumente a segurança do ambiente. A sinalização horizontal tem intuito similar ao da vertical, mas, além disso ela pode ser uma sinalização que vai complementar os sinais verticais (BRASIL, 2007).

As lombadas, de acordo com o Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná - DER/PR (2018), são dispositivos físicos que ficam sobre o pavimento, possuem o objetivo de reduzir a velocidade dos veículos que passam nas vias aumentando a segurança dos usuários - motoristas e pedestres.

2.2 Acelerômetro

Segundo Rocha e Marranghello (2012), ao acoplar um acelerômetro a um corpo, é possível medir a aceleração do conjunto. Quando se tem a aceleração, é possível conseguir informações de diversas grandezas físicas da cinemática e da dinâmica, como velocidade, aceleração, força e tempo.

De acordo com Rocha e Marranghello (2012), os acelerômetros também podem ser

usados para medir a inclinação, rotação, vibração, colisão e propriedades do campo gravitacional. Desta forma, o acelerômetro pode ser empregado em inúmeras áreas para diversas atividades e estudos.

De acordo com a Primeira Lei de Newton: "Todo corpo permanece em repouso até que alguma força externa aja sobre ele", assim qualquer aceleração deve ser associada à ação de uma *força*. Com a Segunda Lei de Newton há a ideia de que multiplicando a massa de um corpo pela aceleração do mesmo, temos como resultado a força que esse corpo exerce. Desta forma, é possível calcular a força aplicada a um corpo com base em sua aceleração e massa (NUSSENZVEIG, 2013).

2.3 GPS

De acordo com Monico (2000), o GPS, desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos, é um sistema de radionavegação criado da fusão de outros dois sistemas de navegação: *Timation* e *System 621B*. Esse sistema global facilita diversas atividades que necessitam de posicionamento, tais como a agricultura, navegação e controle de frotas. Além disso, os satélites que estão em órbita estão distribuídos de uma forma que basta quatro satélites para que um usuário em qualquer lugar do planeta possa ser rastreado.

Por mais complexo que seja o desenvolvimento e de quais e quantos componentes são necessários para que funcione, o GPS é uma tecnologia presente em diversos dispositivos podendo ser tecnologias exclusivas para essa funcionalidade ou tecnologias de uso popular tais como celulares e relógios.

2.4 Lógica Fuzzy

Proposta por Zadeh (1965), a lógica fuzzy é uma ferramenta preciosa para tomar decisões em sistemas onde há incerteza ou com variáveis onde seus valores não são absolutos. Diferentemente dos conceitos binários onde se utiliza os valores 0 ou 1, a lógica fuzzy permite trabalhar com modelagem de variáveis linguísticas como "alto", "médio" e "baixo" com valores fluando entre 0 e 1. Essa capacidade de lidar com imprecisões torna a lógica fuzzy ideal para este estudo, no qual a coleta de dados nos veículos pode apresentar variações imprecisas. (ALMEIDA, 2020)

No contexto da detecção de lombadas, a lógica fuzzy pode ser empregada para interpretar os dados do acelerômetro de maneira mais inteligente e flexível. Em vez de simplesmente identificar uma variação acentuada como uma lombada, a lógica fuzzy permite a criação de regras que consideram diferentes níveis de aceleração e padrões específicos de variação, possibilitando distinção entre lombadas e irregularidades na estrada (OLIVEIRA, 2021).

De acordo com Ferreira e Souza (2021), um sistema com lógica fuzzy é capaz de interpretar variações complexas na aceleração do veículo, podendo classificá-las de forma precisa como "lombada", "desnível" ou "irregularidade moderada". Isso é feito através de um conjunto de regras fuzzy que utiliza variáveis detectadas pelo acelerômetro para inferir o tipo

de obstáculo encontrado.

2.4.1 Conjunto Fuzzy

Um conjunto fuzzy A em um universo de discurso X é definido por uma função de pertinência $\mu_A(x)$, que atribui a cada elemento x de X um grau de pertinência ao conjunto A . Esse conjunto é representado na equação 2.1:

$$\mu_A : X \rightarrow [0, 1] \quad (2.1)$$

Onde:

- X é o universo de discurso, ou seja, o conjunto de todos os elementos possíveis.
- $\mu_A(x)$ é o grau de pertinência do elemento x ao conjunto fuzzy A , com valores entre 0 (não pertencente) e 1 (pertencente completamente).

2.4.2 Operações Básicas na Lógica Fuzzy

Na lógica fuzzy, a operação *AND* (interseção) é interpretada como a interseção entre dois conjuntos fuzzy, retornando o valor mínimo entre os graus de pertinência dos elementos. A função de pertinência resultante da operação *AND* é expressa pela equação 2.2:

$$\mu_{A \wedge B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (2.2)$$

Onde:

- $\mu_A(x)$ e $\mu_B(x)$ são as funções de pertinência dos conjuntos fuzzy A e B (KLIR; YUAN, 1995).
- $\mu_{A \wedge B}(x)$ é o grau de pertinência do valor x no conjunto resultante da operação *AND*.

Essa operação é amplamente utilizada em sistemas de controle fuzzy para lidar com múltiplas condições. No contexto da detecção de lombadas, uma regra fuzzy pode ser formulada da seguinte maneira: Se a vibração é "Alta" *AND* a velocidade é "Baixa", então a possibilidade de lombada é "Alta". Neste caso, a operação *AND* seleciona o menor valor entre os graus de pertinência da vibração e da velocidade para determinar a possibilidade de detecção de uma lombada.

A operação *OR* (união) em lógica fuzzy retorna o valor máximo entre os graus de pertinência dos conjuntos fuzzy. A função de pertinência da operação *OR* representada pela equação 2.3 é dada por:

$$\mu_{A \vee B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (2.3)$$

Onde:

- $\mu_A(x)$ e $\mu_B(x)$ são as funções de pertinência dos conjuntos fuzzy A e B (KLIR; YUAN, 1995).
- $\mu_{A \vee B}(x)$ é o grau de pertinência do valor x no conjunto resultante da operação OR .

Essa operação é útil quando qualquer uma das condições pode ser suficiente para desencadear a saída desejada. Por exemplo, uma regra fuzzy para detecção de lombadas poderia ser: Se a vibração é "Alta" OR a velocidade é "Média", então a possibilidade de lombada é "Média". Neste caso, a operação OR retornará o valor máximo entre os graus de verdade das variáveis de vibração e velocidade.

A operação NOT (complemento) inverte o grau de pertinência de um conjunto fuzzy, representando o complemento do conjunto. Sua função de pertinência é demonstrada na equação 2.4:

$$\mu_{\neg A}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (2.4)$$

Onde:

- $\mu_A(x)$ é a função de pertinência do conjunto fuzzy A .
- $\mu_{\neg A}(x)$ é o grau de pertinência do valor x no conjunto complementar A (ROSS, 2010).

No caso da detecção de lombadas, a operação NOT poderia ser aplicada em regras como: Se a vibração não é "Alta", então a possibilidade de lombada é "Baixa". Isso reflete a inversão da condição de entrada para uma decisão alternativa.

2.4.3 Funções de Pertinência

A função de pertinência é um dos conceitos fundamentais da lógica fuzzy, pois define como os elementos de um universo de discurso são classificados dentro de um conjunto fuzzy. Existem diversas formas de modelar uma função de pertinência, sendo as mais comuns as funções triangulares, trapezoidais e gaussianas (ROSS, 2010).

A função rampa é utilizada na lógica fuzzy para representar variáveis que podem crescer ou decrescer de forma gradual sem possuir uma zona de estabilidade. Existem dois tipos de função rampa: esquerda e direita.

A função rampa esquerda é caracterizada por uma pertinência que diminui de forma linear de 1 até 0. Ela é útil para modelar situações onde uma variável fuzzy decresce gradualmente até não conseguir influenciar mais o sistema. A equação 2.5 define matematicamente o seu comportamento, onde (a) é o limite inferior e a pertinência é máxima e (b) é o ponto onde a pertinência atinge valor de zero.

$$\mu_{\text{esquerda}}(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x \leq a \\ \frac{b-x}{b-a}, & \text{se } a < x \leq b \\ 0, & \text{se } x > b \end{cases} \quad (2.5)$$

A função rampa direita é o oposto da rampa esquerda. A pertinência começa do 0 e cresce de forma linear até 1. A equação 2.6 define matematicamente o seu comportamento, no qual (a) é o limite inferior e a pertinência é zero e (b) é o ponto onde a pertinência atinge valor máximo.

$$\mu_{\text{direita}}(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{se } a < x \leq b \\ 1, & \text{se } x > b \end{cases} \quad (2.6)$$

A função triangular é amplamente utilizada devido à sua simplicidade e eficiência computacional. Ela é definida por três parâmetros (a, b, c) , onde a e c são os limites inferiores e superiores, respectivamente, e b é o ponto em que a pertinência atinge o valor máximo 1. A equação da função triangular demonstrada na equação 2.7 é dada por:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \text{ ou } x \geq c, \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{se } a \leq x \leq b, \\ \frac{c-x}{c-b} & \text{se } b \leq x \leq c. \end{cases} \quad (2.7)$$

A função retangular, representada na equação 2.8, é utilizada quando se deseja definir uma área de pertinência constante em que todos os elementos dentro de um intervalo possuem pertinência máxima (1) e os elementos fora desse intervalo possuem pertinência mínima (0). A função retangular é definida pelos limites a e b , como:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \text{ ou } x \geq b, \\ 1 & \text{se } a < x < b. \end{cases} \quad (2.8)$$

Essa função é útil quando se deseja representar uma faixa de valores uniformemente relevantes, sem transições graduais, como em uma "vibração moderada" que permanece constante dentro de um intervalo bem definido (ROSS, 2010).

