



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Fernando Henrique Lonzetti

**GENERALIZAÇÃO DO MÉTODO DE RAZÃO CRUZADA PARA ESTIMAÇÃO DE  
VELOCIDADE EM APLICAÇÕES DE VIDEOANÁLISE FORENSE**

Florianópolis  
2023

Fernando Henrique Lonzetti

**GENERALIZAÇÃO DO MÉTODO DE RAZÃO CRUZADA PARA ESTIMAÇÃO DE  
VELOCIDADE EM APLICAÇÕES DE VIDEOANÁLISE FORENSE**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa  
Catarina para a obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Márcio Holsbach Costa, Dr.

Florianópolis

2023

### Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor

Lonzetti, Fernando Henrique

Generalização do Método de Razão Cruzada para Estimação de Velocidade em Aplicações de Videoanálise Forense / Fernando Henrique Lonzetti ; orientador, Márcio Holsbach Costa, 2023. 97 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Estimativa de Velocidade. 3. Razão Cruzada. 4. Perícia Criminal. 5. Análise de Imagens. I. Costa, Márcio Holsbach. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

Fernando Henrique Lonzetti

**GENERALIZAÇÃO DO MÉTODO DE RAZÃO CRUZADA PARA ESTIMAÇÃO DE VELOCIDADE EM APLICAÇÕES DE VIDEOANÁLISE FORENSE**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Lisandro Lovisolo, Dr.

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Prof. Bruno Catarino Bispo, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Márcio Holsbach Costa, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

---

Prof. Telles Brunelli Lazzarin, Dr.

Coordenador do Programa de Pós-Graduação

---

Prof. Márcio Holsbach Costa, Dr.

Orientador

Florianópolis, 2023.

*À minha profissão.*

## **AGRADECIMENTOS**

Inicialmente, faço meus votos de agradecimentos ao Professor Márcio Holsbach Costa (Professor com P maiúsculo!). Tive a oportunidade de ser orientado por ele na graduação e no mestrado. Professor Márcio obviamente nasceu para lecionar e percebo que é muito feliz com o que faz. Agradeço-o especialmente pela paciência. Considero-o um amigo.

Agradeço aos colegas de trabalho da Polícia Científica de Santa Catarina pelo apoio e entendimento da importância deste estudo.

Agradeço à Suzana, minha esposa, pela compreensão, apoio e parceria.

Agradeço à Universidade Federal de Santa Catarina e todos seus colaboradores. Por onde passo, é um privilégio falar desta instituição.

Agradeço ao povo brasileiro, pois, mesmo que muitas vezes sem saber, permite que possamos estudar em uma instituição de qualidade.

*“Labor omnia vincit improbus”*

– Vergilius

## RESUMO

A razão cruzada é uma técnica amplamente utilizada em análise forense para a estimação da velocidade de veículos envolvidos em sinistros através do procedimento de videoanálise. Este trabalho apresenta uma proposta para a generalização do método de razão cruzada. A principal contribuição desta proposta é a substituição de informações pontuais sobre elementos da imagem por intervalos de existência, o que permite um enfoque probabilístico ao invés de determinístico. Como resultado, além da estimação da velocidade média é possível obter informações com relação à incerteza associada. São apresentadas formas de utilização do método proposto, entre elas a determinação da probabilidade de a velocidade estar contida em um determinado intervalo. Também é realizada uma comparação com o método de projeção reversa, que apresenta custo mais elevado em função da necessidade de visitaçao do local de ocorrência do sinistro pelo perito. Para tanto, foi realizada uma pesquisa com peritos criminais das polícias científicas do estados e da federação. Os resultados obtidos corroboram as vantagens do método proposto em relação à forma convencional. A partir do exposto, o método de razão cruzada generalizada é considerado promissor como substituto do método convencional em serviços de polícia científica, podendo vir a ser uma importante ferramenta no trabalho pericial em casos de sinistros de trânsito.

**Palavras-chave:** Estimativa de velocidade. Perícia Criminal. Razão cruzada.



## ABSTRACT

Cross-ratio is a widely used technique in forensic analysis to estimate the speed of vehicles involved in accidents using video analysis. This work presents a generalization of the cross-ratio method. The main contribution of this work is to substitute specific spatial information with existence intervals, which allows a probabilistic approach instead of a deterministic one. As a result, in addition to the average speed, it is possible to obtain information about uncertainty. Two different ways of using the proposed method are presented; one is determining the probability of the velocity being contained in a specific interval. A comparison is also made with the reverse projection method, which has a higher economic cost due to the need to visit the accident's place. Real experiments and reports from scientific police experts were analyzed. The results obtained corroborate the expected advantages of the proposed method over its conventional form. Based on the evidence, the generalized cross-ratio method can be considered a promising improvement for estimating vehicle speed by scientific police services. It may become an important tool in forensic work to elucidate the causes of traffic accidents.

**Keywords:** Speed Estimation. Forensics. Cross-ratio.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Transformação projetiva de uma reta do espaço tridimensional (ETR) para o espaço bidimensional digital (EBD).....	25
Figura 2 – Trajetória percorrida pelo veículo no ETR. ....	26
Figura 3 – Trajetória percorrida pelo veículo no EBD.....	26
Figura 4 – Estimativa inicial dos centros de eixos e ajuste do segmento de reta.....	32
Figura 5 – Estimação dos intervalos ajustados à reta.....	33
Figura 6 – Sobreposição de quadros retirada do vídeo com ênfase na marcação dos centros de eixo.....	42
Figura 7 – Fotografia no dia do experimento. ....	43
Figura 8 – Trajetória para análise.....	44
Figura 9 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #01 com a câmera VIP 1130 B G3.....	46
Figura 10 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #01 com a câmera VIP 3260 Z G2. ....	47
Figura 11 – Sobreposição de quadros à captura da passagem #01 com a câmera VIP 5550 Z IA.....	47
Figura 12 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #01 com a câmera VIP 1130 B G3 após processo de remoção de distorção, manipulação e adição de reta colinear aos centros de eixo do veículo. ....	49
Figura 13 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #01 com a câmera VIP 3260 Z G2 após processo de remoção de distorção, manipulação e adição de reta colinear aos centros de eixo do veículo. ....	50
Figura 14 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #01 com a câmera VIP 5550 Z IA após processo de remoção de distorção, manipulação e adição de reta colinear aos centros de eixo do veículo. ....	50
Figura 15 – Histograma normalizado obtido a partir de simulação utilizando a equação (30) e geração de números pseudoaleatórios (azul); PDF segundo a equação (52) com os dados de (55) (linha laranja) e limites da integração para [60,70] km/h (tracejado na vertical). ....	54
Figura 16 – Distribuição dos valores de velocidade obtidos pelos 12 voluntários, utilizando o método de razão cruzada convencional nas imagens de pior nitidez. Velocidade de	

referência (método de projeção reversa) de 28,8 km/h. Em vermelho o radar e em preto método da projeção reversa. ....	56
Figura 17 – Distribuição dos valores de velocidade obtidos pelos 12 voluntários, utilizando o método de razão cruzada convencional nas imagens de pior nitidez. Velocidade de referência (método de projeção reversa) de 43,9 km/h. Em vermelho o radar e em preto o método de projeção reversa. ....	57
Figura 18 – Distribuição dos valores de velocidade obtidos pelos 12 voluntários, utilizando o método de razão cruzada convencional nas imagens de pior nitidez. Velocidade de referência (método de projeção reversa) de 52,9 km/h. Em vermelho o radar e em preto o método de projeção reversa. ....	57
Figura 19 – Distribuição dos valores de velocidade obtidos pelos 12 voluntários, utilizando o método de razão cruzada convencional nas imagens de pior nitidez. Velocidade de referência (método de projeção reversa) de 64,8 km/h. Em vermelho o radar e em preto o método de projeção reversa. ....	58
Figura 20 – Distribuição dos valores de velocidade obtidos pelos 12 voluntários, utilizando o método de razão cruzada convencional nas imagens de pior nitidez. Velocidade de referência (método de projeção reversa) de 86,4 km/h. Em vermelho o radar e em preto o método de projeção reversa. ....	58
Figura 21 – Desvios padrões para as distribuições de velocidade obtidas pelos voluntários através do método da razão cruzada convencional para cada uma das três câmeras e passagem. ....	59
Figura 22 – Valores de erro quadrático médio (MSE) encontrados para as velocidades obtidas a partir das marcações individuais associadas a cada uma das três câmeras, para cada passagem. ....	60
Figura 23 – Diagramas de caixa das velocidades estimadas pelos 12 voluntários, utilizando o método proposto nas imagens de baixa nitidez. Velocidade de referência (método de projeção reversa) de 28,8 km/h. Em vermelho (linha ponto-traço) o radar e em preto (linha tracejada) o método de projeção reversa. ....	62
Figura 24 – Diagramas de caixa das velocidades estimadas pelos 12 voluntários, utilizando o método proposto nas imagens de baixa nitidez. Velocidade de referência (método de projeção reversa) de 43,9 km/h. Em vermelho (linha ponto-traço) o radar e em preto (linha tracejada) o método de projeção reversa. ....	62

Figura 25 – Diagramas de caixa das velocidades estimadas pelos 12 voluntários, utilizando o método proposto nas imagens de pior nitidez. Velocidade de referência (método de projeção reversa) de 52,9 km/h. Em vermelho (linha ponto-traço) o radar e em preto (linha tracejada) o método de projeção reversa. .... 63

Figura 26 – Diagramas de caixa das velocidades estimadas pelos 12 voluntários, utilizando o método proposto nas imagens de pior nitidez. Velocidade de referência (método de projeção reversa) de 64,8 km/h. Em vermelho (linha ponto-traço) o radar e em preto (linha tracejada) o método de projeção reversa. .... 63

Figura 27 – Diagramas de caixa das velocidades estimadas pelos 12 voluntários, utilizando o método proposto nas imagens de pior nitidez. Velocidade de referência (método de projeção reversa) de 86,4 km/h. Em vermelho (linha ponto-traço) o radar e em preto (linha tracejada) o método de projeção reversa. .... 64

Figura 28 – Distribuição dos valores de velocidade considerando a combinação das marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de baixa nitidez. Velocidade de referência (método de projeção reversa) de 28,8 km/h. Em laranja a FDP segundo a equação (52), em vermelho o radar e em preto o método de projeção reversa. .... 65

Figura 29 – Distribuição dos valores de velocidade considerando a combinação das marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de baixa nitidez. Velocidade de referência (método de projeção reversa) de 43,9 km/h. Em laranja a FDP segundo a equação (52), em vermelho o radar e em preto o método de projeção reversa. .... 65

Figura 30 – Distribuição dos valores de velocidade considerando a combinação das marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de baixa nitidez. Velocidade de referência (método de projeção reversa) de 52,9 km/h. Em laranja a FDP segundo a equação (52), em vermelho o radar e em preto o método de projeção reversa. .... 66

Figura 31 – Distribuição dos valores de velocidade considerando a combinação das marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de baixa nitidez. Velocidade de referência (método de projeção reversa) de 64,8 km/h. Em laranja a FDP segundo a equação (52), em vermelho o radar e em preto o método de projeção reversa. .... 66

Figura 32 – Distribuição dos valores de velocidade considerando a combinação das marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de baixa nitidez. Velocidade de referência (método de projeção reversa) de 86,4 km/h. Em laranja a FDP segundo a equação (52), em vermelho o radar e em preto o método de projeção reversa. .... 67

Figura 33 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #01 com a câmera VIP 1130 B G3 após processo de remoção de distorção, manipulação e adição de reta colinear aos centros de eixo do veículo. ....	79
Figura 34 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #01 com a câmera VIP 3260 Z G2 após processo de remoção de distorção, manipulação e adição de reta colinear aos centros de eixo do veículo. ....	80
Figura 35 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #01 com a câmera VIP 5550 Z IA após processo de remoção de distorção, manipulação e adição de reta colinear aos centros de eixo do veículo. ....	80
Figura 36 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #02 com a câmera VIP 1130 B G3 após processo de remoção de distorção, manipulação e adição de reta colinear aos centros de eixo do veículo. ....	81
Figura 37 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #02 com a câmera VIP 3260 Z G2 após processo de remoção de distorção, manipulação e adição de reta colinear aos centros de eixo do veículo. ....	81
Figura 38 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #02 com a câmera VIP 5550 Z IA após processo de remoção de distorção, manipulação e adição de reta colinear aos centros de eixo do veículo. ....	82
Figura 39 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #03 com a câmera VIP 1130 B G3 após processo de remoção de distorção, manipulação e adição de reta colinear aos centros de eixo do veículo. ....	82
Figura 40 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #03 com a câmera VIP 3260 Z G2 após processo de remoção de distorção, manipulação e adição de reta colinear aos centros de eixo do veículo. ....	83
Figura 41 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #03 com a câmera VIP 5550 Z IA após processo de remoção de distorção, manipulação e adição de reta colinear aos centros de eixo do veículo. ....	83
Figura 42 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #04 com a câmera VIP 1130 B G3 após processo de remoção de distorção, manipulação e adição de reta colinear aos centros de eixo do veículo. ....	84

Figura 43 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #04 com a câmera VIP 3260 Z G2 após processo de remoção de distorção, manipulação e adição de reta colinear aos centros de eixo do veículo. ....	84
Figura 44 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #04 com a câmera VIP 5550 Z IA após processo de remoção de distorção, manipulação e adição de reta colinear aos centros de eixo do veículo. ....	85
Figura 45 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #05 com a câmera VIP 1130 B G3 após processo de remoção de distorção, manipulação e adição de reta colinear aos centros de eixo do veículo. ....	85
Figura 46 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #05 com a câmera VIP 3260 Z G2 após processo de remoção de distorção, manipulação e adição de reta colinear aos centros de eixo do veículo. ....	86
Figura 47 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #05 com a câmera VIP 5550 Z IA após processo de remoção de distorção, manipulação e adição de reta colinear aos centros de eixo do veículo. ....	86
Figura 48 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de média nitidez, velocidade de referência de 28,8 km/h. ....	87
Figura 49 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de alta nitidez, velocidade de referência de 28,8 km/h. ....	87
Figura 50 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de média nitidez, velocidade de referência de 43,9 km/h. ....	87
Figura 51 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de alta nitidez, velocidade de referência de 43,9 km/h. ....	87
Figura 52 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de média nitidez, velocidade de referência de 52,9 km/h. ....	88
Figura 53 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de alta nitidez, velocidade de referência de 52,9 km/h. ....	88

Figura 54 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de média nitidez, velocidade de referência de 64,8 km/h.....	88
Figura 55 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de alta nitidez, velocidade de referência de 64,8 km/h.....	88
Figura 56 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de média nitidez, velocidade de referência de 86,4 km/h.....	88
Figura 57 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de alta nitidez, velocidade de referência de 86,4 km/h.....	88
Figura 58 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as combinações das marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de média nitidez, velocidade de referência de 28,8 km/h.....	89
Figura 59 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as combinações das marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de alta nitidez, velocidade de referência de 28,8 km/h.....	89
Figura 60 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as combinações das marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de média nitidez, velocidade de referência de 43,9 km/h.....	89
Figura 61 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as combinações das marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de alta nitidez, velocidade de referência de 43,9 km/h.....	89
Figura 62 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as combinações das marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de média nitidez, velocidade de referência de 52,9 km/h.....	90
Figura 63 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as combinações das marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de alta nitidez, velocidade de referência de 52,9 km/h.....	90
Figura 64 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as combinações das marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de média nitidez, velocidade de referência de 64,8 km/h.....	90

Figura 65 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as combinações das marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de alta nitidez, velocidade de referência de 64,8 km/h. ....	90
Figura 66 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as combinações das marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de média nitidez, velocidade de referência de 86,4 km/h. ....	90
Figura 67 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as combinações das marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de alta nitidez, velocidade de referência de 86,4 km/h. ....	90
Figura 68 – Distribuições dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de média nitidez utilizando o método proposto, velocidade de referência de 28,8 km/h. ....	91
Figura 69 – Distribuições dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de alta nitidez utilizando o método proposto, velocidade de referência de 28,8 km/h. ....	91
Figura 70 – Distribuições dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de média nitidez utilizando o método proposto, velocidade de referência de 43,9 km/h. ....	91
Figura 71 – Distribuições dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de alta nitidez utilizando o método proposto, velocidade de referência de 43,9 km/h. ....	91
Figura 72 – Distribuições dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de média nitidez utilizando o método proposto, velocidade de referência de 52,9 km/h. ....	92
Figura 73 – Distribuições dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de alta nitidez utilizando o método proposto, velocidade de referência de 52,9 km/h. ....	92
Figura 74 – Distribuições dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de média nitidez utilizando o método proposto, velocidade de referência de 64,8 km/h. ....	92
Figura 75 – Distribuições dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de alta nitidez utilizando o método proposto, velocidade de referência de 64,8 km/h. ....	92



Figura 76 – Distribuições dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de média nitidez utilizando o método proposto, velocidade de referência de 86,4 km/h. .... 92

Figura 77 – Distribuições dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de alta nitidez utilizando o método proposto, velocidade de referência de 86,4 km/h ..... 92

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Especificações da câmera Intelbras VIP 1130 B G3 (baixa definição).	
.....	45
Quadro 2 – Especificações da câmera Intelbras VIP 3260 Z G2 (média definição).	
.....	45
Quadro 3 – Especificações da câmera Intelbras VIP 5550 Z IA (alta definição).	
.....	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Passagens escolhidas para o experimento e suas respectivas velocidades, valor em km/h.....	44
Tabela 2 – Resultados das equações (56) e (57). .....	54
Tabela 3 – Velocidades médias, desvios padrões e erros percentuais (em relação ao método de projeção reversa) obtidos para as estimativas realizadas pelos voluntários utilizando o método da razão cruzada convencional. ....	60
Tabela 4 – Comparação das médias das distribuições obtidas a partir das combinações de marcações dos participantes e pelas FDPs. Velocidade em km/h. ....	67
Tabela 5 – Comparação das médias das distribuições obtidas a partir das combinações de marcações e pelas FDPs. Velocidade em km/h. ....	93
Tabela 6 – Comparação das médias das distribuições obtidas a partir das combinações de marcações e pelas FDPs. Velocidade em km/h. ....	93

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CFTV – Circuito Fechado de Televisão

ETR – Espaço Tridimensional Real

EBD – Espaço Bidimensional Digital

FDP – Função Densidade Probabilidade

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1	OBJETIVOS .....	19
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>19</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>19</b>
1.2	ESTRUTURA DO DOCUMENTO .....	19
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>21</b>
2.1	ESTIMAÇÃO DE VELOCIDADE EM EXAMES FORENSES.....	21
2.2	ESTIMAÇÃO DA VELOCIDADE POR VIDEOANÁLISE .....	22
<b>2.2.1</b>	<b>Estimação da Velocidade por Projeção Reserva.....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Estimação da Velocidade por Modelagem Tridimensional .....</b>	<b>23</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Estimação da Velocidade por Razão Cruzada.....</b>	<b>24</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Outras Formas de Razão Cruzada.....</b>	<b>28</b>
<b>2.2.5</b>	<b>Outros Métodos de Estimação de Velocidade .....</b>	<b>29</b>
2.3	INCRTEZA DA ESTIMAÇÃO DA VELOCIDADE.....	30
<b>3</b>	<b>PROPOSTA DO MÉTODO DA RAZÃO CRUZADA GENERALIZADA ..</b>	<b>32</b>
3.1	ESTIMAÇÃO DOS INTERVALOS DE EXISTÊNCIA .....	32
3.2	MODELAGEM DAS VARIÁVEIS ALEATÓRIAS.....	33
3.3	MÉTODO DA RAZÃO CRUZADA GENERALIZADA .....	35
3.4	FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE DA VELOCIDADE .....	36
3.5	CONFIABILIDADE DA ESTIMAÇÃO DA VELOCIDADE .....	39
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>41</b>
4.1	EXEMPLO DA UTILIZAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO .....	41
4.2	EXPERIMENTOS DE VERIFICAÇÃO.....	42
<b>4.2.1</b>	<b>Captura da trajetória de um veículo em movimento .....</b>	<b>43</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Participação de Peritos Forenses.....</b>	<b>51</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>52</b>
5.1	EXEMPLO DA UTILIZAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO .....	52

5.1.1	<b>Determinação da Probabilidade para um Intervalo Arbitrário de Velocidade</b>	
	<b>52</b>	
5.1.2	<b>Determinação do Intervalo de Incerteza da Estimativa da Velocidade Média</b>	
	<b>54</b>	
5.2	EXPERIMENTOS DE VERIFICAÇÃO: MÉTODO CONVENCIONAL .....	56
5.2.1	<b>Comparação entre Cenários .....</b>	<b>59</b>
5.3	EXPERIMENTOS DE VERIFICAÇÃO: MÉTODO PROPOSTO .....	60
5.3.1	<b>Resultados com Voluntários .....</b>	<b>61</b>
5.3.2	<b>Reforço Artificial do Conjunto de Dados .....</b>	<b>64</b>
6	<b>DISCUSSÃO .....</b>	<b>68</b>
6.1	UTILIZAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO .....	68
6.2	EXPERIMENTOS COM O MÉTODO CONVENCIONAL .....	68
6.3	EXPERIMENTOS COM O MÉTODO PROPOSTO .....	69
6.4	DISCUSSÃO GERAL .....	70
7	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>72</b>
7.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	72
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>74</b>
	<b>ANEXO A – Integração de Monte Carlo.....</b>	<b>78</b>
	<b>APÊNDICE A – Imagens utilizadas no Experimento .....</b>	<b>79</b>
	<b>APÊNDICE B – Resultados para as câmeras de média e alta nitidez .....</b>	<b>87</b>
	<b>APÊNDICE C – Termo de Consentimento Livre e Esclarecido .....</b>	<b>94</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Sistemas de segurança baseados em dispositivos de gravação de imagens estão amplamente presentes em espaços urbanos, sendo cada vez mais comum o registro de eventos delituosos por circuitos fechados de televisão (CFTV) (Wright, et al., 2010). Dessa forma, a utilização de vídeos para fins de produção de prova material tornou-se uma atividade rotineira pelas polícias científicas de diversos países do mundo (Porter, 2011). Uma das principais áreas de aplicação é o esclarecimento de infrações de trânsito.

Lesões de trânsito são a oitava maior causa de morte de pessoas em todas as faixas etárias. Em 2016, 1,35 milhão de pessoas morreram no mundo em consequência de ocorrências de trânsito e esse número segue aumentando desde então. Uma importante causa dessas mortes é o excesso de velocidade (World Health Organization, 2018). Assim sendo, o conhecimento da velocidade dos veículos envolvidos em uma ocorrência, em instantes anteriores ao momento do evento, é de substancial relevância para que se possa esclarecer suas causas.

A estimativa de velocidade por videoanálise de cenas registradas por CFTVs é um método conveniente e amplamente aceito no âmbito jurídico. As imagens de instantes anteriores à situação em que figuram os veículos envolvidos também permitem o conhecimento de fatores concorrentes às circunstâncias, como o trajeto percorrido pelo(s) veículo(s) e a localização do evento (Kim, Oh, Choi, & Park, 2018).

As técnicas comumente utilizadas para estimativa de velocidade por videoanálise são baseadas no cálculo da velocidade média do veículo em um determinado trecho da sequência de vídeo. Para estimar o lapso temporal do trajeto percorrido pode-se utilizar a razão entre a diferença de quadros do ponto final ao ponto inicial do trajeto e a taxa de quadros por segundo (obtida a partir dos metadados do arquivo associado ao dispositivo gravador); ou ainda o total de quadros dividido pelo tempo total do arquivo, desde que a gravação tenha sido feita em taxa constante (Wong, Tao, Wong, & Tam, 2014, Mieremet, Alberink, Hoogeboom, & Vrijdag, 2018 e Compton, Hague, & Murphy, 2003).

Existem diferentes métodos para a estimação da distância percorrida. Quando o dispositivo gravador está acessível, é possível utilizar o método de fotogrametria por projeção reversa, realizando a sobreposição das imagens do evento com as capturadas a posteriori em um gabarito (Brandon & Westlake, 2019). Os principais inconvenientes deste método são a necessidade do deslocamento de equipe pericial até o local e a mobilização de recursos econômicos para a realização de experimentos controlados. Quando não é possível ou não é de

interesse a realização desses experimentos, é comumente utilizado o método da razão cruzada (Wong, Tao, Wong, & Tam, 2014).

O método da razão cruzada permite a estimação da velocidade do veículo utilizando apenas o vídeo disponibilizado, sem que seja necessário o deslocamento do perito até o local do evento, minimizando os custos envolvidos e o tempo necessário para a obtenção do laudo pericial. Este método baseia-se na propriedade de que quatro pontos colineares no espaço tridimensional (ETR) apresentam uma projeção também colinear em um espaço bidimensional (EBD) (Brannan, Esplen, & Gray, 2012). Assim sendo, conhecendo-se as distâncias entre os pontos no EBD e havendo uma referência associada ao ETR então é possível determinar as distâncias no ETR (Wong, Tao, Wong, & Tam, 2014). Para sua implementação, o método da razão cruzada utiliza duas imagens sucessivas do vídeo. Embora diferentes pontos de referência possam ser empregados, a distância entre eixos do veículo é a mais utilizada, por ser geralmente bem definida e de fácil obtenção em deslocamentos não paralelos à linha de visada da câmera.

Arquivos de vídeos provindos de CFTVs, via de regra, possuem limitações relacionadas à qualidade, o que diminui a acurácia do processo de estimação da velocidade, acrescentando imprecisão ao resultado (Seckiner, Mallet, Roux, Meuwly, & Maynard, 2018). Portanto, mesmo de posse de uma estimativa de velocidade respaldada por técnicas eficazes e com substrato científico, os técnicos forenses necessitam esclarecer também o grau de precisão (Espindula & Tocchetto, 2019). A partir dessa necessidade, formas de quantificação de incertezas dos processos de medição por videoanálise têm sido estudadas. A mais comum tem sido a realização de experimentos controlados para a reprodução do evento de interesse, utilizando veículos semelhantes aos envolvidos na ocorrência e aparelhos acreditados (Mieremet, Alberink, Hoogeboom, & Vrijdag, 2018 e Hoogeboom & Alberink, 2010). Entretanto, esses experimentos, da mesma forma que no método de fotogrametria de projeção reversa, possuem um elevado custo em termos de recursos financeiros e humanos envolvidos.

A partir do exposto, é de grande interesse para a comunidade de peritos criminais o estudo e desenvolvimento de técnicas que permitam a avaliação de incertezas no processo de estimação de velocidade por videoanálise, em especial em relação às degradações comumente encontradas em vídeos adquiridos por CFTVs.



## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral e os objetivos específicos desta dissertação são apresentados a seguir.