A função trapezoidal, descrita na equação 2.9, é uma generalização da função triangular, sendo caracterizada por quatro parâmetros (a, b, c, d) . Nessa função, a e d representam os limites inferior e superior, respectivamente, enquanto b e c determinam a região de pertinência máxima, que é constante e igual a 1. A equação da função trapezoidal é expressa como:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \text{ ou } x \geq d, \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{se } a \leq x \leq b, \\ 1 & \text{se } b \leq x \leq c, \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{se } c \leq x \leq d. \end{cases} \quad (2.9)$$

Essa função é frequentemente utilizada quando existe uma faixa de valores com pertinência máxima, permitindo uma modelagem mais flexível de situações como "vibração média-alta".

A função gaussiana, demonstrada na equação 2.10, é ideal para modelar transições suaves e contínuas. Ela é definida por dois parâmetros: c , que representa o valor central da função (onde a pertinência é máxima), e σ , o desvio padrão que controla a largura da função. A equação é dada por:

$$\mu_A(x) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.10)$$

Por ser uma função suave e contínua, a função gaussiana é útil quando se deseja evitar transições abruptas nos valores de pertinência (KLIR; YUAN, 1995).

2.4.4 Fuzzificação

A fuzzificação é a primeira etapa do processo em sistemas de lógica fuzzy, responsável por transformar os valores nítidos (crisp) das entradas em graus de pertinência associados a conjuntos fuzzy. Essa transformação é realizada com base em funções de pertinência, que mapeiam as entradas para um intervalo contínuo de $[0, 1]$. O principal objetivo da fuzzificação é permitir que os dados numéricos sejam interpretados de maneira aproximada, representando a incerteza e as transições graduais entre os estados (ROSS, 2010).

A importância da fuzzificação reside na sua capacidade de preparar os dados para que as regras fuzzy possam ser aplicadas. Sem essa etapa, o sistema não seria capaz de processar entradas contínuas ou ambíguas de maneira eficiente. A fuzzificação permite que os sistemas fuzzy sejam altamente adaptáveis, especialmente em aplicações que envolvem dados imprecisos, como controle automotivo, diagnósticos médicos ou sistemas de monitoramento. Essa abordagem garante que pequenas variações nos valores de entrada não resultem em mudanças bruscas nas saídas, tornando o sistema mais robusto e tolerante a incertezas (KLIR; YUAN, 1995).

2.4.5 Inferência - Método Mamdani

O processo de inferência fuzzy é responsável por interpretar as regras fuzzy definidas no sistema e gerar uma saída difusa, levando em conta os graus de pertinência das variáveis de entrada. Este processo é uma etapa fundamental em um sistema de lógica fuzzy, pois transforma as variáveis linguísticas de entrada em uma saída que reflete a combinação dessas variáveis conforme definido na base de regras fuzzy (ROSS, 2010).

A inferência fuzzy utiliza regras do tipo "Se-Então", que podem combinar múltiplas condições com operadores lógicos fuzzy, como AND e OR. Durante o processo de inferência, as funções de pertinência das variáveis de entrada são combinadas com as regras fuzzy utilizando métodos como o de Mamdani. O método de Mamdani é um dos mais comuns e adequados para aplicações que envolvem interpretação de variáveis linguísticas. Este método avalia as regras e produz uma saída fuzzy composta, que representa as conclusões geradas pelo conjunto de regras (JANG; SUN; MIZUTANI, 1997).

O processo de inferência no método de Mamdani é realizado em três etapas:

- **Aplicação das Regras Fuzzy:** As funções de pertinência das variáveis de entrada são combinadas de acordo com as regras do sistema.
- **Agregação:** As saídas de todas as regras são combinadas para formar uma única saída fuzzy.
- **Defuzzificação:** A saída agregada é então convertida em um valor nítido para ser interpretado pelo sistema.

A inferência fuzzy permite que o sistema lide com informações imprecisas e variáveis contínuas, proporcionando uma análise adaptativa das condições de vibração (KLIR; YUAN, 1995).

2.4.6 Defuzzificação - Método pelo Centro de Gravidade

De acordo com Ross (2010), a defuzzificação é a etapa em sistemas de lógica fuzzy responsável por converter uma saída difusa em um valor nítido, permitindo que o sistema forneça uma resposta única e interpretável para fins de controle ou tomada de decisão. Um dos métodos de defuzzificação mais comuns é o método do Centro de Gravidade, também conhecido como Centróide. Este método calcula o ponto de equilíbrio da área sob a curva da função de pertinência da saída fuzzy, produzindo assim um valor que representa a média ponderada de todas as possibilidades contidas na saída difusa. Matematicamente, o centro de gravidade z^* é definido como:

$$z^* = \frac{\int z \cdot \mu(z) dz}{\int \mu(z) dz} \quad (2.11)$$

onde:

- z representa os valores da variável de saída;
- $\mu(z)$ é o grau de pertinência para cada valor z na saída difusa;
- $\int$ indica a integração sobre todos os valores possíveis de z .

Este método determina o ponto onde o peso da função de pertinência é equilibrado, fornecendo uma estimativa central da saída fuzzy, além de oferecer uma forma robusta e prá-

tica de transformar uma saída difusa em um valor nítido e aplicável (KLIR; YUAN, 1995; JANG; SUN; MIZUTANI, 1997).

3 Trabalhos Relacionados

Vários trabalhos abordaram temas e situações semelhantes a este, diferenciando-se nos objetivos e no referencial teórico adotado. A seguir, são descritos alguns desses trabalhos, destacando suas semelhanças e diferenças.

No trabalho desenvolvido por Hollerweger (2019), fez-se o uso da aplicação de visão computacional para auxiliar no levantamento de defeitos em pavimentos rodoviários. O autor utilizou conceitos de inteligência artificial, tais como Redes Neurais e Deep Learning como principal método para a identificação de defeitos.

No entanto, o uso de imagens de rodovias introduziu interferências nos resultados, causadas por fatores geográficos e até climáticos, o que prejudicou a precisão. Além disso, o tempo de processamento se mostrou um obstáculo para a execução do algoritmo em tempo real.

No estudo desenvolvido por Comunello et al. (2021), o objetivo foi a detecção de buracos em pavimento asfáltico com base no processamento de imagens e Deep Learning. No entanto, o estudo enfrentou o mesmo desafio do trabalho anterior: condições climáticas e geográficas das imagens influenciavam no resultado. Além disso, as técnicas utilizadas apresentaram como limitação o elevado tempo de processamento. Outro obstáculo encontrados pelos autores foi que, ao utilizarem imagens para a identificação de buracos, o redimensionamento das mesmas comprometeu o reconhecimento preciso, levando a detalhes sutis serem erroneamente identificados como buracos, o que aumentou a ocorrência de falsos positivos.

No trabalho de Schmidt (2020), o objetivo foi automatizar o reconhecimento de buracos em rodovias por meio de inteligência computacional. Foram aplicados conceitos de aprendizado de máquina, com grande ênfase no uso de Redes Neurais, onde a Rede Neural Artificial (RNA) e A Máquina de Vetor de Suporte (SVM) serviram como suporte para a detecção de buracos no processamento de imagens.

Mais uma vez é observado uma limitação no que diz respeito ao tempo de processamento. O autor relata nos resultados que a utilização do SVM apresentou melhores resultados enquanto que a escolha pelo RNA trouxe menos processamento de dados ocasionando uma vantagem no quesito de armazenamento.

No trabalho realizado por Monteiro et al. (2013), foi utilizado o Arduino Mega 2560 acoplado a um veículo onde o objetivo é detectar buracos em estradas de acordo com a variação da aceleração realizado no momento onde o meio de transporte passava no buraco. Resumidamente, a estrutura do software era: primeiro acontecia a comunicação entre arduino e a tecnologia Java, depois as entradas eram interpretadas passando por um algoritmo onde os buracos eram detectados.

Foi previsto o experimento em um carrinho de controle remoto, porém os autores notaram que seria inviável já que seria necessário a replicação do cenário em escalas menores,

além da difícil tarefa de acoplar o arduino neste cenário. Então decidiram fazer o cenário utilizando uma bicicleta. Como o arduino estava acoplado numa bicicleta, o resultado acabou não sendo preciso de acordo com as variações dos amortecedores das bicicletas e de uma deficiência do algoritmo em reconhecer que o sistema se encontrava em declive, por exemplo.

No trabalho realizado por Kamigashima (2018), além de coletar dados de potenciais buracos, ele se preocupou em disponibilizar os mesmos com suas respectivas localizações. Para isso, fez o uso do arduino com conceitos de aceleração tendo um importante papel na resolução do problema. Além disso, utilizou web service para armazenamento dos dados que são disponibilizados.

O autor encontrou limitações ocasionando o não reconhecimento de buracos num intervalo inferior a dez segundos após passar por um. Outro ponto importante é que não houve opções de retirar os buracos do sistema criado, sendo este um ponto de melhoria já que o buraco pode ser reparado.

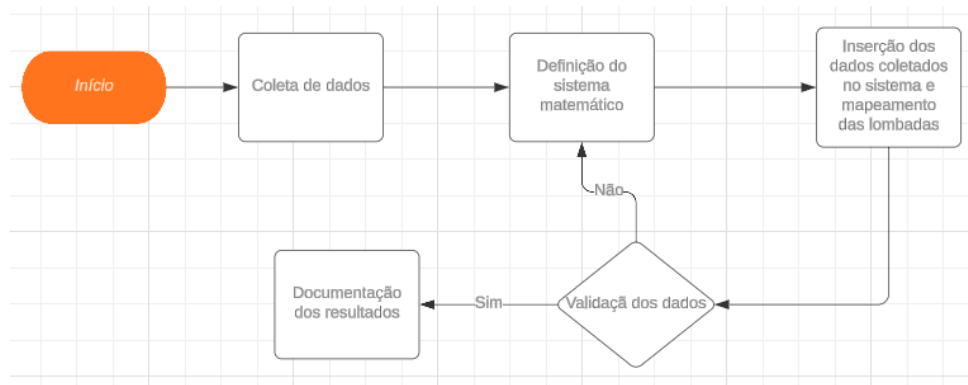
Com os trabalhos descritos, observa-se que existem pontos de atenção com o uso de imagens ou de visão computacional, já que o tempo de execução para a detecção é um grande fator. Este trabalho utilizará apenas o acelerômetro para a identificação de lombadas, nas quais serão mapeadas.