### 1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo a proposição de uma generalização do método de razão cruzada para estimação de velocidade em aplicações de videoanálise forense. Medidas adicionais no espaço bidimensional são utilizadas para a modelagem de incertezas decorrentes de borrões de movimento e artefatos, na forma de variáveis aleatórias. Essas informações permitem a caracterização de uma função densidade de probabilidade associada ao valor da velocidade estimada.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, elencam-se:

- realizar uma revisão das principais técnicas para estimação de velocidade de veículos em aplicações de videoanálise forense;
- descrever e especificar o método de razão cruzada;
- propor uma generalização do método de razão cruzada de forma a fornecer informações sobre a incerteza associada à estimação de velocidade;
- demonstrar a aplicação do método proposto através de simulações e experimentos.

## 1.2 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Na seção 2 é apresentada uma revisão da literatura, discutindo e qualificando os métodos disponíveis para estimativa de velocidade por videoanálise em aplicações forenses. A partir da caracterização do método de razão cruzada, na seção 3 é apresentada uma proposta de generalização deste método, de forma a permitir inferências sobre a confiabilidade dos resultados.

Na seção 4 são descritos os materiais e os métodos utilizados para a demonstração e avaliação da proposta, enquanto que na seção 5 são apresentados os resultados obtidos. Na seção 6 é realizada a discussão o trabalho. Finalizando, na seção 7 é apresentada a conclusão.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão da literatura e contextualização do exame forense de estimativa de velocidade. Além disso, os estudos relevantes na área são analisados e categorizados de acordo com as técnicas utilizadas e em relação à necessidade de comparecimento *in loco* pelo perito criminal. São discutidas as vantagens e desvantagens de cada método, como também a possibilidade de quantificação de incertezas nas estimativas obtidas.

### 2.1 ESTIMAÇÃO DE VELOCIDADE EM EXAMES FORENSES

O processo de estimação de velocidade por videoanálise é realizado em exames periciais para a determinação da velocidade desenvolvida por veículos envolvidos em ocorrências de trânsito, como crimes e acidentes. O ponto de partida para o procedimento é a disponibilidade de um arquivo de vídeo em que o veículo questionado<sup>1</sup> é registrado trafegando.

Existem dois elementos que impactam sobremaneira a qualidade do resultado do processo de estimação de velocidade por videoanálise. O primeiro é a possibilidade de visita ao local em que o veículo foi gravado. Nas situações em que isso é possível, pode-se extrair medidas *in loco*, que podem ser utilizadas em conjunto aos arquivos de vídeo para aumentar a acurácia da estimação da distância percorrida pelo veículo questionado. Note-se, porém, que em grande parte das vezes não é possível retornar ao local em questão, seja pela distância ao local onde ocorreu o evento, pelo tempo requerido para a finalização do laudo pericial, ou ainda pela indisponibilidade ou limitação de recursos humanos e/ou financeiros. O segundo elemento é o conhecimento do conjunto de características da câmera. Informações detalhadas de seus parâmetros e características podem possibilitar a compensação de distorções das imagens, que são especialmente impactantes em dispositivos de baixo custo, como é o caso das câmeras empregadas em CFTVs.

Em grande parte das situações é economicamente inviável tanto visitar o local da ocorrência quanto ter acesso às características intrínsecas da câmera. Nesses casos, as incertezas associadas podem diminuir a acurácia e a precisão das estimativas desejadas.

---

<sup>1</sup> Veículo cuja velocidade deseja-se descobrir, veículo de interesse.

## 2.2 ESTIMAÇÃO DA VELOCIDADE POR VIDEOANÁLISE

A seguir são apresentados os principais métodos de estimação de velocidade por videoanálise.

### 2.2.1 Estimação da Velocidade por Projeção Reserva

No trabalho desenvolvido por Compton et al. (Compton, Hague, & Murphy, 2003), introduziu-se o exame de estimação de velocidade por videoanálise para fins forenses. Para tanto, foram apresentadas duas possibilidades para determinação da distância percorrida pelo veículo questionado: na primeira, é necessário o retorno da equipe pericial ao local do fato, devendo-se analisar o CFTV em tempo real, com a determinação dos pontos de referência; na segunda, são utilizadas distâncias preliminarmente conhecidas na cena, de modo que o retorno ao local não é necessário. O segundo procedimento, conforme citado pelo autor, implica em possíveis erros de paralaxe<sup>2</sup>, que podem prejudicar o resultado do exame. Em contrapartida, no primeiro procedimento, os custos de retorno ao local podem ser muito elevados.

No método de projeção reversa (Hoogeboom & Alberink, 2010), também chamado de método da superposição, é preciso que os peritos retornem ao local da ocorrência e realizem medidas *in loco* com o mesmo CFTV utilizado para o registro da ocorrência. Ou seja, é preciso que a câmera não tenha sido alterada, sofrido mudança de posição ou passado por processo de deterioração que altere as características apresentadas no momento do evento. São utilizados gabaritos ou referências com distâncias conhecidas no local do evento e em sequência capturam-se imagens a partir do CFTV. De posse das imagens, realiza-se a sobreposição dos registros originais com as referências, utilizando um *software* adequado (Brandon & Westlake, 2019). Outra maneira de se determinar a distância percorrida é utilizando referências já conhecidas na via, como distância entre postes, faixas, semáforos etc. (Hoogeboom & Alberink, 2010). A partir da imagem com gabaritos de distância sobrepostos à trajetória do veículo, pode-se descobrir qual foi a distância percorrida, definindo os pontos inicial e final. Para extração do tempo decorrido, utilizam-se os metadados do arquivo de vídeo.

Kumar et al. (2016) propuseram um procedimento para estimar a velocidade desenvolvida pelos veículos que trafegavam numa zona de vigilância, a partir de registros em vídeo. A distância de referência, conhecida previamente, era o comprimento da zona de

---

<sup>2</sup> Diferença entre a posição real do objeto e a posição observada a partir da imagem.

vigilância, enquanto o lapso temporal era calculado pela taxa de quadros por segundo da gravação sobre o número de quadros em que o veículo foi detectado sobre a zona de vigilância. O procedimento depende de um sistema de detecção automática de veículos, para constatar se há veículos sobre a zona de vigilância.

Mais recentemente, Barndon e Westlake (2019) discutiram a estimação da velocidade por projeção reversa para fins forenses. No caso, a determinação da distância se fazia com uma equipe pericial composta por no mínimo duas pessoas. Uma, ao visualizar as imagens no mesmo CFTV que capturou o evento de interesse, informava as posições de interesse para a outra que, *in loco*, realizava a marcação com gabaritos para posterior sobreposição aos registros do dia do fato. A determinação do lapso temporal era realizada através da análise dos metadados do arquivo de vídeo.

Lee *et al.* (2021) apresentaram uma comparação de valores de distância obtidos a partir de sinalizações horizontais de trânsito, levando em consideração as normativas para estipulação das marcações e de medidas no sistema *Google Earth Pro*. Após comparações com valores medidos *in loco* em 147 ocorrências, o estudo mostrou resultados satisfatórios para o uso das medidas obtidas a partir das sinalizações horizontais de trânsito em combinação com o *Google Earth Pro*, podendo-se aplicar o procedimento para determinar a dinâmica de ocorrências de trânsito em que o acesso ao local não é possível. Considerando intervalos de medida maiores do que 20 metros, mais de 95% dos casos possuíam erros menores do que 5% quando seus valores eram comparados às medidas no local.

No trabalho de Bruehs e Stout (2021) discutiu-se o procedimento de projeção reversa para estimação de velocidade, comparando valores de medida obtidos a partir de 5 gravadores digitais de vídeo, do valor apresentado no velocímetro do veículo e do valor obtido por meio de um radar de velocidade de efeito *Doppler*. Desmoulin *et al.* (2022) apresentaram a metodologia de projeção reversa para determinar a posição de um objeto quando tanto a câmera quanto o objeto estão em movimento em relação à cena.

### **2.2.2 Estimação da Velocidade por Modelagem Tridimensional**

Em 2006, Pagounis *et al.* (2006) apresentaram o uso de um escâner tridimensional para uso em local de acidente de trânsito. Osmand e Tahar (2016) propuseram uma técnica de modelagem tridimensional a partir das imagens obtidas pelas câmeras fotográficas no local do fato.

No estudo proposto por Kolla *et al.* (2022) apresenta-se um procedimento para reconstrução de ocorrências de trânsito a partir dos registros de imagem obtidos em combinação com o escaneamento tridimensional (FARO, 2021). Para tanto, utiliza-se o procedimento de *câmera matching*, em que, valendo-se do conhecimento das características intrínsecas da câmera, é possível determinar as coordenadas no ETR a partir dos pontos do EBD (Abdel-Aziz & Karara, 2015) através de:

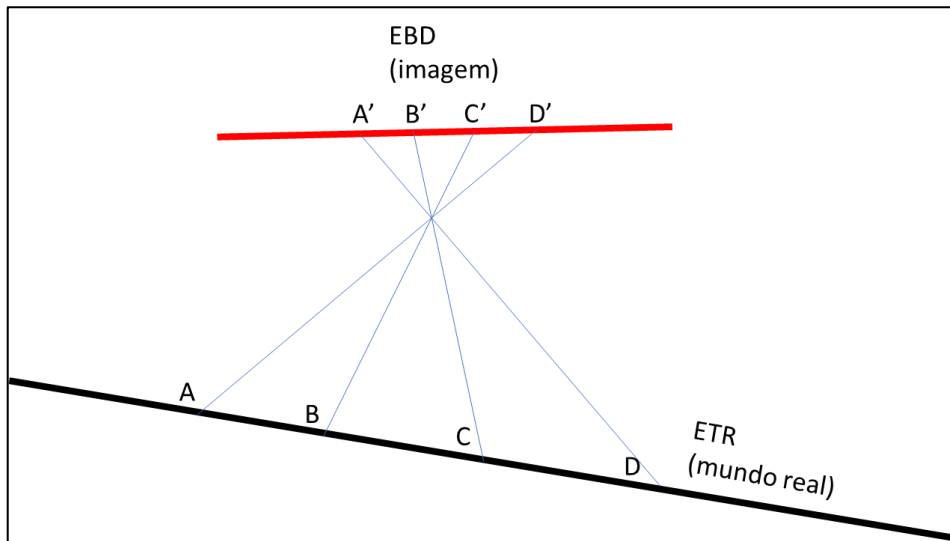
$$\begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ -C \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

em que  $\bar{x}$  e  $\bar{y}$  são as coordenadas no EBD;  $C$  é a constante da câmera;  $\lambda$  é o fator de escala;  $X - X_0$ ,  $Y - Y_0$ , e  $Z - Z_0$  são as coordenadas do objeto no ETR em relação à posição da câmera; e  $a_{ij}$  são os coeficientes da transformação. A partir das informações obtidas das imagens e do ambiente tridimensional simulado, os eventos são reconstruídos em *software* apropriado (Moser & Burg, 2017) e outras vistas podem ser tomadas em relação à dinâmica dos fatos, bem como torna-se possível extrair as medidas associadas aos eventos. Destaca-se que neste método é necessário o retorno ao local da ocorrência para que se possa realizar o escaneamento tridimensional do ambiente.

### 2.2.3 Estimação da Velocidade por Razão Cruzada

O método da razão cruzada (Wong, Tao, Wong, & Tam, 2014) baseia-se na propriedade de que quatro pontos colineares de interesse  $\{A, B, C, D\}$  no espaço tridimensional real (mundo real), após serem projetados para um espaço bidimensional  $\{A', B', C', D'\}$ , permanecem colineares no novo espaço, também chamado de espaço bidimensional digital (Figura 1). Essa é exatamente a transformação que ocorre no processo de captura de imagem por câmeras.

Figura 1 – Transformação projetiva de uma reta do espaço tridimensional (ETR) para o espaço bidimensional digital (EBD).



Fonte: autor (2022).

A razão cruzada é um número associado a uma lista de quatro pontos colineares, no espaço tridimensional em questão, que pode ser definido como (Brannan, Esplen, & Gray, 2012)

$$(A, B; C, D) = \frac{\frac{|AC|}{|CB|}}{\frac{|AD|}{|DB|}}. \quad (2)$$

Pode-se demonstrar que, utilizando as mesmas medidas entre os pontos projetados no espaço bidimensional (Figura 1), tem-se

$$(A', B'; C', D') = \frac{\frac{|A'C'|}{|C'B'|}}{\frac{|A'D'|}{|D'B'|}}, \quad (3)$$

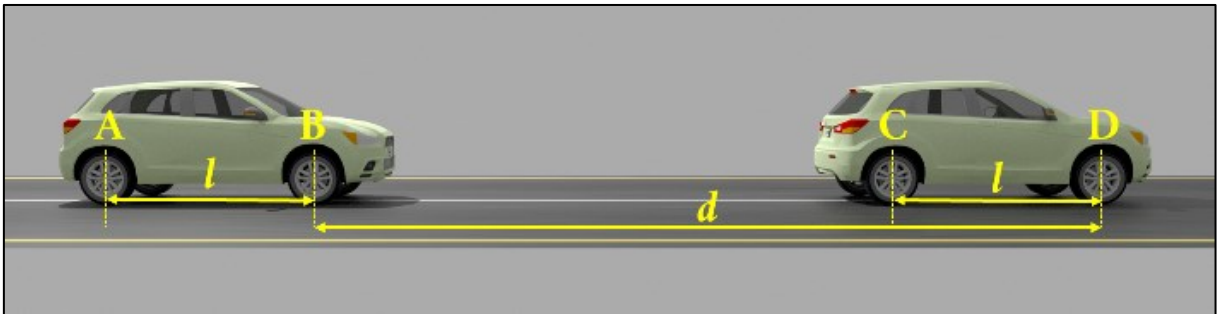
podendo-se obter a equação (Brannan, Esplen, & Gray, 2012)

$$(A, B; C, D) = (A', B'; C', D'). \quad (4)$$

A Figura 2 representa o deslocamento de um veículo no ETR, indicando a distância percorrida ( $d$ ) e a distância entre os centros de eixo ( $l$ ), enquanto que a Figura 3 apresenta a sobreposição de dois quadros de um vídeo que captura o deslocamento de um veículo.

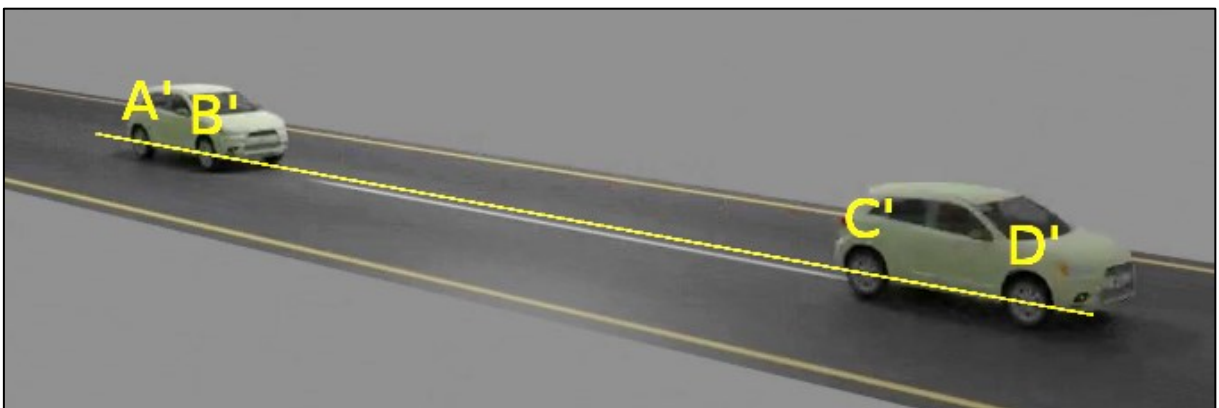
O método da razão cruzada pode ser utilizado em qualquer situação cuja trajetória do veículo seja retilínea e em que quatro pontos colineares sejam identificáveis. Um caso bastante comum é quando o ângulo da linha de visada da câmera em relação à trajetória do veículo permite a captura dos centros de eixo (tanto no quadro inicial quanto no quadro final) e a trajetória é linear. Nesta situação, pode-se utilizar os centros de eixo como os pontos A, B, C e D no ETR que, quando projetados para o EBD, são expressos como A', B', C' e D'. No restante do trabalho, assume-se que os centros de eixo são visíveis e que a trajetória do veículo é linear. Todavia, o procedimento também pode ser aplicado nas circunstâncias em que há outros pontos colineares identificáveis.

Figura 2 – Trajetória percorrida pelo veículo no ETR.



Fonte: autor (2022)

Figura 3 – Trajetória percorrida pelo veículo no EBD.



Fonte: autor (2022)

Os segmentos de reta obtidos a partir dos pontos colineares A, B, C e D podem ser expressos em função das dimensões do veículo (disponíveis nos manuais das fabricantes) e de seu deslocamento, de modo que  $|AB| = l$ ,  $|AC| = d$ ,  $|AD| = d+l$ ,  $|BC| = d-l$ ,  $|BD| = d$ ,  $|CD| = l$ , em que  $d$  é a distância percorrida pelo veículo e  $l$  é a sua distância entre eixos (característica



construtiva de pouca variação). Substituindo-se (3) em (4) e utilizando-se as medidas do veículo, tem-se

$$(A', B'; C', D') = \frac{d l (d - l)}{(d + l) l d} = \frac{d^2}{d^2 - l^2}. \quad (5)$$

Manipulando-se (5) chega-se em

$$d = l \sqrt{\frac{(A', B'; C', D')}{(A', B'; C', D') - 1}}, \quad (6)$$

em que se despreza a solução negativa, tendo em vista que  $d$  só pode possuir valores positivos.

Para estimar o lapso temporal  $\Delta t$  entre o ponto inicial e final da trajetória, pode-se utilizar a informação da taxa de atualização de quadros, proveniente dos metadados do arquivo de vídeo. Portanto,

$$\Delta t = \frac{q_f - q_i}{fps}, \quad (7)$$

em que  $q_f$  é número do quadro final,  $q_i$  é o número do quadro inicial, e  $fps$  é o número de quadros por segundo da gravação.

A partir de (6) e (7) determina-se a velocidade média desenvolvida pelo veículo no trecho em questão ( $v$ )

$$v = \frac{d}{\Delta t}. \quad (8)$$

Também é possível aplicar o método da razão cruzada nos casos em que o veículo possui câmera embarcada. Nesse caso, pode-se utilizar medidas da via como referência, como o comprimento das faixas ou distância entre pontos fixos (Han, 2016).

Quando comparado ao método da projeção reversa, este método se mostra mais conveniente nas circunstâncias em que o dispositivo gravador não está mais acessível ou, ainda, nos casos em que o retorno ao local da ocorrência não é possível ou viável. Isto pelo fato de que o método da razão cruzada independe dos fatores intrínsecos e extrínsecos da câmera, de modo que a técnica pode ser aplicada numa enorme gama de circunstâncias.

Entretanto, nos casos em que a trajetória do veículo é paralela em relação à linha de visada da câmera, podem ser utilizados outros pontos de referência que não os centros de eixo, tendo em vista que a lateral do veículo não pode ser acessada (Costa, Rauen, & Fronza, 2020). Além disso, este procedimento é mais sensível à qualidade dos registros capturados, isto é, os

resultados são mais incertos à medida que a nitidez na região dos centros de eixo do veículo diminui.

#### 2.2.4 Outras Formas de Razão Cruzada

Além da razão cruzada definida no estudo de Wong et Al. (2014)

$$(A, B; C, D) = \frac{\frac{|AC|}{|AD|}}{\frac{|CB|}{|DB|}} = \frac{\frac{d}{d+l}}{\frac{d-l}{d}} = \frac{d^2}{d^2-l^2}, \quad (9)$$

existem outras duas possibilidades de formulação, sendo elas

$$(A, C; B, D) = \frac{\frac{|BC|}{|AD|}}{\frac{|AB|}{|DC|}} = \frac{\frac{d-l}{d+l}}{\frac{l}{l}} = \frac{d+l}{d-l} \quad (10)$$

e

$$(B, C; A, D) = \frac{\frac{|BA|}{|BD|}}{\frac{|AC|}{|DC|}} = \frac{\frac{l}{d}}{\frac{l}{l}} = \frac{l^2}{d^2}. \quad (11)$$

Uma possibilidade pela qual os segmentos  $|AB|$  e  $|CD|$  não tenham sido utilizadas no estudo de Wong *et al.* (2014) é que eles seriam as menores distâncias do conjunto no ETR, para os casos nos quais o deslocamento é maior do que a distância entre eixos ( $d > l$ ), de maneira que essas medidas estariam sujeitas a maiores erros de medição no EBD. Entretanto, isso não é verdade para os casos nos quais o deslocamento é menor do que a distância entre eixos, como é o caso de (10) e (11).

As equações (9), (10) e (11) resultam, respectivamente, em

$$d^2 = \frac{(A, B; C, D)}{(A, B; C, D) - 1} l^2, \quad (12)$$

$$d^2 = \frac{1 + (A, C; B, D)}{(A, C; B, D)} l^2 \quad (13)$$

e

$$d^2 = \frac{1}{(B, C; A, D)} l^2. \quad (14)$$

Se as medidas no EBD forem perfeitas, então os resultados das equações (12), (13) e (14) serão idênticos.

### 2.2.5 Outros Métodos de Estimação de Velocidade

O trabalho de Bourzeix *et al.* (2014) analisa uma estratégia baseada em visão estereoscópica, isto é, com o uso concomitante de duas ou mais câmeras. Os resultados obtidos apresentaram pequenos erros de estimação em comparação à velocidade de referência. Entretanto, como a distância percorrida pelo veículo é obtida a partir da distância do veículo em relação às câmeras, é necessário que os parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera sejam conhecidos (Mrovlje & Vrančić, 2008). O método abordado por Golban e Nedevschi (2013) também demanda o conhecimento dos fatores intrínsecos da câmera.

No trabalho de Liu *et al.* (2017) foi apresentado um método para a estimação da distância percorrida por um veículo a partir da equivalência entre a distância entre eixos do veículo questionado e o número de pixels da imagem. Nesse procedimento, utilizam-se dois quadros subsequentes do vídeo e calcula-se o deslocamento do veículo a partir da diferença de pixels entre um ponto inicial e final. A incerteza foi definida como 0,25 pixels ao redor do centro de eixo. Em um certo conjunto de casos, esse método permite estimar a velocidade de uma maneira muito simples. Ressalta-se, entretanto, que esse método apresenta importantes limitações que podem afetar a estimativa, pois não leva em consideração as características intrínsecas da câmera, como distância focal e tamanho do sensor (Hartley & Andrew, 2003). Dessa forma, caso o ângulo entre a trajetória do veículo e a linha de visada da câmera não seja perpendicular, o ponto de referência não seja adequadamente determinado, o trecho percorrido não seja realizado em linha reta ou exista algum efeito de distorção, a relação entre a dimensão dos pixels e a distância real é prejudicada.

O método discutido em Kim *et al.* (2018) propõe a aplicação de um plano digital no arquivo de vídeo (KINOVEA, s.d.), a partir do qual podem ser descobertas as distâncias percorridas pelos veículos capturados na imagem. As medidas do plano são obtidas com auxílio de *software* específico, utilizando medidas da cena. O estudo comparou os resultados com valores de referência obtidos a partir de um sistema de posicionamento global de alta frequência. Em sua conclusão, aponta que um erro de 5% deve ser considerado para o método. Embora o procedimento mostre-se interessante, os passos implícitos não apresentados prejudicam a sua reprodução, algo indesejável no campo das ciências forenses (Espindula & Tocchetto, 2019).

Costa *et al.* (2020) apresentaram um método para determinação da velocidade do veículo em que a trajetória é paralela à linha de visada da câmera, utilizando razão de escala, a partir do conhecimento da largura do veículo. O método pode ser aplicado tanto nas circunstâncias em que as características intrínsecas da câmera são conhecidas quanto nas situações em que não são. O método torna-se ainda mais interessante pelo fato do perito criminal não necessitar retornar ao local do fato. A distância do objeto de interesse em relação à câmera é dada por

$$D = \frac{R W}{r w} f \quad \text{ou} \quad D = \frac{R H}{r h} f, \quad (15)$$

em que  $R$  é o comprimento de um objeto no ETR,  $r$  é o comprimento do objeto no EBD,  $W$  é a largura (ou  $H$  a altura) da imagem,  $w$  é a largura (ou  $h$  a altura) do sensor e  $f$  é a distância focal. Nas situações em que as informações da câmera não são acessíveis, pode-se estimá-las a partir do conhecimento de algum objeto com dimensão e distância conhecidas em relação à câmera, de modo que

$$f_x = \frac{rD}{R} \quad \text{ou} \quad f_y = \frac{rD}{R}, \quad (16)$$

em que

$$f_x = \frac{W}{w} f \quad \text{e} \quad f_y = \frac{H}{h} f. \quad (17)$$

### 2.3 INCERTEZA DA ESTIMAÇÃO DA VELOCIDADE

Na produção de prova material, é importante que os resultados sejam apresentados em conjunto com o grau de incerteza associado ao processo (Espindula & Tocchetto, 2019). A captura dos registros por imagem está associada a processos de distorção e introdução de artefatos prejudiciais ao exame. Entre os fatores que influenciam a qualidade das imagens capturadas pelas câmeras de CFTV, encontram-se: posicionamento da câmera não adequado para captura do evento de interesse; distorções oriundas de lentes com grande ângulo de abertura aliado a uma pequena distância focal (efeito barril); iluminação não adequada; sujidades; entre outros (Seckiner, Mallet, Roux, Meuwly, & Maynard, 2018).

Uma característica construtiva importante da maioria das câmeras de CFTV é a configuração *rolling shutter*, tendo em vista que seu processo de fabricação é mais barato e simples (Baumer, 2022). Os sensores das câmeras *rolling shutter* não são todos excitados ao mesmo tempo, mas sim de forma sequencial (Meingast, Christopher, & Shankar, 2005). Isso

acarreta maior efeito de borrão de movimento nas imagens produzidas por esse modelo de câmera ou efeito *skew* ao capturar objetos em movimento, especialmente em altas velocidades (Le, Le, & Jang, 2015) e em situações de longos períodos de abertura do obturador para possibilitar gravações em ambientes pouco iluminados. Em compensação, a construção é mais barata quando comparada aos modelos do tipo *global shutter*, em que todos os sensores são excitados ao mesmo tempo na captura de um quadro (Laroche & Kagami, 2009).

Fontes adicionais de incerteza são encontradas em situações nas quais a região de interesse ocupa uma área muito pequena da imagem, de maneira que a sua nitidez fica comprometida, ou ainda em casos de vídeos sujeitos a estratégias de compressão com perdas, como ocorre em alguns dispositivos comerciais de CFTV.