4 Materiais e Métodos

A presente pesquisa é de caráter exploratória no que diz respeito ao quesito de objetivos. Segundo Piovesan e Tenporini (1995), o estudo exploratório consegue ajudar a resolver algumas dificuldades durante a pesquisa. Assim, este tipo de pesquisa ajudará a entender conceitos teóricos sobre o tema.

Conforme ilustrado na Figura 1, o diagrama a seguir representa o processo de desenvolvimento do sistema matemático, análise e validação dos dados.

Figura 1 – Diagrama do procedimento metodológico



Fonte: elaborada pelo autor

A Figura 2 mostra um mapa onde os dados serão coletados, nela há algumas ruas e a Avenida do bairro Jardim Panorama, Ipatinga-MG nos quais os trajetos serão definidos para o experimento do presente estudo.

Figura 2 – Mapa do bairro Jardim Panorama, Ipatinga-MG



Fonte: elaborada pelo autor

Abaixo está a descrição de cada passo representado pela Figura 1:

- Coleta de dados: para a coleta de dados ocorrer, foi utilizado um carro de passeio e um smartphone com o aplicativo *Sensor Logger*¹ instalado. Ao passar por trajetos planejados, o aplicativo é acionado até o ponto final do trajeto. Desta forma, os dados são coletados. Os dados utilizados no estudo estão disponíveis no link <https://bit.ly/3WMwst0>.
- Definição do sistema matemático: desenvolvimento do sistema fuzzy no software *In-Fuzzy*².
- Inserção dos dados no sistema e mapeamento das lombadas: os dados coletados são inseridos no sistema fuzzy e através da saída do sistema, é mapeado o local em um mapa destacando o trajeto realizado junto com as lombadas identificadas.
- Validação dos dados: os dados da saída do sistema e do mapeamento são comparados com os dados reais. Para isso, é necessário realizar o trajeto novamente comparando o mapa gerado na etapa anterior e verificando se a lombada destaca no mapa está no local fisicamente. Quando necessário, o sistema matemático foi ajustado para assegurar a validade dos dados.
- Documentação dos resultados: os resultados são apresentados juntamente com o mapa contendo as lombadas.

¹ Mais informações em: <<https://www.tszheichoi.com/sensorlogger>>

² Mais informações em: <<https://www.unisc.br/sites/nitt/tecnologia/infuzzy/>>

5 Desenvolvimento

5.1 Experimento

5.1.1 Contextualização

O experimento consiste na coleta de dados de vibração utilizando um acelerômetro presente em um smartphone. O acelerômetro foi configurado por meio de um aplicativo específico e posicionado dentro de um veículo, que foi conduzido sobre diferentes tipos de terreno, incluindo superfícies lisas e lombadas. O objetivo principal é detectar as vibrações geradas ao passar sobre lombadas e, posteriormente, aplicar a lógica fuzzy para identificar automaticamente a presença dessas estruturas.

5.1.2 Coleta de Dados

A coleta de dados foi realizada utilizando um acelerômetro embutido em um smartphone, através do aplicativo *Sensor Logger*, que permite capturar dados de vibração em tempo real. Os dados coletados foram processados e analisados utilizando o software *InFuzzy*, que possibilita a implementação da lógica fuzzy.

Para a coleta de dados, foi necessário a utilização de:

- Um carro de passeio comum para realizar as coletas de dados de vibração.
- Um smartphone com sensor de acelerômetro embutido, rodando um aplicativo capaz de registrar as leituras de aceleração em tempo real.
- O aplicativo *Sensor Logger* para captar e gravar tanto a localização do veículo quanto os dados de aceleração nas três direções x , y e z enquanto o veículo está em movimento.

O acelerômetro foi configurado para registrar as seguintes variáveis:

- Aceleração em m/s^2 nos x , y e z .
- Frequência de amostragem: 1s

Cada percurso foi repetido várias vezes para garantir a consistência dos dados. A coleta de dados foi realizada em um percurso previamente planejado que incluía superfícies planas sem obstáculos e trechos com lombadas.

O smartphone foi fixado de forma estável no interior do veículo, assegurando que as vibrações registradas pelo acelerômetro sejam representativas exclusivamente do movimento do veículo.

Durante o trajeto, o acelerômetro registrou as acelerações nos três eixos, e os dados foram armazenados para análise. A Figura 3 ilustra um pouco do que foi coletado pelo celular.

A coluna "time" representa o tempo de cada registro coletado. A coluna "seconds_elapsed" representa o exato segundo onde o registro foi coletado após ativar o aplicativo. As colunas "z", "y" e "x" representam respectivamente a aceleração nos eixos z, y e x.

Figura 3 – Dados coletados do bairro Jardim Panorama, Ipatinga-MG

time	seconds_elapsed	z	y	x
1729974447644704300	0,0277043457	0	0	0
1729974447654267600	0,03726757813	0,1037817001	0,04635477066	0,3687055111
1729974447663831000	0,04683105469	-0,1001768112	0,3231112957	-0,03820204735
1729974447673394700	0,05639477539	0,1363716125	0,1776331663	0,2366346717
1729974447682958300	0,06595825195	0,1776866913	-0,303129077	-0,1399264932
1729974447692521700	0,07552172852	0,2038393021	0,2220907211	-0,6230983138
1729974447702085000	0,08508520508	0,1375160217	0,07550835609	0,6053002477
1729974447711648800	0,09464868164	-0,2275848389	-0,2975230217	-0,5806575418
1729974447721212200	0,1042121582	0,4777860641	-0,2816038132	0,5643625855
1729974447730775800	0,1137758789	-0,272687912	0,1293699741	-0,4159119725

Fonte: elaborada pelo autor

As Figuras 4 e 5 representam respectivamente uma parte do que o aplicativo *Sensor-Logger* disponibilizou no que diz respeito aos arquivos de extensão *.kml* com as coordenadas da localização.

Figura 4 – Dados de coordenadas disponibilizados pelo aplicativo em extensão *.kml*

```
<name>Sensor Logger</name>
<Folder>
  <name>Route</name>
  <Placemark>
    <TimeStamp>
      <when>1730304011483000000</when>
    </TimeStamp>
    <Point>
      <altitudeMode>absolute</altitudeMode>
      <coordinates>-42.543334,-19.4644306,232.8000030517578</coordinates>
    </Point>
  </Placemark>
  <Placemark>
    <TimeStamp>
      <when>1730304012697468000</when>
    </TimeStamp>
    <Point>
      <altitudeMode>absolute</altitudeMode>
      <coordinates>-42.5433094,-19.4642926,232.8000030517578</coordinates>
    </Point>
  </Placemark>
</Folder>
```

Fonte: elaborada pelo autor

Figura 5 – Dados de coordenadas disponibilizados pelo aplicativo em tabela

time	# seconds_elapsed	# bearingAccuracy	# speedAccuracy	# verticalAccuracy	# horizontalAccuracy	# speed	# bearing	# altitude	# longitude	# latitude
1730304014696974300	3,390974365	0,428576678	0,04683012888	1,028157473	9,984000206	7,008599281	21,963871	232,8000031	-42,5433008	-19,4642209
1730304015696489500	4,390489502	0,4397712946	0,05363504216	1,038169146	8,744999886	7,824445724	36,93135452	232,8000031	-42,5432626	-19,4641657
1730304016696321800	5,390321777	0,6556823254	0,0768199414	1,048207283	5,103000164	7,521821976	47,88254929	232,8000031	-42,5432112	-19,4641185
1730304017696113000	6,390112793	1,013024211	0,1055180356	1,058163285	4,883999825	6,705747128	50,93006134	232,8000031	-42,5431594	-19,4640808
1730304018697036500	7,391036621	1,356224179	0,1180823669	1,067973733	3,789999962	5,625729561	54,87496948	232,8000031	-42,5431154	-19,4640447
17303040196966599800	8,390599854	1,126947045	0,09067545831	1,078260541	3,789999962	5,175309658	66,8046875	232,8000031	-42,5430719	-19,4640249
1730304020696330200	9,390330322	0,6914507151	0,05190866813	1,088154435	3,789999962	4,821552277	66,00313568	232,8000031	-42,5430276	-19,4640068
1730304021696351200	10,39035132	1,432564139	0,1199085563	1,09796679	3,789999962	5,379765987	48,00461578	232,8000031	-42,542987	-19,4639798
1730304022696323300	11,39032324	1,617735386	0,1304018646	1,010616779	3,789999962	5,179965973	25,00825691	233,3000031	-42,542962	-19,4639419
1730304023696330000	12,39033008	0,8073278069	0,05468439311	1,020648718	3,789999962	4,350004196	355,0022583	233,3000031	-42,5429597	-19,463902
1730304024696625000	13,390625	0,6851713061	0,05841116235	1,030685663	3,789999962	5,469899654	333,0012817	233,3000031	-42,5429719	-19,4638611
1730304025696172000	14,39017212	4,757939339	1,004006863	1,040642619	3,789999962	5,361170769	320,1363525	233,3000031	-42,5429998	-19,4638183

Fonte: elaborada pelo autor

5.2 Ferramentas Computacionais

5.2.1 Sensor Logger

Sensor Logger é um aplicativo utilizado para registrar e monitorar dados de vários sensores presentes em um smartphone, como acelerômetro, giroscópio, magnetômetro, entre outros. Ele permite a coleta de dados em tempo real e a exportação desses dados para análise. Abaixo estão algumas funcionalidades do aplicativo:

- Coleta de dados de múltiplos sensores: Acelerômetro, giroscópio, sensor de proximidade, etc.
- Visualização em tempo real: Disponível para visualizar os dados dos sensores durante coleta de dados.
- Exportação de dados: Os dados podem ser exportados em formatos como CSV, facilitando a análise posterior em softwares como *Excel*, *Python* ou *MATLAB*.
- Configuração da taxa de amostragem: É possível definir a frequência de amostragem dos dados, controlando a precisão e a quantidade de dados coletados.