No trabalho de Hoogebom e Alberink (2010) foi proposto que as incertezas associadas à velocidade estimada fossem modeladas por uma função densidade de probabilidade *t* de student, utilizando 3 graus de liberdade para a distância e 21 para o tempo. Posteriormente, Mieremet *et al.* (2018) utilizaram intervalos de probabilidade e de confiança obtidos através de simulações Monte Carlo e cadeias de Markov (Gelman, et al., 2014). Todavia, para ambos os métodos, é necessária a realização de medições no local do evento, o que pode não ser conveniente ou economicamente viável.

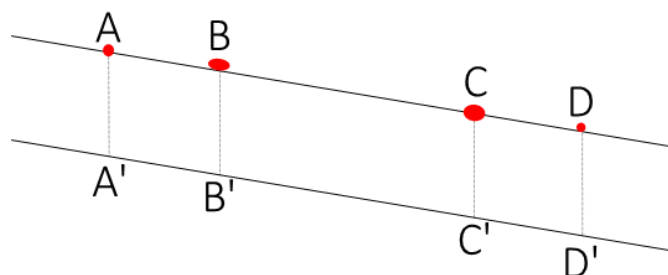
### 3 PROPOSTA DO MÉTODO DA RAZÃO CRUZADA GENERALIZADA

Nesta seção é apresentada uma proposta para modificação do método da razão cruzada para estimação de velocidade em aplicações de videoanálise forense. Este método utiliza informações de intervalos em vez de marcações pontuais para estimar a função densidade de probabilidade da velocidade estimada. Desta forma, o paradigma determinístico do método de razão cruzada convencional é expandido para uma forma probabilística.

#### 3.1 ESTIMAÇÃO DOS INTERVALOS DE EXISTÊNCIA

No método convencional da razão cruzada, originalmente apresentado por Wong *et al.* (2014), assume-se que o deslocamento é retilíneo. O processo de estimação da distância percorrida inicia sobrepondo-se duas imagens sucessivas (não necessariamente consecutivas) do veículo em questão. Em sequência, é determinado o segmento de reta que melhor se ajusta a uma primeira estimativa do centro de eixo das rodas, conforme a Figura 4. Como as estimativas iniciais dos centros de eixo acabam não ficando, necessariamente, sobrepostas ao segmento de reta, são determinados novos pontos sobre o segmento de reta que se configuram como as estimativas finais (determinísticas) dos centros de eixo. As distâncias entre esses pontos são então utilizadas para o cálculo da razão cruzada.

Figura 4 – Estimativa inicial dos centros de eixos e ajuste do segmento de reta.



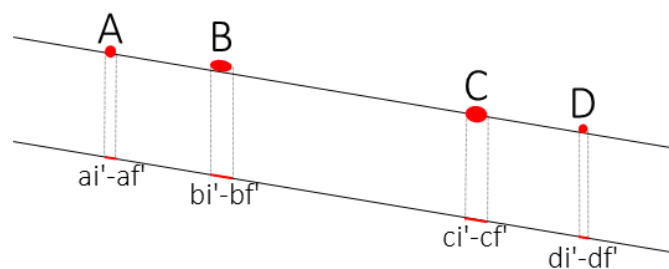
Fonte: autor (2022).

Note-se, entretanto, que a necessidade de mapeamento das regiões originalmente encontradas para os centros de eixo decorre de incertezas associadas às imagens disponíveis, o que pode levar a erros nas estimativas realizadas.

Uma possibilidade de incluir a incerteza associada ao processo de estimação seria definir os centros de eixo não mais como valores determinísticos (Figura 4), mas sim como intervalos de possibilidades (Figura 5). Dessa forma, as medidas de centro de eixo seriam interpretadas como variáveis aleatórias. A justificativa para isso reside no fato de que em algumas situações não é possível definir com exatidão a posição do centro de eixo, em função de artefatos sobre a imagem que impedem o acesso nítido às características do veículo (Seckiner, Mallet, Roux, Meuwly, & Maynard, 2018). Portanto, em algumas situações, as estimativas dos centros de eixo podem diferir demasiadamente do segmento de reta ajustado.

Dessa maneira, ao invés do perito criminal determinar pontos sobre o segmento de reta, arbitraría intervalos correspondentes às possibilidades de suas existências (Figura 5).

Figura 5 – Estimação dos intervalos ajustados à reta.



Fonte: autor (2022).

Além da incerteza associada à determinação da distância, existe também a incerteza associada ao tempo decorrido. Isso decorre do fato de que a maioria dos CFTV não possui taxas constantes de gravação de quadros (Brandon & Westlake, 2019). Assim, como para a definição da distância, também pode-se definir a taxa de gravação como uma variável aleatória.

### 3.2 MODELAGEM DAS VARIÁVEIS ALEATÓRIAS

Considerando-se  $A'$ ,  $B'$ ,  $C'$ ,  $D'$  e  $f_{ps}$  como variáveis aleatórias, é necessária a determinação de modelos para suas características estatísticas. Existem diferentes possibilidades, uma delas seria o uso da distribuição uniforme, uma vez que, a priori, não existem informações que valorizem ou desvalorizem qualquer ponto dentro do intervalo.

Uma segunda possibilidade mais interessante seria a função densidade de probabilidade (FDP) normal truncada (Burkardt, 2014) com média  $\mu$  e desvio padrão  $\sigma$ , que é definida por

$$f_x(x; \mu, \sigma, a, b) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma} \frac{\phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)}{\Phi\left(\frac{b-\mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{a-\mu}{\sigma}\right)} & a \leq x \leq b \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad (18)$$

em que

$$\phi(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2}\right) \quad (19)$$

é a distribuição normal padronizada e

$$\Phi(\eta) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{\eta}{\sqrt{2}}\right) \quad (20)$$

é a função distribuição cumulativa e  $\operatorname{erf}(x)$  é a função erro de Gauss, dada por

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt. \quad (21)$$

Adicionalmente aos limites do intervalo no qual o valor desejado se encontra, a FDP Normal truncada possui dois parâmetros de conformação: a média ( $\mu$ ) e o desvio padrão ( $\sigma$ ).

Nas situações em que  $|a| \ll \mu - \sigma$  e  $|b| \gg \mu + \sigma$  a distribuição aproxima-se de uma Gaussiana convencional, de forma que

$$f_x(x; \mu, \sigma, a, b) \approx \begin{cases} \frac{1}{\sigma} \phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) & a \leq x \leq b \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}. \quad (22)$$

Caso  $\sigma \gg b-a$ , a FDP Normal truncada aproxima-se da FDP uniforme

$$f_x(x; \mu, \sigma, a, b) \approx \begin{cases} \frac{1}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad (23)$$

que é uma suposição razoável quando não se possui informações sobre  $\mu$  e  $\sigma$  (Dietrich, 1991, p. 112).

Finalmente, caso  $\sigma \cong 0$  e  $b-a \cong 0$  então a PDF tende para o valor determinístico da média, que seria equivalente ao método proposto por Wong *et al.* (2014).



### 3.3 MÉTODO DA RAZÃO CRUZADA GENERALIZADA

A partir do exposto na seção 2.2.3, a velocidade do veículo em questão pode ser estimada a partir do método de razão cruzada considerando

$$v = \frac{d}{\Delta t}, \quad (24)$$

em que  $v$  é a velocidade do veículo,  $d$  seu deslocamento, e  $\Delta t$  o intervalo de tempo entre os pontos inicial e final e

$$\Delta t = (q_f - q_i) / fps, \quad (25)$$

em que  $q_f$  é o número do quadro associado à posição final do veículo,  $q_i$  é o número do quadro associado à posição inicial, e  $fps$  é taxa de gravação de quadros do arquivo de vídeo.

A razão cruzada no ETR é dada por

$$(B, C; A, D) = \frac{|BA|/|AC|}{|BD|/|DC|} = \frac{l^2}{d^2}, \quad (26)$$

em que  $l$  é a distância entre eixos. A razão cruzada no EBD é dada por

$$(B', C'; A', D') = \frac{|B'A'|/|A'C'|}{|B'D'|/|D'C'|}. \quad (27)$$

Como a razão cruzada é preservada em transformações projetivas (Brannan, Esplen, & Gray, 2012), tem-se que

$$(B, C; A, D) = (B', C'; A', D'). \quad (28)$$

Substituindo-se (25), (26), (27) e (28) em (24) chega-se a

$$v = \frac{l}{q_f - q_i} fps \sqrt{\frac{|B'D'|/|A'C'|}{|B'A'|/|D'C'|}}. \quad (29)$$

Assumindo-se que os intervalos disponíveis são definidos em um espaço unidimensional de possibilidades para as variáveis em questão, podemos definir a estimativa de velocidade segundo o método de razão cruzada generalizada como

$$\mathbf{V} = \frac{l}{q_f - q_i} \sqrt{\mathbf{F}^2 \frac{(\mathbf{D}' - \mathbf{B}')(\mathbf{C}' - \mathbf{A}')}{(\mathbf{B}' - \mathbf{A}')(\mathbf{D}' - \mathbf{C}')}}. \quad (30)$$

em que  $\mathbf{V}$ ,  $\mathbf{A}'$ ,  $\mathbf{B}'$ ,  $\mathbf{C}'$ ,  $\mathbf{D}'$  e  $\mathbf{F}$  são variáveis aleatórias caracterizadas por FDPs próprias.

### 3.4 FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE DA VELOCIDADE

Nesta seção é determinada a FDP da velocidade, a partir da qual é possível obter estimativas não apenas sobre a velocidade média, como também sobre a incerteza associada. Assume-se que as variáveis aleatórias em (30) possuam FDP Normal truncada, então

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A}' &\sim f_{A'}(x; \mu_{A'}, \sigma_{A'}, \alpha_1, \alpha_2) \\
 \mathbf{B}' &\sim f_{B'}(x; \mu_{B'}, \sigma_{B'}, \beta_1, \beta_2) \\
 \mathbf{C}' &\sim f_{C'}(x; \mu_{C'}, \sigma_{C'}, \gamma_1, \gamma_2) \cdot \\
 \mathbf{D}' &\sim f_{D'}(x; \mu_{D'}, \sigma_{D'}, \delta_1, \delta_2) \\
 \mathbf{F} &\sim f_F(x; \mu_F, \sigma_F, i_1, i_2)
 \end{aligned} \tag{31}$$

em que  $f_X(x; \cdot, \cdot, \cdot, \cdot)$  é a FDP Normal truncada da variável aleatória  $x$ ,  $\mu_X$  é a sua média,  $\sigma_X$  é o seu desvio padrão, e os dois últimos parâmetros são, respectivamente o valor inicial e o valor final do trecho não nulo. Além disso, assume-se que todas as variáveis são independentes e que

$$\alpha_1 < \alpha_2 < \beta_1 < \beta_2 < \gamma_1 < \gamma_2 < \delta_1 < \delta_2, \tag{32}$$

de modo que não haja sobreposição entre os intervalos de possibilidades dos centros de eixos, pois esse é o cenário característico da maioria das aplicações forenses.

A equação (30) apresenta um conjunto de operações matemáticas entre variáveis aleatórias que define transformações sobre as FDP intermediárias, finalizando com a obtenção da FDP da velocidade.

Iniciando com a operação de subtração, tem-se que para variáveis genéricas  $\mathbf{Z} = \mathbf{X} - \mathbf{Y}$ , a função densidade de probabilidade de  $\mathbf{Z}$  é dada por (Papoulis & Pilai, 2002, p. 185)

$$f_{X-Y}(z) = \int_{y=-\infty}^{\infty} f_X(z+y) f_Y(y) dy. \tag{33}$$

Utilizando-se (31) em (33) obtêm-se as seguintes FDPs

$$f_{D'-B'}(z; \dots) = \int_{\beta_1}^{\beta_2} f_{D'}(z+y; \mu_{D'}, \sigma_{D'}, \delta_1, \delta_2) f_{B'}(y; \mu_{B'}, \sigma_{B'}, \beta_1, \beta_2) dy, \tag{34}$$

$$f_{C'-A'}(z; \dots) = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} f_{C'}(z+y; \mu_{C'}, \sigma_{C'}, \gamma_1, \gamma_2) f_{A'}(y; \mu_{A'}, \sigma_{A'}, \alpha_1, \alpha_2) dy, \tag{35}$$

$$f_{B'-A'}(z; \dots) = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} f_{B'}(z+y; \mu_{B'}, \sigma_{B'}, \beta_1, \beta_2) f_{A'}(y; \mu_{A'}, \sigma_{A'}, \alpha_1, \alpha_2) dy, \tag{36}$$

$$f_{D'-C'}(z; \dots) = \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} f_{D'}(z+y; \mu_{D'}, \sigma_{D'}, \delta_1, \delta_2) f_{C'}(y; \mu_{C'}, \sigma_{C'}, \gamma_1, \gamma_2) dy. \tag{37}$$

No caso do produto de duas variáveis aleatórias  $\mathbf{Z} = \mathbf{XY}$ , a FDP de  $\mathbf{Z}$  é dada por (Papoulis & Pilai, 2002, p. 205)

$$f_{XY}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{|x|} f_X(x) f_Y(z/x) dx. \quad (38)$$