5.2.2 InFuzzy

O *InFuzzy* é um software utilizado para desenvolver e implementar sistemas de controle baseados em lógica fuzzy. Projetado para simplificar o processo de modelagem e análise de sistemas incertos, ele é especialmente útil em áreas como engenharia, automação, e sistemas de tomada de decisão. O software possui as seguintes características:

- Interface gráfica intuitiva: Permite a criação de sistemas fuzzy através de diagramas, facilitando a visualização de regras fuzzy, dos conjuntos fuzzy e das funções de pertinência.
- Criação de variáveis linguísticas: Permite definir variáveis de entrada (como vibração detectada) e variáveis de saída (como presença de lombada) e associá-las a conjuntos fuzzy.

- Definição de funções de pertinência: Possibilita a criação de diferentes tipos de funções de pertinência (triangulares, trapezoidais, gaussianas), essenciais para modelar incertezas em dados, como as vibrações captadas por acelerômetros.
- Regras fuzzy: Facilita a criação de regras fuzzy do tipo "Se-Então", permitindo modelar lógicas mais complexas de tomada de decisão.
- Simulação e validação: Após a criação do sistema fuzzy, é possível simular o comportamento do sistema e testar a eficiência das regras definidas.

Dessa forma, toda a regra contida no conjunto fuzzy foi definido no software que recebeu os dados coletados pelo Sensor Logger que é capaz de fornecer na saída um valor para informar se a vibração é ou não uma lombada.

5.3 Implementação do Modelo Matemático

O sistema Fuzzy foi criado no software InFuzzy conforme a Figura 6. Os dados de entrada (aceleração dos eixos x, y e z) estão representados pela cor verde nas caixas com os textos "EixoX", "EixoY" e "EixoZ". As regras foram definidas e na caixa amarela de texto "RegrasLombada". E a saída do sistema foi representada pela caixa vermelha de texto "Lombada".

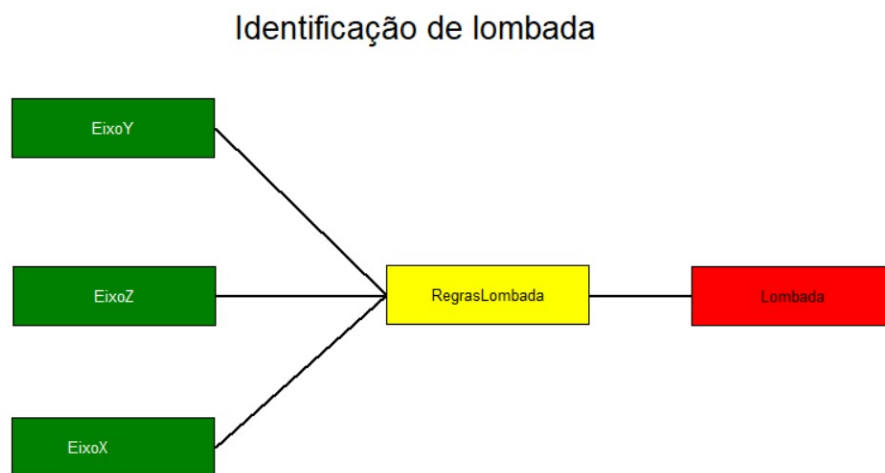


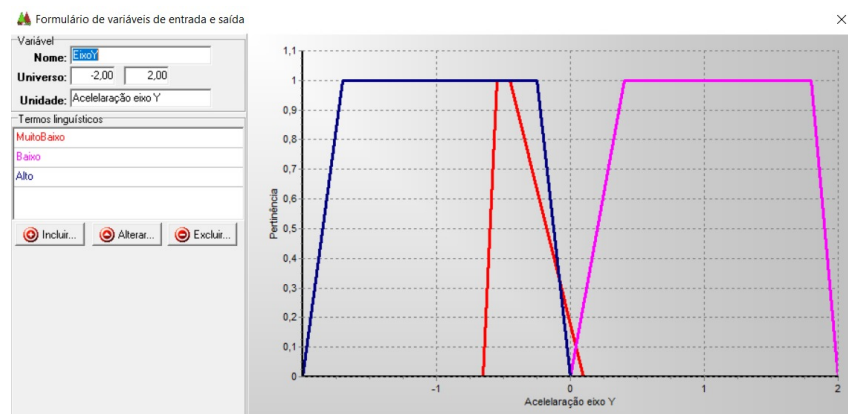
Figura 6 – Sistema Fuzzy

Fonte: elaborada pelo autor

5.3.1 Entradas do sistema

Para os dados de entrada referente ao Eixo Y, foram definidas as métricas "Muito-Baixo", "Baixo" e "Alto" utilizando a função trapézio conforme a Figura 7.

Figura 7 – Funções Eixo Y



Fonte: elaborada pelo autor

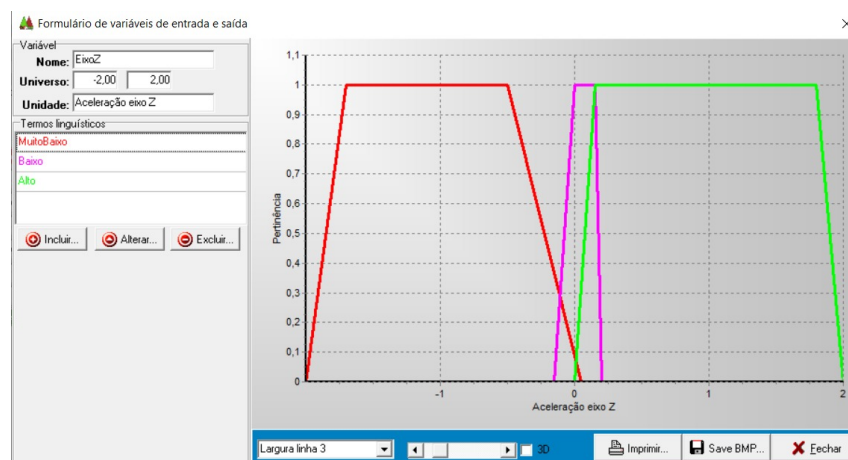
A Tabela 1 exibe a configuração utilizada para os dados do Eixo Y. A função trapézio foi utilizada para representar os três termos linguísticos (métricas).

Tabela 1 – Função eixo Y

Termo Linguístico	Função	Valor de A	Valor de B	Valor de C	Valor de D
MuitoBaixo	Trapézio	-0,65	-0,55	-0,45	0,10
Baixo	Trapézio	0,00	0,40	1,80	2,00
Alto	Trapézio	-2,00	-1,70	-0,25	0,00

Para os dados de entrada referente ao Eixo Z, assim como ocorreu com o Eixo Y, foram definidas as métricas "MuitoBaixo", "Baixo" e "Alto" utilizando a função trapézio conforme a Figura 8.

Figura 8 – Funções Eixo Z



Fonte: elaborada pelo autor

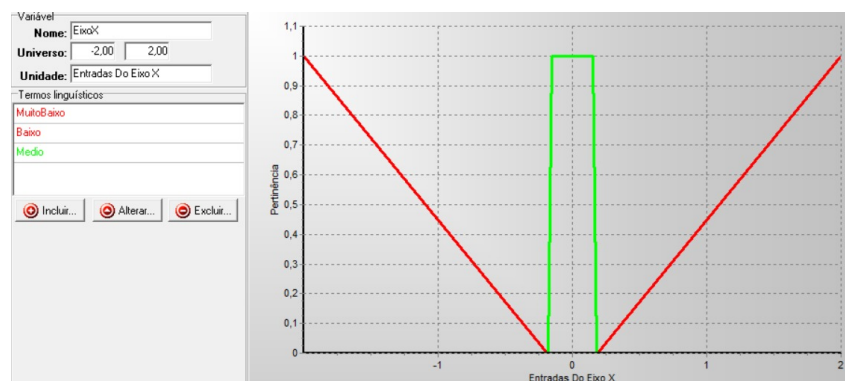
A Tabela 2 exibe a configuração utilizada para os dados do Eixo Z. Assim como no eixo Y, a função trapézio foi utilizada para representar os três termos linguísticos.

Tabela 2 – Função eixo Z

Termo Linguístico	Função	Valor de A	Valor de B	Valor de C	Valor de D
MuitoBaixo	Trapézio	-2,00	-1,70	-0,50	0,05
Baixo	Trapézio	-0,15	0,00	0,15	0,20
Alto	Trapézio	0,00	0,15	1,80	2,00

Para os dados de entrada referente ao Eixo X, foram definidas as métricas "Muito-Baixo", "Baixo" e "Medio" utilizando as funções rampa direita, rampa esquerda e trapézio conforme a Figura 9.

Figura 9 – Funções Eixo X



Fonte: elaborada pelo autor

Diferentemente dos Eixos Y e Z que utilizaram apenas a função trapézio, no Eixo X foram utilizadas as funções rampa esquerda e rampa direita além da trapézio. De acordo com a Tabela 3 é possível verificar a configuração exata do Eixo X:

Tabela 3 – Função eixo X

Termo Linguístico	Função	Valor de A	Valor de B	Valor de C	Valor de D
MuitoBaixo	Rampa Esquerda	-2,00	-0,19	-	-
Baixo	Rampa Direita	0,19	2,00	-	-
Médio	Trapézio	-0,18	-0,15	0,15	0,18

5.3.2 Regras do Sistema

As regras foram definidas com base na combinação dos eixos X, Y e Z utilizando a porta lógica AND conforme a Figura 10. Foi determinado quatro métricas resultados de acordo com as combinações sendo eles "Alto", "Médio", "Baixo" e "MuitoBaixo" que ditam a possibilidade das vibrações analisadas serem ou não uma lombada.