A FDP do numerador da porção interna de (30) é obtida em três etapas. Inicialmente, calcula-se a FDP do produto entre  $(\mathbf{D}'-\mathbf{B}')(\mathbf{C}'-\mathbf{A}')$ , de forma que, substituindo (34) e (35) em (38) obtém-se

$$f_{(\mathbf{D}'-\mathbf{B}')(\mathbf{C}'-\mathbf{A}')}(\mathbf{z}) = \int_{\delta_1-\beta_2}^{\delta_2-\beta_1} \frac{1}{|x|} f_{\mathbf{D}'-\mathbf{B}'}(x; \dots) f_{\mathbf{C}'-\mathbf{A}'}(z/x; \dots) dx, \quad (39) 3791$$

que leva a

$$\begin{aligned} f_{(\mathbf{D}'-\mathbf{B}')(\mathbf{C}'-\mathbf{A}')}(\mathbf{z}) = & \int_{g=\delta_1-\beta_2}^{\delta_2-\beta_1} \int_{h=\beta_1}^{\beta_2} \int_{k=\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{1}{|g|} \\ & \cdot f_{\mathbf{D}'}(g+h; \mu_{\mathbf{D}'}, \sigma_{\mathbf{D}'}, \delta_1, \delta_2) f_{\mathbf{B}'}(h; \mu_{\mathbf{B}'}, \sigma_{\mathbf{B}'}, \beta_1, \beta_2) \\ & \cdot f_{\mathbf{C}'}(z/g+k; \mu_{\mathbf{C}'}, \sigma_{\mathbf{C}'}, \gamma_1, \gamma_2) f_{\mathbf{A}'}(k; \mu_{\mathbf{A}'}, \sigma_{\mathbf{A}'}, \alpha_1, \alpha_2) dk dh dg \end{aligned} \quad (40)$$

Para o quadrado de uma variável aleatória  $\mathbf{Z} = \mathbf{X}^2$ , a FDP de  $\mathbf{Z}$  é dada por (Papoulis & Pilai, 2002, p. 125)

$$f_{\mathbf{X}^2}(\mathbf{z}) = \frac{f_X(\sqrt{\mathbf{z}})}{2\sqrt{\mathbf{z}}}. \quad (41)$$

Desse modo, calcula-se a FDP de  $\mathbf{F}^2$  substituindo-se (31) em (41), tem-se

$$f_{\mathbf{F}^2}(\mathbf{z}) = \frac{f_{\mathbf{F}}(\sqrt{\mathbf{z}}; \mu_{\mathbf{F}}, \sigma_{\mathbf{F}}, i_1, i_2)}{2\sqrt{\mathbf{z}}}. \quad (42)$$

Finalmente, substitui-se (39) e (42) em (38) para obter

$$f_{(\mathbf{D}'-\mathbf{B}')(\mathbf{C}'-\mathbf{A}')\mathbf{F}^2}(\mathbf{z}) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{|x|} f_{(\mathbf{D}'-\mathbf{B}')(\mathbf{C}'-\mathbf{A}')}(\mathbf{x}) f_{\mathbf{F}^2}(\mathbf{z}/\mathbf{x}) dx, \quad (43)$$

que leva a

$$\begin{aligned} f_{(\mathbf{D}'-\mathbf{B}')(\mathbf{C}'-\mathbf{A}')\mathbf{F}^2}(\mathbf{z}) = & \int_{n=(\delta_1-\beta_2)(\gamma_1-\alpha_2)}^{(\delta_2-\beta_1)(\gamma_2-\alpha_1)} \int_{g=\delta_1-\beta_2}^{\delta_2-\beta_1} \int_{h=\beta_1}^{\beta_2} \int_{k=\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{1}{2\sqrt{\mathbf{z}/n} |gn|} \\ & \cdot f_{\mathbf{D}'}(g+h; \mu_{\mathbf{D}'}, \sigma_{\mathbf{D}'}, \delta_1, \delta_2) f_{\mathbf{B}'}(h; \mu_{\mathbf{B}'}, \sigma_{\mathbf{B}'}, \beta_1, \beta_2) \\ & \cdot f_{\mathbf{C}'}(n/g+k; \mu_{\mathbf{C}'}, \sigma_{\mathbf{C}'}, \gamma_1, \gamma_2) f_{\mathbf{A}'}(k; \mu_{\mathbf{A}'}, \sigma_{\mathbf{A}'}, \alpha_1, \alpha_2) \\ & \cdot f_{\mathbf{F}}(\sqrt{\mathbf{z}/n}; \mu_{\mathbf{F}}, \sigma_{\mathbf{F}}, i_1, i_2) dk dh dg dn \end{aligned} \quad (44)$$

Para encontrar a função densidade de probabilidade do denominador da porção interna de (30), substitui-se (36) e (37) em (38), de forma que

$$f_{(\mathbf{B}'-\mathbf{A}')(\mathbf{D}'-\mathbf{C}')}(\mathbf{z}) = \int_{x=-\infty}^{\infty} \frac{1}{|x|} f_{\mathbf{B}'-\mathbf{A}'}(x; \dots) f_{\mathbf{D}'-\mathbf{C}'}(z/x; \dots) dx. \quad (45)$$

Que acarreta

$$f_{(B'-A')(D'-C')}(z) = \int_{q=\beta_1-\alpha_2}^{\beta_2-\alpha_1} \int_{p=\alpha_1}^{\alpha_2} \int_{w=\gamma_1}^{\gamma_2} \frac{1}{|q|} \cdot f_{D'}(z/q+w; \mu_{D'}, \sigma_{D'}, \delta_1, \delta_2) f_{C'}(w; \mu_{C'}, \sigma_{C'}, \gamma_1, \gamma_2) \cdot f_{B'}(q+p; \mu_{B'}, \sigma_{B'}, \beta_1, \beta_2) f_{A'}(p; \mu_{A'}, \sigma_{A'}, \alpha_1, \alpha_2) dw dp dq \quad (46)$$

Para uma divisão de duas variáveis aleatórias  $\mathbf{Z} = \mathbf{X}/\mathbf{Y}$ , a FDP de  $\mathbf{Z}$  é obtida por (Papoulis & Pilai, 2002, p. 187)

$$f_{X/Y}(z) = \int_{y=-\infty}^{\infty} |y| f_X(yz) f_Y(y) dy \quad (47)$$

Substituindo (44) e (46) em (47), obtém-se

$$f_{\frac{(D'-B')(C'-A')F^2}{(B'-A')(D'-C')}}(z) = \int_{y=(\delta_1-\gamma_2)(\beta_1-\alpha_2)}^{(\delta_2-\gamma_1)(\beta_2-\alpha_1)} \int_{n=(\delta_1-\beta_2)(\gamma_1-\alpha_2)}^{(\delta_2-\beta_1)(\gamma_2-\alpha_1)} \int_{g=\delta_1-\beta_2}^{\delta_2-\beta_1} \int_{h=\beta_1}^{\beta_2} \int_{k=\alpha_1}^{\alpha_2} \int_{q=\beta_1-\alpha_2}^{\beta_2-\alpha_1} \int_{p=\alpha_1}^{\alpha_2} \int_{w=\gamma_1}^{\gamma_2} \frac{|y|}{2\sqrt{yz/n} |qgn|} \cdot f_{D'}(g+h; \mu_{D'}, \sigma_{D'}, \delta_1, \delta_2) f_{B'}(h; \mu_{B'}, \sigma_{B'}, \beta_1, \beta_2) \cdot f_{C'}(n/g+k; \mu_{C'}, \sigma_{C'}, \gamma_1, \gamma_2) f_{A'}(k; \mu_{A'}, \sigma_{A'}, \alpha_1, \alpha_2) \cdot f_F(\sqrt{yz/n}; \mu_F, \sigma_F, i_1, i_2) \cdot f_{D'}(y/q+w; \mu_{D'}, \sigma_{D'}, \delta_1, \delta_2) f_{C'}(w; \mu_{C'}, \sigma_{C'}, \gamma_1, \gamma_2) \cdot f_{B'}(q+p; \mu_{B'}, \sigma_{B'}, \beta_1, \beta_2) f_{A'}(p; \mu_{A'}, \sigma_{A'}, \alpha_1, \alpha_2) \cdot dw dp dq kdhdg dndy \quad (48)$$

A PDF da raiz quadrada de uma variável aleatória  $\mathbf{Z} = \sqrt{\mathbf{X}}$  é dada por (Papoulis & Pilai, 2002, p. 133)

$$f_{\sqrt{X}}(z) = 2zf_X(z^2). \quad (49)$$

Portanto, substituindo-se (48) em (49), chega-se a:

$$\begin{aligned}
f_{\sqrt{\frac{(D' \cdot B')(C' \cdot A')F^2}{(B' \cdot A')(D' \cdot C')}}}(z) = & z \int_{y=(\delta_1-\gamma_2)(\beta_1-\alpha_2)}^{(\delta_2-\gamma_1)(\beta_2-\alpha_1)} \int_{n=(\delta_1-\beta_2)(\gamma_1-\alpha_2)}^{(\delta_2-\beta_1)(\gamma_2-\alpha_1)} \int_{g=\delta_1-\beta_2}^{\delta_2-\beta_1} \int_{h=\beta_1}^{\beta_2} \int_{k=\alpha_1}^{\alpha_2} \int_{q=\beta_1-\alpha_2}^{\beta_2-\alpha_1} \int_{p=\alpha_1}^{\alpha_2} \int_{w=\gamma_1}^{\gamma_2} \\
& \cdot \frac{|y|}{\sqrt{yz/n} |qgn|} \\
& \cdot f_{D'}(g+h; \mu_{D'}, \sigma_{D'}, \delta_1, \delta_2) f_{B'}(h; \mu_{B'}, \sigma_{B'}, \beta_1, \beta_2) \\
& \cdot f_{C'}(n/g+k; \mu_{C'}, \sigma_{C'}, \gamma_1, \gamma_2) f_{A'}(k; \mu_{A'}, \sigma_{A'}, \alpha_1, \alpha_2) \\
& \cdot f_F(\sqrt{yz^2/n}; \mu_F, \sigma_F, i_1, i_2) \\
& \cdot f_{D'}(y/q+w; \mu_{D'}, \sigma_{D'}, \delta_1, \delta_2) f_{C'}(w; \mu_{C'}, \sigma_{C'}, \gamma_1, \gamma_2) \\
& \cdot f_{B'}(q+p; \mu_{B'}, \sigma_{B'}, \beta_1, \beta_2) f_{A'}(p; \mu_{A'}, \sigma_{A'}, \alpha_1, \alpha_2) \\
& \cdot dw dp dq dk dh dg dndy
\end{aligned} \quad (50)$$

Finalmente, para determinar a função densidade de probabilidade da velocidade, basta multiplicar a variável aleatória associada à função (50) pelo valor da distância entre eixos do veículo sobre a diferença de quadros. Seja  $\mathbf{Z} = k \cdot \mathbf{X}$ , em que  $k$  é uma constante. Dessa forma, a PDF de  $\mathbf{Z}$  é dada por (Papoulis & Pilai, 2002, p. 131)

$$f_{k\mathbf{X}}(\mathbf{z}) = \frac{1}{|k|} f_{\mathbf{X}}\left(\frac{\mathbf{z}}{k}\right). \quad (51)$$

Deste modo, substituindo-se (50) em (51), a FDP da velocidade é expressa por:

$$\begin{aligned}
f_V(v) = & v \frac{(q_f - q_i)^2}{l^2} \int_{y=(\delta_1-\gamma_2)(\beta_1-\alpha_2)}^{(\delta_2-\gamma_1)(\beta_2-\alpha_1)} \int_{n=(\delta_1-\beta_2)(\gamma_1-\alpha_2)}^{(\delta_2-\beta_1)(\gamma_2-\alpha_1)} \int_{g=\delta_1-\beta_2}^{\delta_2-\beta_1} \int_{h=\beta_1}^{\beta_2} \int_{k=\alpha_1}^{\alpha_2} \int_{q=\beta_1-\alpha_2}^{\beta_2-\alpha_1} \int_{p=\alpha_1}^{\alpha_2} \int_{w=\gamma_1}^{\gamma_2} \\
& \cdot \frac{|y|}{\sqrt{yz^2(q_f - q_i)^2/nl^2} |qgn|} \\
& \cdot f_{D'}(g+h; \mu_{D'}, \sigma_{D'}, \delta_1, \delta_2) f_{B'}(h; \mu_{B'}, \sigma_{B'}, \beta_1, \beta_2) \\
& \cdot f_{C'}(n/g+k; \mu_{C'}, \sigma_{C'}, \gamma_1, \gamma_2) f_{A'}(k; \mu_{A'}, \sigma_{A'}, \alpha_1, \alpha_2) \\
& \cdot f_F(\sqrt{yz^2(q_f - q_i)^2/nl^2}; \mu_F, \sigma_F, i_1, i_2) \\
& \cdot f_{D'}(y/q+w; \mu_{D'}, \sigma_{D'}, \delta_1, \delta_2) f_{C'}(w; \mu_{C'}, \sigma_{C'}, \gamma_1, \gamma_2) \\
& \cdot f_{B'}(q+p; \mu_{B'}, \sigma_{B'}, \beta_1, \beta_2) f_{A'}(p; \mu_{A'}, \sigma_{A'}, \alpha_1, \alpha_2) \\
& \cdot dw dp dq dk dh dg dndy
\end{aligned} \quad (52)$$

### 3.5 CONFIABILIDADE DA ESTIMAÇÃO DA VELOCIDADE

A partir da definição da FDP da velocidade pode-se extrair diversas informações sobre a estimativa obtida. O valor médio da velocidade, em metros por segundo, é obtido por meio de

$$E\{\mathbf{V}\} = \int_{-\infty}^{\infty} v f_V(v) dv. \quad (53)$$

A probabilidade de que a velocidade esteja dentro de um determinado intervalo  $[v_{\min}, v_{\max}]$  pode ser obtida por:

$$P(v_{\min} \leq \mathbf{V} \leq v_{\max}) = \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} f_V(v) dv, \quad (54)$$

de modo que, a partir do método proposto, pode-se apresentar como resultado a probabilidade de a velocidade estar contida dentro de determinado intervalo.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo trata dos materiais e métodos utilizados para a demonstração e análise da técnica da razão cruzada generalizada, descrita na seção 3.3.

### 4.1 EXEMPLO DA UTILIZAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

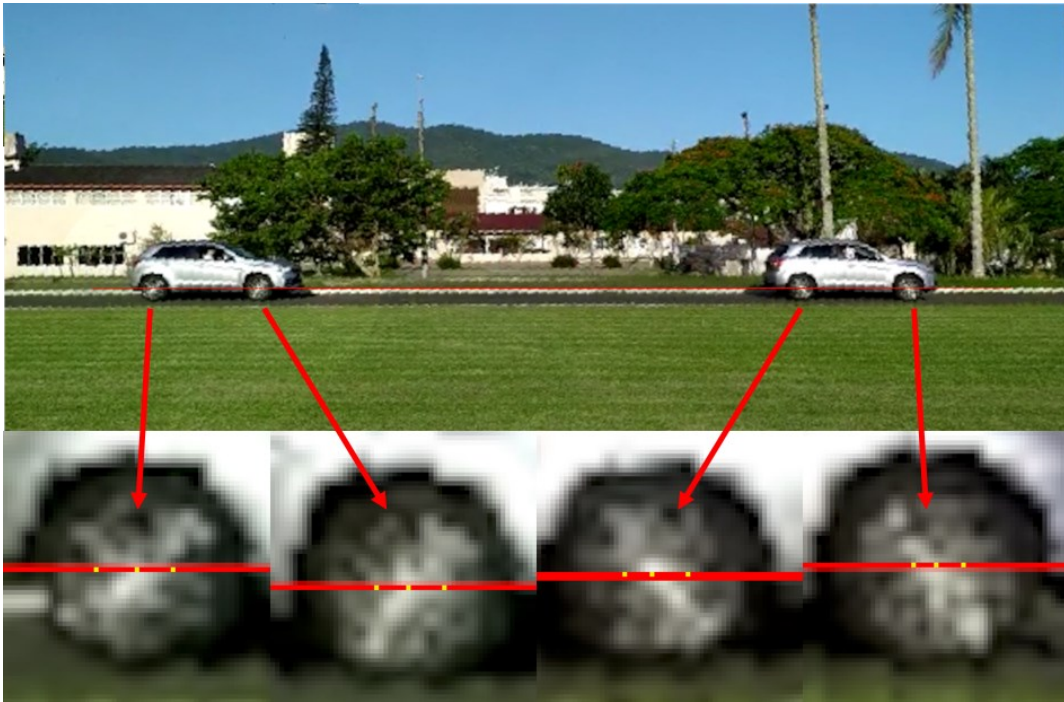
Para calcular a probabilidade da velocidade do veículo se encontrar dentro de um determinado intervalo arbitrário, conforme a equação (54), foi desenvolvido um programa em *python*, utilizando as bibliotecas *numpy* e *scipy*. O programa requer as seguintes informações de entrada:

- coordenadas dos pontos de mínimo e máximo de cada um dos centros de eixo do veículo, assim como a média e a variância estimada para cada intervalo. Em caso de indisponibilidade de estimativa da média ou variância, utiliza-se o ponto médio do intervalo e variância infinita, respectivamente;
- valores de mínimo e máximo da taxa de quadros por segundo, assim como a média e variância estimada. Em caso de indisponibilidade de estimativa da média ou variância, utiliza-se o ponto médio do intervalo e variância infinita, respectivamente;
- distância entre eixos do veículo;
- números dos quadros inicial e final do trecho analisado;
- intervalo de velocidade cuja probabilidade deseja-se descobrir.

Para a demonstração do método, foi realizada a captura de vídeo de um veículo HONDA/ASX, ano 2017/2018, trafegando em trajetória retilínea, perpendicular à linha de visada da câmera. A velocidade do veículo no trecho foi de aproximadamente 60 km/h, aferida por um aparelho celular com GPS convencional. Na Figura 6 pode-se visualizar a sobreposição dos quadros do arquivo de vídeo com o veículo em sua posição inicial e final, bem como a reta sobreposta sobre os centros de eixo.

Após a marcação manual da localização dos centros de eixo na imagem, os pontos obtidos foram utilizados para obter a reta de melhor ajuste, segundo o critério do erro quadrático mínimo. Em sequência foram determinados os intervalos associados a cada um dos centros de eixo.

Figura 6 – Sobreposição de quadros retirada do vídeo com ênfase na marcação dos centros de eixo.



Fonte: o autor (2021).

#### 4.2 EXPERIMENTOS DE VERIFICAÇÃO

Foram convidados 12 peritos criminais, com idades entre 27 e 52 anos, pertencentes ao corpo técnico das polícias científicas dos estados e da federação e atuantes em setores de perícia de áudio e imagem ou equivalentes. O objetivo foi comparar o processo de estimação de velocidade de um veículo através dos métodos de razão cruzada convencional e generalizada, utilizando o método da projeção reversa como referência, visto que é considerado de maior acurácia, não sendo utilizado na maior parte das vezes por apresentar maior custo econômico, tendo em vista a necessidade de revisitação ao local do fato.

O procedimento foi composto por duas etapas, uma de aprendizado e outra de teste. Na primeira etapa, foi apresentada uma breve descrição do procedimento requerido e em sequência um exemplo de aplicação. Na segunda etapa, foram fornecidas 15 imagens digitais, geradas a partir de três câmeras distintas, as quais capturaram a trajetória de um veículo trafegando com cinco velocidades diferentes.



#### 4.2.1 Captura da trajetória de um veículo em movimento

Para produzir as imagens necessárias foi arquitetado um ambiente controlado, em uma pista fechada, na qual foram instaladas três câmeras em posições semelhantes. As câmeras foram ajustadas de modo que as suas linhas de visada ficassem aproximadamente em um ângulo entre 30° e 60° em relação à trajetória do veículo.

Para este experimento, houve apoio da empresa Discfone<sup>3</sup>, da Polícia Militar de Santa Catarina e da Polícia Científica de Santa Catarina. A empresa Discfone forneceu as câmeras e o sistema de circuito fechado de televisão fabricado pela empresa Intelbras<sup>4</sup>. Policiais da Polícia Militar de Santa Catarina foram responsáveis pela medição da velocidade do veículo em dois pontos definidos na trajetória. A medição foi realizada com o aparelho da marca Laser Technology, modelo LTI 20/20 TRUCAM II. A aferição do equipamento apresenta resolução de 1 km/h (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - INMETRO, 2019) e precisão de  $\pm 2$  km/h (Laser Tech, 2021). Na Figura 7 pode-se visualizar a equipe no momento do experimento. Os rostos dos envolvidos foram distorcidos para preservação das identidades.

A trajetória sob análise era retilínea e possuía 24 metros de distância. Foram utilizados cones sinalizadores para delimitação do espaço, posicionados com 3 metros de distância entre si. Na Figura 8 pode-se observar a trajetória delimitada.

Figura 7 – Fotografia no dia do experimento.



Fonte: autor (2022).

<sup>3</sup> <https://www.discfone.com/>

<sup>4</sup> <https://www.intelbras.com/>

Figura 8 – Trajetória para análise.



Fonte: autor (2022).

Foram realizadas diversas passagens com o veículo HYUNDAI/CRETA 2020/2021, patrimônio da Polícia Científica de Santa Catarina, a partir das quais cinco foram escolhidas para prosseguir com o experimento. Como critério de seleção, foram escolhidas as passagens em que foi possível manter a velocidade mais estável entre o ponto inicial e final da trajetória. Na Tabela 1 pode-se observar as velocidades medidas com o radar no ponto inicial e final, bem como o valor médio entre elas. Além da velocidade de referência obtida pelo radar, também foi utilizada como referência a velocidade obtida por meio do método da projeção reversa, a partir da colocação dos cones na pista.

Tabela 1 – Passagens escolhidas para o experimento e suas respectivas velocidades, valor em km/h.

Passagem	Velocidade inicial	Velocidade final	Média	Projeção Rev.
#01	27	27	27	28,8
#02	41	40	40,5	43,9
#03	49	50	49,5	52,9
#04	62	60	61	64,8
#05	78	82	79	86,4

Fonte: autor (2022).

Para gravar a passagem do veículo, foram utilizadas três câmeras do tipo *bullet* da fabricante Intelbras, as quais foram posicionadas próximas e com inclinações similares em relação à trajetória. Foram utilizados os modelos VIP 1130 B G3 (baixa definição), VIP

3260 Z G2 (média definição) e VIP 5550 Z IA (alta definição), cujas especificações técnicas encontram-se, respectivamente nos Quadros 1, 2 e 3.

**Quadro 1 – Especificações da câmera Intelbras VIP 1130 B G3 (baixa definição).**

Sensor	1/2.8" 1 megapixels CMOS
Pixels efetivos	1280 (H) x 720 (V)
Resolução real	1 MP
Lente	3.6 mm
Ângulo de visão horizontal	85°
Ângulo de visão vertical	45°
Razão sinal-ruído	50 dB
Velocidade do obturador	1/3s ~ 1/100000s
Compressão de vídeo	H.264/H.264B/H.264H/H.265/MJPEG

Fonte: (Intelbras, 2022).

**Quadro 2 – Especificações da câmera Intelbras VIP 3260 Z G2 (média definição).**

Sensor	1/2.8" 2 megapixels CMOS
Pixels efetivos	1920 (H) x 1080 (V)
Resolução real	2 MP
Lente	2.7 mm
Ângulo de visão horizontal	109°
Ângulo de visão vertical	57°
Razão sinal-ruído	56 dB
Velocidade do obturador	1/3s ~ 1/100000s
Compressão de vídeo	H.265/H.264/H.2642B/MJPEG/H.264+/H.265+

Fonte: (Intelbras, 2022).

**Quadro 3 – Especificações da câmera Intelbras VIP 5550 Z IA (alta definição).**

Sensor	1/2.7" 5 megapixels CMOS
Pixels efetivos	1920 (H) x 1080 (V)
Resolução real	5 MP
Lente	2.7 mm
Ângulo de visão horizontal	101°
Ângulo de visão vertical	62°
Razão sinal-ruído	56 dB
Velocidade do obturador	1/3s ~ 1/100000s
Compressão de vídeo	H.265/H.264/H.2642B/MJPEG/H.264+/H.265+

Fonte: (Intelbras, 2022).

As imagens foram produzidas a partir da sobreposição de quadros dos arquivos de vídeo correspondentes aos instantes em que o veículo passava pelo ponto inicial e final do

trajeto. Nas figuras 9, 10 e 11 pode-se visualizar a sobreposição dos quadros oriundos dos vídeos das câmeras VIP 1130 B G3, VIP 3260 Z G2 e VIP 5550 Z IA, respectivamente.

Figura 9 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #01 com a câmera VIP 1130 B G3.



Fonte: autor (2022).

Figura 10 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #01 com a câmera VIP 3260 Z G2.



Fonte: autor (2022).

Figura 11 – Sobreposição de quadros à captura da passagem #01 com a câmera VIP 5550 Z IA.



Fonte: autor (2022).

Após a produção das imagens, foi removida a distorção de barril, baseando-se nas retas obtidas a partir do alinhamento dos cones de marcação da trajetória. Adicionalmente, os registros passaram por manipulações com introdução de borrão de movimento e filtragem passa-baixas, visando adequar as imagens às situações encontradas na casuística dos órgãos forenses de áudio e imagem em exames de estimativa de velocidade. Tais modificações foram feitas no aplicativo de código aberto GIMP, versão 2.10.32. Desta forma, foram obtidas 15 imagens de diferentes qualidades, referentes a cinco passagens e três alterações de nitidez, resultando em imagens de: baixa nitidez, média nitidez e alta nitidez.

Para a câmera VIP 1130 B G3, foram aplicados os seguintes filtros e parâmetros, resultado nas chamadas imagens de baixa nitidez:

- Filtro lens distortion:
  - Parâmetro *main*: -170;
  - Demais parâmetros mantidos na configuração padrão.
- Desfocagem de lente:
  - parâmetro *radius*: 3;
  - demais parâmetros mantidos na configuração padrão.
- Filtro de movimento linear desfocado:
  - parâmetro *size*: 10;
  - parâmetro *angle*: 14°.

Para a câmera VIP 3260 Z G2, os seguintes parâmetros foram utilizados para criar as imagens de média nitidez:

- Filtro lens distortion:
  - parâmetro *main*: -47;
  - demais parâmetros mantidos na configuração padrão.
- Desfocagem de lente:
  - parâmetro *radius*: 3;
  - demais parâmetros mantidos na configuração padrão.
- Filtro de movimento linear desfocado:
  - parâmetro *size*: 6;
  - parâmetro *angle*: -7°.

Para a câmera VIP 5550 Z IA, os seguintes parâmetros foram utilizados para criar as imagens de alta nitidez:

- Filtro lens distortion:

- parâmetro *main*: -35;
- demais parâmetros mantidos na configuração padrão.
- Desfocagem de lente:
  - parâmetro *radius*: 3;
  - demais parâmetros mantidos na configuração padrão.
- Filtro de movimento linear desfocado:
  - parâmetro *size*: 7;
  - parâmetro *angle*: 21°.

Finalizando-se a etapa de preparação das imagens, foi sobreposta uma reta aos centros de eixo do veículo (para posterior marcação de pontos por parte dos participantes) e a imagem foi recortada para que a trajetória ficasse em ênfase, também removendo os caracteres indicadores das câmeras. Nas figuras 12, 13 e 14 pode-se visualizar as imagens produzidas a partir das câmeras após o processamento. No Apêndice A é apresentado o conjunto de imagens produzidas neste experimento.