Figura 10 – Regras do Sistema

Definições
Nome do Bloco Regras: RegrasLombada

Criar Regras Fuzzy

Antecedentes (SE)

EixoY: ☐ Não
EixoZ: ☐ Não
EixoX: ☐ Não

Consequentes (ENTÃO)

Lombada: ☐ Não

Conexão

☒ AND
☐ OR

+ Adicionar Regra **✎ Editar Regra**

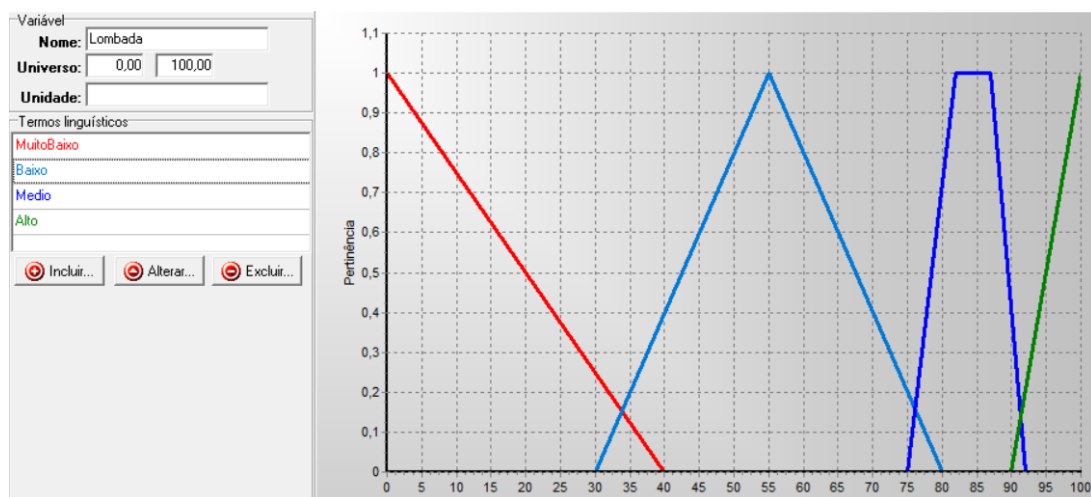
Nº	Se	Antecedentes	Então	Consequentes
1	Se	(EixoY = Alto) AND (EixoZ = Baixo)	Então	(Lombada = Medio)
2	Se	(EixoY = Alto) AND (EixoZ = MuitoBaixo)	Então	(Lombada = Baixo)
3	Se	(EixoY = Baixo) AND (EixoZ = Alto)	Então	(Lombada = Medio)
4	Se	(EixoY = Baixo) AND (EixoZ = Baixo)	Então	(Lombada = Baixo)
5	Se	(EixoY = Baixo) AND (EixoZ = MuitoBaixo)	Então	(Lombada = MuitoBaixo)
6	Se	(EixoY = MuitoBaixo) AND (EixoZ = Alto)	Então	(Lombada = Baixo)
7	Se	(EixoY = MuitoBaixo) AND (EixoZ = Baixo)	Então	(Lombada = MuitoBaixo)
8	Se	(EixoY = MuitoBaixo) AND (EixoZ = MuitoBaixo)	Então	(Lombada = MuitoBaixo)
9	Se	(EixoY = Alto) AND (EixoZ = Alto) AND (EixoX = Medio)	Então	(Lombada = Alto)

Fonte: elaborada pelo autor

5.3.3 Saída do Sistema

A saída do sistema foi realizada conforme é apresentando na Figura 11. As métricas informadas na Seção anterior estão descritas abaixo.

Figura 11 – Saída do Sistema



Fonte: elaborada pelo autor

As métricas de saída foram construídas utilizando diferentes funções de pertinência para classificar os resultados e identificar a presença de lombada:

- MuitoBaixo: foi construído utilizando a função rampa esquerda iniciando com o maior

grau de pertinência quando o resultado é 0 e finalizando quando o resultado é 40. Essa métrica significa que as chances do veículo ter passado sobre uma lombada é muito baixo.

- Baixo: foi utilizada a função triangular onde o grau de pertinência máxima está localizada quando o resultado é 55, ela inicia-se no resultado 30 e finaliza no 80. Quando o resultado apontar para essa métrica, indica que a chance de ter por uma lombada é baixa.
- Medio: foi implementada utilizando a função retangular, ela inicia-se no resultado 75 e finaliza no 92 sendo que entre os resultados 82 e 87 o grau de pertinência está no máximo. Quando o resultado apontar esta métrica, embora haja uma possibilidade de ser uma lombada, não é a métrica mais indicada para apontar a lombada.
- Alto: foi construído utilizando a função rampa direita iniciando com o menor grau de pertinência quando o resultado é noventa, a rampa é finalizada com o maior grau de pertinência quando o resultado é 100. Esta métrica é a mais indicada para identificação da lombada.

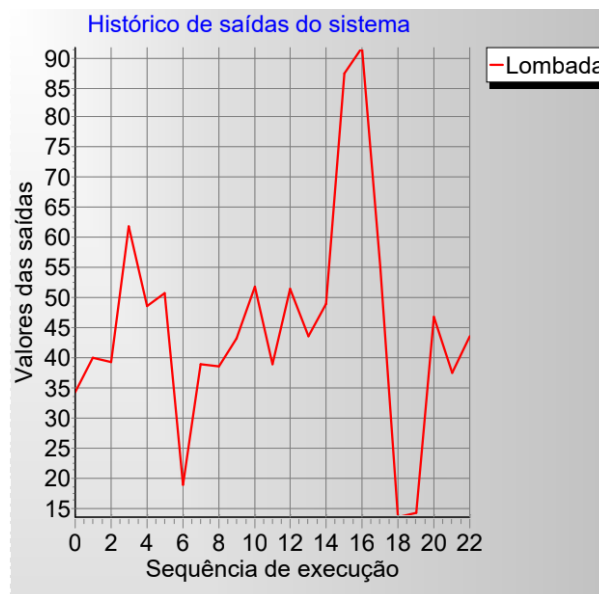
6 Estudos de Caso

Os estudos de casos foram realizados no bairro Jardim Panorama, Ipatinga-MG. Foram coletados dados de ruas e avenidas com lombadas e também foi utilizada uma rua sem a presença de uma lombada afim de ter cenários para poder indicar a presença ou não de uma lombada.

6.1 Estudo de Caso: Rua Pelotas - Ipatinga/MG

O primeiro percurso foi realizado na rua Pelotas em Ipatinga-MG. Nesta rua há a presença de duas lombadas. As Figuras 12 e 13 mostram respectivamente a saída do Modelo Matemático e do mapa com o trajeto percorrido e a identificação da lombada que foi destacada com a cor laranja e com tamanho maior que as demais que estão em amarelo. Já a tabela 4, exemplifica a fuzzificação onde foi identificada a lombada pelo sistema fuzzy.

Figura 12 – Resultado Primeira Lombada Rua Pelotas



Fonte: elaborada pelo autor

Figura 13 – Mapa Primeira Lombada Rua Pelotas



Fonte: elaborada pelo autor

Tabela 4 – Fuzificação Primeira Lombada Rua Pelotas

Eixo	Valor do Eixo	Valor P. MuitoBaixo	Valor P. Baixo	Valor P. Medio	Valor P. Alto
Y	-0,98	0,00	0,00	-	1,00
Z	0,19	0,00	0,20	-	1,00
X	-0,05	0,00	0,00	1,00	-

Após a fuzificação, a inferência ocorreu percorrendo cada regra evidenciada pela Figura 10. Ao todo, foram evidenciadas nove regras, começando pela regra zero. A primeira regra está de acordo a primeira linha da tabela 5 onde lê Se Eixo Y é igual a "Alto" e Eixo Z é igual a "Baixo" então Lombada é igual a "Medio". Desta forma, substituindo os termos linguísticos "Alto", "Baixo" e "Médio" por valores numéricos, o resultado é o valor 0,20 que está representado na última coluna da segunda linha da Tabela 5.

Tabela 5 – Regra Zero

Eixo Y	Operador Lógico	Eixo Z	Lombada
Alto	AND	Baixo	Medio
1,00	AND	0,20	0,20

A última regra é a que define a presença da lombada. Ela foi representada pela tabela 6. Diferentemente das demais regras, nela há a presença do Eixo X. A última coluna da segunda linha exibe o valor da saída que foi "1,00" significando que a saída do sistema para esse registro é "Alto" o que indica a presença da lombada no cenário. A fuzificação das demais regras estão detalhadas no Anexo I.

Tabela 6 – Regra oito

Eixo Y	Operador Lógico	Eixo Z	Operador Lógico	Eixo X	Lombada
Alto	AND	Alto	AND	Medio	Alto
1,00	AND	1,00	AND	1,00	1,00

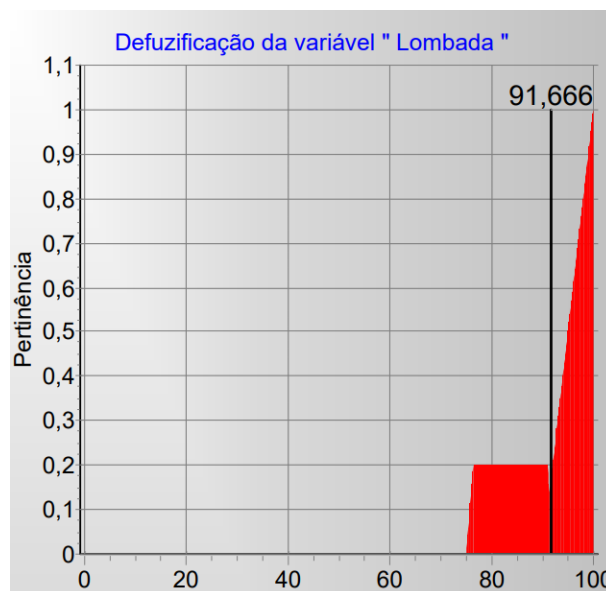
Concluindo a inferência, foi feito a Agregação de cada regra, o que foi representada pela Tabela 7. Na Tabela abaixo há a regra e há também as pertinências "MuitoBaixo", "Baixo", "Medio" e "Alto". A regra oito foi a única regra que apontou para o grau de pertinência "Alto" e a última linha representa o resultado final da Agregação:

Tabela 7 – Agregação Final

Regra	P. "MuitoBaixo"	P. "Baixo"	P. "Medio"	P. "Alto"
Zero	0,00	0,00	0,20	0,00
Um	0,00	0,00	0,20	0,00
Dois	0,00	0,00	0,20	0,00
Três	0,00	0,00	0,20	0,00
Quatro	0,00	0,00	0,20	0,00
Cinco	0,00	0,00	0,20	0,00
Seis	0,00	0,00	0,20	0,00
Sete	0,00	0,00	0,20	0,00
Oito	0,00	0,00	0,20	1,00
Resultado Final	0,00	0,00	0,20	1,00

A defuzzificação pelo método do Centro da Gravidade para o registro que indicou ser uma lombada, possuiu valor de 91,67. A Figura 14 exibe como o software InFuzzy exibiu a saída em formato de gráfico:

Figura 14 – Defuzzificação Primeira Lombada Rua Pelotas

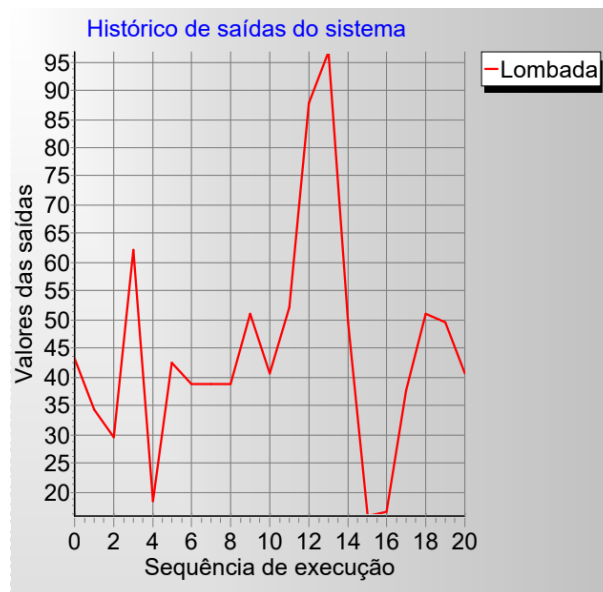


Fonte: elaborada pelo autor

Esse detalhamento não foi repetido para os demais registros deste e de outros casos visto que ocasionaria uma repetição de dados neste estudo.

Ainda na rua Pelotas, há uma outra lombada. As Figuras 15 e 16 exibem os resultados do sistema Fuzzy e o trajeto com o ponto exato em que o sistema identificou como lombada.

Figura 15 – Resultado Segunda Lombada Rua Pelotas



Fonte: elaborada pelo autor

Figura 16 – Mapa Segunda Lombada Rua Pelotas

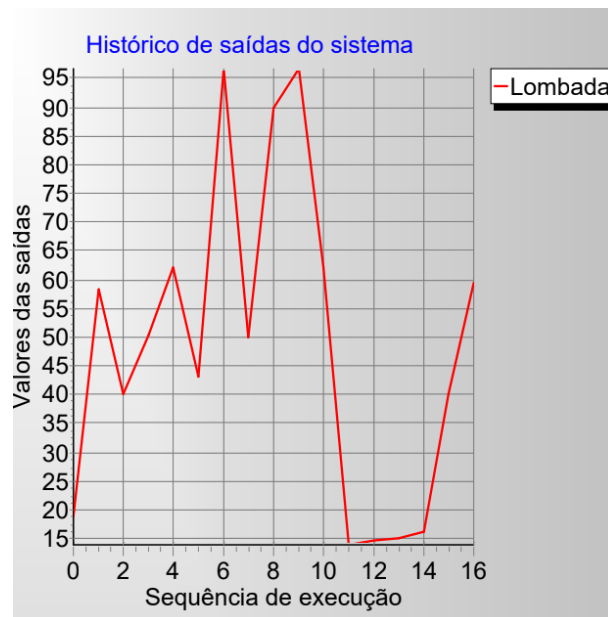


Fonte: elaborada pelo autor

6.2 Estudo de caso: Rua Serra do Mar - Ipatinga/MG

O segundo estudo de caso foi realizado na rua Serra do Mar onde há a presença de uma lombada no trajeto. De acordo com a Figura 17, é possível verificar que as sequências de execução 6 e 10 apontaram para a métrica "Alto". Ao verificar presencialmente, há a presença de apenas uma lombada localizada na sequência de execução 10 representada pela cor laranja, que foi destacada na Figura 18.

Figura 17 – Resultado Lombada Rua Serra do Mar



Fonte: elaborada pelo autor

Figura 18 – Mapa Rua Serra do Mar



Fonte: elaborada pelo autor

A sequência de execução 6, representada na cor vermelha na Figura 18 é um falso positivo e pode ser justificado pelo fato da rua ter sofrido bastante no passado com raízes de árvores que cresciam abaixo do asfalto. Foi necessário realizar correções na rua através de remendas que acabou ocasionando em desníveis no trajeto. A Figura 19 demonstra os desníveis ao longo da rua.

Figura 19 – Irregularidade Lombada Rua Serra do Mar

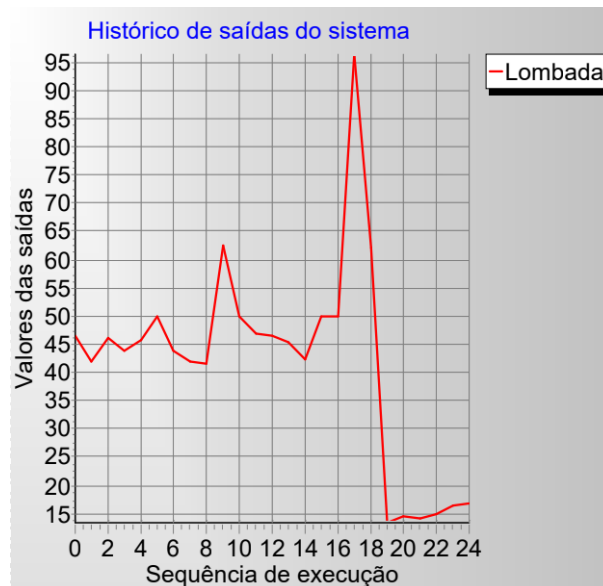


Fonte: elaborada pelo autor

6.3 Estudo de caso: Avenida JK - Ipatinga/MG

O terceiro estudo de caso foi realizado na Avenida JK, foram coletados dois trajetos com uma lombada em cada. No primeiro trajeto, de acordo com a Figura 20, na sequência de execução 17 houve a métrica "Alto". Ao realizar a verificação, há a presença de uma lombada no local destacado na Figura 21.

Figura 20 – Resultado Primeira Lombada Av. JK



Fonte: elaborada pelo autor

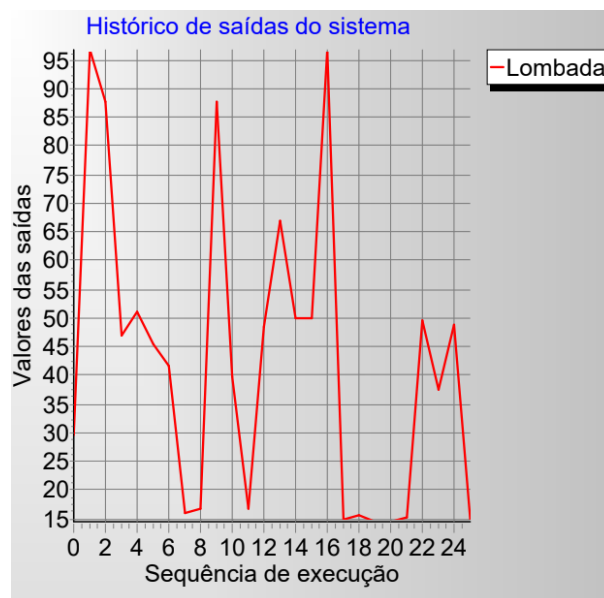
Figura 21 – Mapa Primeira Lombada Av. JK



Fonte: elaborada pelo autor

No segundo trajeto da Avenida JK, conforme exibe a Figura 22, há ao todo na saída do sistema duas sequências de execução com métrica "Alto". Porém, fisicamente há apenas uma lombada que está situada pela sequência de número 16 como pode ser visualizado na Figura 23 destacado em cor laranja. A identificação de um falso positivo pode ser justificado por conta da sequência de número 1, destacado em cor vermelha, ser um cruzamento na Avenida, o que torna o local irregular por ter um alto fluxo de veículos que passa sobre o local.

Figura 22 – Resultado Segunda Lombada Av. JK



Fonte: elaborada pelo autor

Figura 23 – Mapa Segunda Lombada Av. JK



Fonte: elaborada pelo autor

6.4 Estudo de Caso: Rua Serra Negra - Ipatinga/MG

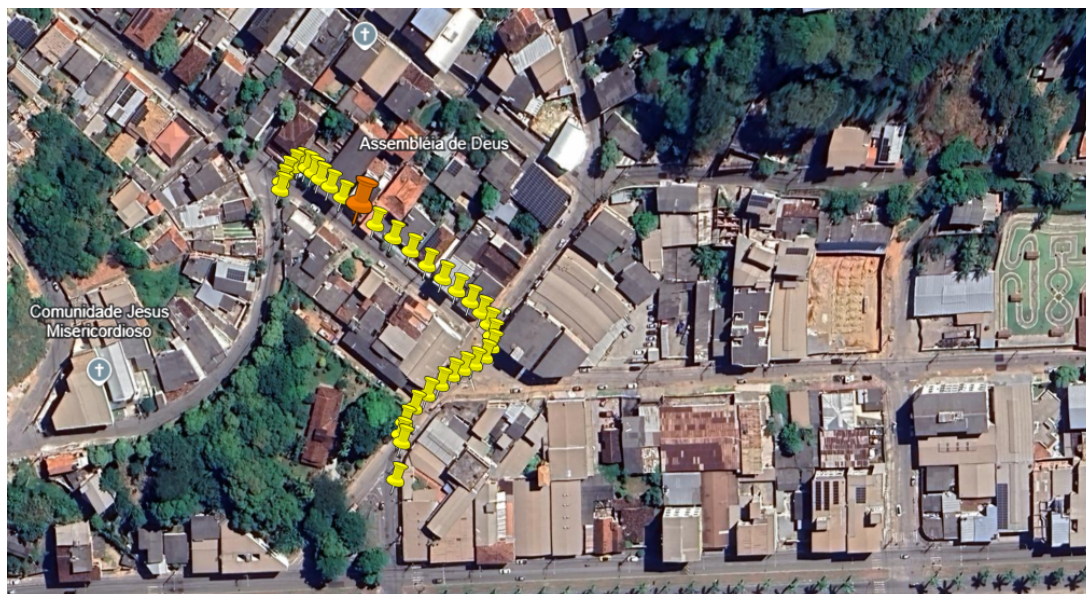
Este estudo de caso foi realizado na rua Serra Negra, Ipatinga-MG, onde há uma lombada. A saída do sistema indicou a presença de uma lombada de acordo com a Figura 24 onde há a métrica "Alto" na Sequência de execução 22. Esta rua é diferente dos demais estudos de caso por ela possuir uma inclinação. Como pode ser visto na Figura 25, o local destacado é onde a saída do sistema considerou ser uma lombada. Fisicamente, a lombada está alguns metros após o local destacado com o símbolo da lombada. Esse erro pode ser considerado normal visto que um GPS pode possuir falhas de alguns metros.

Figura 24 – Resultado Rua Serra Negra



Fonte: elaborada pelo autor

Figura 25 – Mapa Rua Serra Negra



Fonte: elaborada pelo autor

6.5 Estudo de Caso: Rua Serra Geral - Ipatinga/MG

Este estudo de caso foi realizado na rua Serra Geral, Ipatinga-MG, onde não há a presença de lombada. A saída do sistema indicou que não há lombadas presentes no trajeto e está representada de acordo com a Figura 26 onde não há a métrica "Alto" em nenhuma sequência de execução. Na Figura 27 há a representação do mapa com o trajeto realizado em amarelo.

Figura 26 – Resultado Rua Serra Geral



Fonte: elaborada pelo autor

Figura 27 – Mapa Rua Serra Geral



Fonte: elaborada pelo autor

7 Considerações Finais

Neste estudo, foi desenvolvida uma abordagem para a identificação de lombadas utilizando um acelerômetro e lógica fuzzy. Os resultados obtidos demonstraram que o objetivo geral foi alcançado, comprovando a eficácia do sistema desenvolvido em detectar variações de aceleração associadas à passagem do veículo sobre lombadas. A utilização de um acelerômetro embutido em um dispositivo móvel, aliado ao aplicativo *Sensor Logger*, possibilitou a coleta precisa dos dados de aceleração nos eixos X, Y e Z, fundamentais para a análise e caracterização das vibrações geradas pela presença de lombadas.

Os objetivos específicos também foram alcançados visto que os dados foram coletados num smartphone através do aplicativo *Sensor Logger*. O modelo foi implementado utilizando o software *InFuzzy*, que possibilitou a modelagem das funções de pertinência, a criação das regras fuzzy e a identificação das lombadas com base nos dados coletados e com o sistema desenvolvido. As lombadas identificadas foram ilustradas num mapa geográfico que, por fim, foram validadas ao verificar presencialmente se havia a existência nos locais.

Os resultados obtidos demonstraram o potencial do algoritmo desenvolvido. Entretanto, foram encontradas algumas limitações principalmente com as condições de pavimentação, velocidade do veículo, características do veículo e o perfil do motorista podendo dificultar na identificação de lombadas.

Sendo assim, como trabalhos futuros, sugere-se a aplicação do sistema em diferentes tipos de veículos, bem como a inclusão de variáveis adicionais, como a velocidade do veículo, a fim de aprimorar a detecção de lombadas. Também se propõe o desenvolvimento de um software para executar o sistema em tempo real, com a possibilidade de disponibilizar os resultados em uma plataforma colaborativa como o OpenStreetMap.

Assim, este estudo contribui para o avanço de soluções baseadas em lógica fuzzy aplicadas à área de detecção de lombadas em vias, apresentando uma abordagem eficiente, prática e de baixo custo.

Anexo I

Estudo de Caso: Primeira Lombada Rua Pelotas - Ipatinga/MG

Por questão de entendimento, esse detalhamento foi feito apenas para o estudo de caso da primeira lombada da Rua Pelotas - Ipatinga/MG. Foi realizado o detalhamento para o registro que apontou a presença de uma lombada e para um registro que não apontou a presença de uma lombada. O detalhamento demonstra todas as etapas do Sistema, desde a entrada de dados até a saída.

Fuzificação - Lombada

Tabela 8 – Fuzificação Primeira Lombada Rua Pelotas

Eixo	Valor do Eixo	Valor P. MuitoBaixo	Valor P. Baixo	Valor P. Medio	Valor P. Alto
Y	-0,98	0,00	0,00	-	1,00
Z	0,19	0,00	0,20	-	1,00
X	-0,05	0,00	0,00	1,00	-

Inferência - Lombada

Regras - Lombada

As regras podem ser visualizadas de acordo com a Figura 10. Abaixo está a representação das regras tanto pelas métricas inseridas no sistema quanto pelas pertinências que de cada métrica.

REGRA = 0

Se (EixoY = Alto) AND (EixoZ = Baixo) Então (Lombada = Alto)

Se (EixoY = 1,00) AND (EixoZ = 0,20) Então (Lombada = 0,20)

REGRA = 1

Se (EixoY = Alto) AND (EixoZ = MuitoBaixo) Então (Lombada = Medio)

Se (EixoY = 1,00) AND (EixoZ = 0,00) Então (Lombada = 0,00)

REGRA = 2

Se (EixoY = Baixo) AND (EixoZ = Alto) Então (Lombada = Alto)

Se (EixoY = 0,00) AND (EixoZ = 1,00) Então (Lombada = 0,00)

REGRA = 3

Se (EixoY = Baixo) AND (EixoZ = Baixo) Então (Lombada = Medio)

Se (EixoY = 0,00) AND (EixoZ = 0,20) Então (Lombada = 0,00)

REGRA = 4

Se (EixoY = Baixo) AND (EixoZ = MuitoBaixo) Então (Lombada = Baixo)

Se (EixoY = 0,00) AND (EixoZ = 0,00) Então (Lombada = 0,00)

REGRA = 5

Se (EixoY = MuitoBaixo) AND (EixoZ = Alto) Então (Lombada = Medio)

Se (EixoY = 0,00) AND (EixoZ = 1,00) Então (Lombada = 0,00)

REGRA = 6

Se (EixoY = MuitoBaixo) AND (EixoZ = Baixo) Então (Lombada = Baixo)

Se (EixoY = 0,00) AND (EixoZ = 0,20) Então (Lombada = 0,00)

REGRA = 7

Se (EixoY = MuitoBaixo) AND (EixoZ = MuitoBaixo) Então (Lombada = Baixo)

Se (EixoY = 0,00) AND (EixoZ = 0,00) Então (Lombada = 0,00)

REGRA = 8

Se (EixoY = Alto) AND (EixoZ = Alto) AND (EixoX = Medio) Então (Lombada = MuitoAlto)

Se (EixoY = 1,00) AND (EixoZ = 1,00) AND (EixoX = 1,00) Então (Lombada = 1,00)

Agregação

De acordo com a Tabela 9, é demonstrado a agregação de cada regra. Na última linha da Tabela é representada a Agregação Final que significa a agregação de todas as regras numa única só.

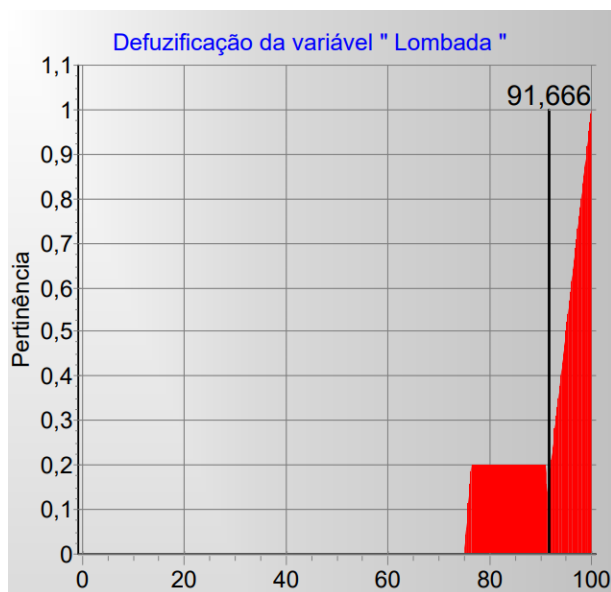
Tabela 9 – Agregação Final

Regra	P. "MuitoBaixo"	P. "Baixo"	P. "Medio"	P. "Alto"
Zero	0,00	0,00	0,20	0,00
Um	0,00	0,00	0,20	0,00
Dois	0,00	0,00	0,20	0,00
Três	0,00	0,00	0,20	0,00
Quatro	0,00	0,00	0,20	0,00
Cinco	0,00	0,00	0,20	0,00
Seis	0,00	0,00	0,20	0,00
Sete	0,00	0,00	0,20	0,00
Oito	0,00	0,00	0,20	1,00
Resultado Final	0,00	0,00	0,20	1,00

Defuzificação - Lombada

Aplicando a equação 2.11, a saída do sistema é 91,67 valor no qual indica a presença de uma lombada. A Figura 28 representa, graficamente, a saída do sistema.

Figura 28 – Defuzificação Lombada Primeiro Trajeto Rua Pelotas



Fonte: elaborada pelo autor

Fuzificação - Não Lombada

A Tabela 10 representa a Fuzificação de um registro que não apontou a presença de uma lombada no primeiro estudo de caso.

Tabela 10 – Fuzificação Não Lombada Rua Pelotas

Eixo	Valor do Eixo	Valor P. MuitoBaixo	Valor P. Baixo	Valor P. Medio	Valor P. Alto
Y	0,00	0,18	0,00	-	0,00
Z	0,38	0,00	0,00	-	1,00
X	-0,08	0,00	0,00	1,00	-

Inferência - Não Lombada

Regras - Não Lombada

As regras podem ser visualizadas de acordo com a Figura 10. Abaixo está a representação das regras tanto pelas métricas inseridas no sistema quanto pelas pertinências que de cada métrica.

REGRA = 0

Se (EixoY = Alto) AND (EixoZ = Baixo) Então (Lombada = Alto)

Se (EixoY = 0,00) AND (EixoZ = 0,00) Então (Lombada = 0,00)

REGRA = 1

Se (EixoY = Alto) AND (EixoZ = MuitoBaixo) Então (Lombada = Medio)

Se (EixoY = 0,00) AND (EixoZ = 0,00) Então (Lombada = 0,00)

REGRA = 2

Se (EixoY = Baixo) AND (EixoZ = Alto) Então (Lombada = Alto)

Se (EixoY = 0,00) AND (EixoZ = 1,00) Então (Lombada = 0,00)

REGRA = 3

Se (EixoY = Baixo) AND (EixoZ = Baixo) Então (Lombada = Medio)

Se (EixoY = 0,00) AND (EixoZ = 0,00) Então (Lombada = 0,00)

REGRA = 4

Se (EixoY = Baixo) AND (EixoZ = MuitoBaixo) Então (Lombada = Baixo)

Se (EixoY = 0,00) AND (EixoZ = 0,00) Então (Lombada = 0,00)

REGRA = 5

Se (EixoY = MuitoBaixo) AND (EixoZ = Alto) Então (Lombada = Medio)

Se (EixoY = 0,18) AND (EixoZ = 1,00) Então (Lombada = 0,18)

REGRA = 6

Se (EixoY = MuitoBaixo) AND (EixoZ = Baixo) Então (Lombada = Baixo)

Se (EixoY = 0,18) AND (EixoZ = 0,00) Então (Lombada = 0,00)

REGRA = 7

Se (EixoY = MuitoBaixo) AND (EixoZ = MuitoBaixo) Então (Lombada = Baixo)

Se (EixoY = 0,18) AND (EixoZ = 0,00) Então (Lombada = 0,00)

REGRA = 8

Se (EixoY = Alto) AND (EixoZ = Alto) AND (EixoX = Medio) Então (Lombada = MuitoAlto)

Se (EixoY = 0,00) AND (EixoZ = 1,00) AND (EixoX = 1,00) Então (Lombada = 0,00)

Agregação - Não Lombada

De acordo com a Tabela 11, é demonstrado a agregação de cada regra. Na última linha da Tabela é representada a Agregação Final que significa a agregação de todas as regras numa única só.

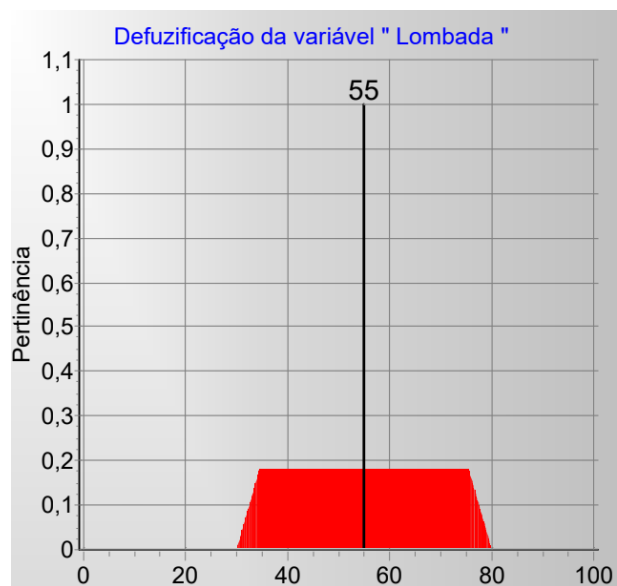
Tabela 11 – Agregação Final - Não lombada

Regra	P. "MuitoBaixo"	P. "Baixo"	P. "Medio"	P. "Alto"
Zero	0,00	0,00	0,00	0,00
Um	0,00	0,00	0,00	0,00
Dois	0,00	0,00	0,00	0,00
Três	0,00	0,00	0,00	0,00
Quatro	0,00	0,00	0,00	0,00
Cinco	0,00	0,18	0,00	0,00
Seis	0,00	0,18	0,00	0,00
Sete	0,00	0,18	0,00	0,00
Oito	0,00	0,18	0,00	0,00
Resultado Final	0,00	0,18	0,00	0,00

Defuzificação - Não lombada

A defuzificação pelo método do Centro da Gravidade para o registro que indicou ser uma lombada, possuiu valor de 55. A Figura 29 exhibe como o software InFuzzy exibiu a saída em formato de gráfico:

Figura 29 – Defuzificação Não Lombada Rua Pelotas



Fonte: elaborada pelo autor

Referências

- ALMEIDA, J. S. *Aplicação da lógica fuzzy em sistemas inteligentes*. [S.l.]: Editora Acadêmica, 2020. Citado na página 16.
- BRASIL. Lei nº 9.503 - capítulo i: Disposições preliminares. In: BRASIL. [S.l.], 1997. Citado na página 15.
- BRASIL. Lei nº 9.503 - capítulo vii: Da sinalização de trânsito. In: BRASIL. [S.l.], 1997. Citado na página 15.
- BRASIL. Manual brasileiro de sinalização de trânsito. In: CONTRAN. [S.l.], 2007. Citado nas páginas 13 e 15.
- (DOP/CETS), D. Obras complementares: Ondulações transversais e sonorizadores. In: DER/PR. [S.l.], 2018. Citado na página 15.
- FERREIRA, C. E.; SOUZA, M. R. Análise do desempenho de sistemas fuzzy na detecção de eventos. *Revista Brasileira de Inteligência Artificial*, v. 12, n. 1, p. 45–59, 2021. Citado na página 16.
- HOLLERWEGER, M. M. Aplicação de visão computacional no auxílio ao levantamento de defeitos em pavimento rodoviário. In: UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. [S.l.], 2019. Citado na página 23.
- HOWARD, D. D. D. Public perceptions of self-driving cars: The case of berkeley, california. In: UNIVERSIDADE DA CALIFORNIA. [S.l.], 2013. Citado na página 12.
- IPR. Manual de pavimentação. In: IPR. [S.l.], 2006. Citado na página 15.
- JANG, J.-S. R.; SUN, C.-T.; MIZUTANI, E. *Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1997. Citado nas páginas 21 e 22.
- KAMIGASHIMA, L. Y. Sistema para coleta e disponibilização de dados de potenciais buracos. In: INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA. [S.l.], 2018. Citado na página 24.
- KLIR, G. J.; YUAN, B. *Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications*. [S.l.]: Prentice Hall, 1995. Citado nas páginas 17, 18, 20, 21 e 22.
- MONICO, J. F. G. Posicionamento pelo navstar-gps. In: . [S.l.]: Editora Unesp, 2000. Citado na página 16.
- MOREIRA HADRYEL HOLANDA, L. M. M. S. T. M. V. B. W. A. D. R. Sistema de detecção de buracos em estradas. In: UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. [S.l.], 2013. Citado na página 23.
- NUSSENZVEIG, M. Curso de física básica. In: EDITORA EDGARD BLÜCHER LTDA. [S.l.], 2013. Citado na página 16.
- OLIVEIRA, L. F. *Inteligência Artificial e Aplicações em Robótica*. [S.l.]: Editora Ciência Moderna, 2021. Citado na página 16.

PASSOS PARREIRA, F. C. Detecção de buracos em pavimento asfáltico com base em processamento digital de imagens e deep learning. In: UNIVERSIDADE DO VALE DO ITAJAÍ - UNIVALI, 2021, Baln, Comboriú, SC, BR. [S.l.], 2021. Citado na página 23.

PIOVESAN, E. R. T. A. Pesquisa exploratória: procedimento metodológico para o estudo de fatores humanos no campo da saúde pública. In: REVISTA SAÚDE PÚBLICA. [S.l.], 1995. Citado na página 25.

RENZ, E. M. Avaliação da retrorrefletividade de pintura de demarcação viária horizontal em trechos da br-287 e rs-509. 2015. Citado na página 12.

ROCHA, M. Propriedades de um acelerômetro eletrônico e possibilidades de uso no ensino de mecânica. In: UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS. [S.l.], 2012. Citado na página 15.

ROSS, T. J. *Fuzzy logic with engineering applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010. Citado nas páginas 18, 19, 20 e 21.

SCHMIDT, L. de A. Automatização do reconhecimento de buracos em rodovias usando inteligência computacional. In: UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA. [S.l.], 2020. Citado na página 23.

SILVA, P. e. Sinalização de trânsito “todos por um trânsito mais seguro”. In: UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS, 31., 2017, Araguaína, TO. P. Araguaína, TO, BR: ACM, 2017. p. 11. Citado na página 12.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. *Information and control*, Elsevier, v. 8, n. 3, p. 338–353, 1965. Citado na página 16.