Figura 12 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #01 com a câmera VIP 1130 B G3 após processo de remoção de distorção, manipulação e adição de reta colinear aos centros de eixo do veículo.



Fonte: autor (2022).

Figura 13 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #01 com a câmera VIP 3260 Z G2 após processo de remoção de distorção, manipulação e adição de reta colinear aos centros de eixo do veículo.



Fonte: autor (2022).

Figura 14 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #01 com a câmera VIP 5550 Z IA após processo de remoção de distorção, manipulação e adição de reta colinear aos centros de eixo do veículo.



Fonte: autor (2022).



#### 4.2.2 Participação de Peritos Forenses

O convite para participação de voluntários peritos criminais das polícias científicas dos Estados e da Federação se deu por meio presencial e por correio eletrônico. Este experimento foi aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa com Seres Humanos da Universidade Federal de Santa Catarina CEPESH, sob número CAAE: 57728422.0.0000.0121. O Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (Apêndice C) foi apresentado ao voluntário e solicitada sua assinatura.

Aos voluntários peritos foi encaminhada uma descrição didática e ilustrada do procedimento, orientando que: (i) realizassem marcas sobre a semirreta, correspondendo à melhor estimativa possível dos quatro centros de eixo; e (ii) realizassem marcas sobre a semirreta, correspondendo aos possíveis intervalos em que os centros de eixo estão contidos (assumindo-se limitações de nitidez e resolução). As imagens foram apresentadas de maneira aleatória, com a finalidade de se dirimir possíveis vieses cognitivos. Foram apresentadas imagens digitais, de forma que os peritos atuassem de acordo com suas práticas normais.

Em sequência, foi solicitado que os participantes preenchessem uma tabela com as coordenadas de cada ponto para cada imagem, totalizando 180 pontos, sendo 12 para cada imagem. Os resultados foram armazenados juntamente com as informações de tempo de experiência no setor de áudio e imagem ou equivalente. A partir das medidas, foi calculada a distância estimada pelos participantes por meio do método da razão cruzada convencional e pelo método da razão cruzada generalizada.

## 5 RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados referentes ao cenário de baixa nitidez, tendo em vista que essa situação melhor se assemelha à casuística encontrada nos órgãos forenses. Os resultados dos demais cenários podem ser encontrados no Apêndice B.

Na seção 5.1 são apresentados exemplos de aplicação do método da razão cruzada generalizada. Na seção 5.2 são apresentadas comparações entre o método convencional e o método proposto no experimento envolvendo voluntários.

A referência de velocidade baseada no método de projeção reversa foi obtida por meio da medida de distância *in loco* e pela variação temporal do arquivo de vídeo. A velocidade média obtida pelo radar foi calculada a partir da média das medições no ponto inicial e final da trajetória.

### 5.1 EXEMPLO DA UTILIZAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

A partir da inspeção visual (pelo autor deste trabalho) da imagem sob análise e do procedimento descrito na seção 4.1 foi possível caracterizar as diversas variáveis aleatórias, segundo a equação (31), da seguinte forma

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A}' &\sim f_{A'}(a; 535, \sqrt{3}, 530, 538) \\
 \mathbf{B}' &\sim f_{B'}(b; 634, \sqrt{3}, 630, 640) \\
 \mathbf{C}' &\sim f_{C'}(c; 1404, \sqrt{3}, 1398, 1411) , \\
 \mathbf{D}' &\sim f_{D'}(d; 1573, \sqrt{3}, 1569, 1579) \\
 \mathbf{F} &\sim f_F(f; 30, \sqrt{2}, 29, 31)
 \end{aligned} \tag{55}$$

cujos desvios padrões foram arbitrados apenas para demonstrar a aplicação do método.

A partir dos dados descritos em (55) duas são as abordagens de maior interesse para aplicações forenses, as quais são descritas a seguir.

#### 5.1.1 Determinação da Probabilidade para um Intervalo Arbitrário de Velocidade

Substituindo (55) em (52) e o resultado em (54), pode-se calcular a probabilidade da velocidade estar contida em um determinado intervalo. Assumindo-se, como exemplo, o intervalo [60,70] km/h, tem-se que

$$\begin{aligned}
P_T(60 \leq v \leq 70) = & \int_{v=60}^{70} \int_{y=(1569-1411)}^{(1579-1398)} \int_{n=(1569-640)}^{(640-530)} \int_{g=1569-640}^{(1579-630)} \int_{h=630}^{(1411-530)} \int_{k=530}^{640} \int_{q=630-538}^{538} \int_{p=530}^{640-530} \int_{w=1398}^{538} \int_{1411} \\
& v \frac{(278-246)^2}{((3.6)(2.67))^2} \frac{|y|}{\sqrt{yz^2(278-246)^2 / n((3.6)(2.67))^2} |qgn|} \\
& \cdot f_D(g+h; 1573, 3, 1569, 1579) f_B(h; 634, 3, 630, 640) \\
& \cdot f_C(n/g+k; 1404, 3, 1398, 1411) f_A(k; 535, 3, 530, 538) \\
& \cdot f_F(\sqrt{yz^2(q_f - q_i)^2 / n((3.6)(2.67))^2}; 30, 1, 29, 31) \\
& \cdot f_D(y/q+w; 1573, 3, 1569, 1579) f_C(w; 1404, 3, 1398, 1411) \\
& \cdot f_B(q+p; 634, 3, 630, 640) f_A(p; 535, 3, 530, 538) \\
& \cdot dw dp dq dk dh dg ndy dv
\end{aligned} \tag{56}$$

em que  $P_T(\cdot)$  é a probabilidade teórica estimada para um determinado intervalo de velocidade.

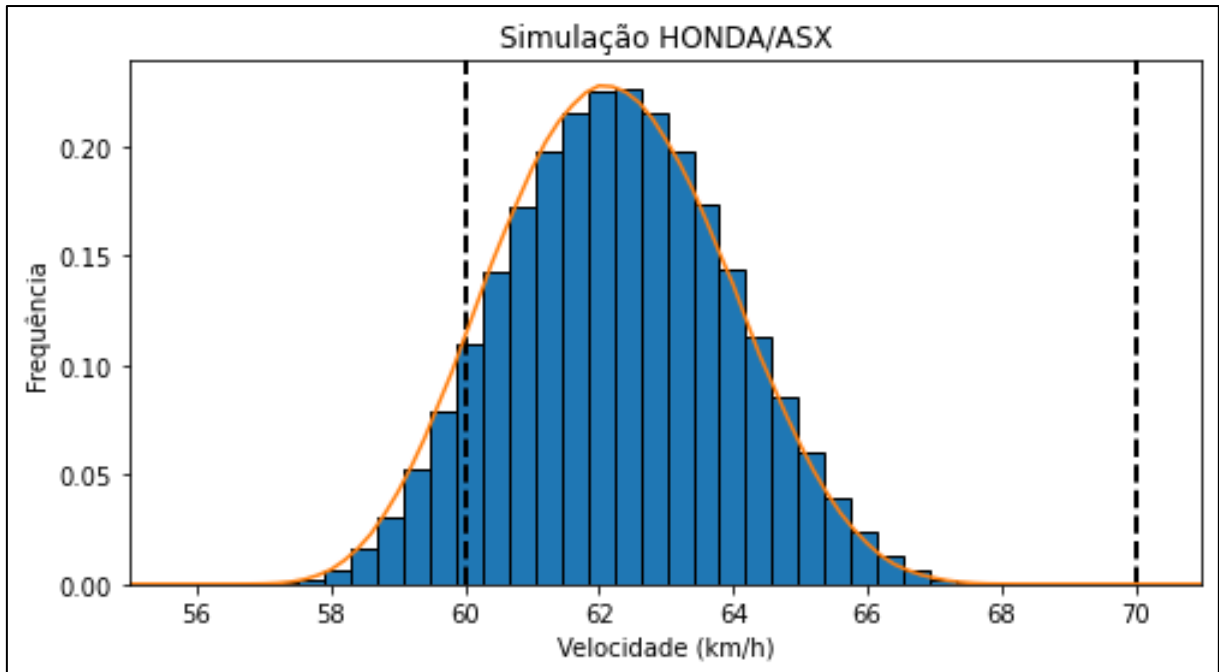
A equação (56) pode ser calculada numericamente utilizando-se o método de integração de Monte Carlo, descrito no apêndice A.

Adicionalmente, de forma a verificar a validade de (56), foi avaliada a equação (30) através da geração (simulação) de variáveis pseudoaleatórias com FDPs determinadas em (55). A partir do histograma da velocidade, apresentado na Figura 15, calculou-se o número de ocorrências no intervalo entre [60,70] km/h em relação ao número total de realizações ( $N = 10^5$ ), de forma que

$$P_S(60 \leq v \leq 70) = \frac{1}{N} \sum_{\substack{i=1 \\ 60 \leq v_i \leq 70}}^N 1, \tag{57}$$

em que  $P_S(\cdot)$  é a probabilidade simulada para um determinado intervalo de velocidade.

Figura 15 – Histograma normalizado obtido a partir de simulação utilizando a equação (30) e geração de números pseudoaleatórios (azul); PDF segundo a equação (52) com os dados de (55) (linha laranja) e limites da integração para [60,70] km/h (tracejado na vertical).



Fonte: autor (2022).

Substituindo (55) em (52) e o resultado em (53) obtém-se um valor médio de 62,3 km/h. Os resultados de (56) e (57), são apresentados na Tabela 2, representando que o veículo possui 92% (para a integração por Monte Carlo) e 91,3% (para a simulação com geradores aleatórios) de probabilidade de que estava desenvolvendo uma velocidade contida entre 60 km/h e 70 km/h. Adicionalmente, os resultados encontrados para um numeroso conjunto de diferentes intervalos de velocidade indicam a concordância entre o processo de simulação e o modelo teórico desenvolvido.

Tabela 2 – Resultados das equações (56) e (57).

Método	Valor
Integração por Monte Carlo	92,0%
Simulação com gerador aleatório	91,3%

Fonte: autor (2022).

### 5.1.2 Determinação do Intervalo de Incerteza da Estimativa da Velocidade Média

Uma segunda aplicação do método de razão cruzada generalizada é a determinação do intervalo de incerteza da estimativa da velocidade média. Essa incerteza pode ser caracterizada

de diferentes formas. Nesta subsecção a incerteza será definida como o intervalo simétrico de velocidades em relação à velocidade média que contém 95% da área da FDP. O intervalo desejado pode ser obtido via

$$\begin{aligned}
& P_T(E\{v\} - \Delta v \leq v \leq E\{v\} + \Delta v) \\
&= \int_{E\{v\}-\Delta v}^{E\{v\}+\Delta v} \int_{y=(1569-1411)(630-538)}^{(1579-1398)(640-530)} \int_{n=(1569-640)(1398-538)}^{(1579-630)(1411-530)} \int_{g=1569-640}^{1579-630} \int_{h=630}^{640} \int_{k=530}^{538} \int_{q=630-538}^{640-530} \int_{p=530}^{538} \int_{w=1398}^{1411} \\
&\quad v \frac{(278-246)^2}{((3.6)(2.67))^2} \frac{|y|}{\sqrt{yz^2(278-246)^2 / n((3.6)(2.67))^2} |qgn|} \\
&\quad \cdot f_D(g+h; 1573, 3, 1569, 1579) f_B(h; 634, 3, 630, 640) \\
&\quad \cdot f_C(n/g+k; 1404, 3, 1398, 1411) f_A(k; 535, 3, 530, 538) \\
&\quad \cdot f_F(\sqrt{yz^2(q_f - q_i)^2 / n((3.6)(2.67))^2}; 30, 1, 29, 31) \\
&\quad \cdot f_D(y/q+w; 1573, 3, 1569, 1579) f_C(w; 1404, 3, 1398, 1411) \\
&\quad \cdot f_B(q+p; 634, 3, 630, 640) f_A(p; 535, 3, 530, 538) \\
&\quad \cdot dwdpdqdkdhgdndy = 0,95
\end{aligned} \tag{58}$$

que pode ser descrito como um problema de otimização da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
& \Delta v = \arg. \min. \\
& \quad \int_{E\{v\}-l}^{E\{v\}+l} \int_{y=(1569-1411)(630-538)}^{(1579-1398)(640-530)} \int_{n=(1569-640)(1398-538)}^{(1579-630)(1411-530)} \int_{g=1569-640}^{1579-630} \int_{h=630}^{640} \int_{k=530}^{538} \int_{q=630-538}^{640-530} \int_{p=530}^{538} \int_{w=1398}^{1411} \\
&\quad v \frac{(278-246)^2}{((3.6)(2.67))^2} \frac{|y|}{\sqrt{yz^2(278-246)^2 / n((3.6)(2.67))^2} |qgn|} \\
&\quad \cdot f_D(g+h; 1573, 3, 1569, 1579) f_B(h; 634, 3, 630, 640) \\
&\quad \cdot f_C(n/g+k; 1404, 3, 1398, 1411) f_A(k; 535, 3, 530, 538) \\
&\quad \cdot f_F(\sqrt{yz^2(q_f - q_i)^2 / n((3.6)(2.67))^2}; 30, 1, 29, 31) \\
&\quad \cdot f_D(y/q+w; 1573, 3, 1569, 1579) f_C(w; 1404, 3, 1398, 1411) \\
&\quad \cdot f_B(q+p; 634, 3, 630, 640) f_A(p; 535, 3, 530, 538) \\
&\quad \cdot dwdpdqdkdhgdndy - 0,95]^2
\end{aligned} \tag{59}$$

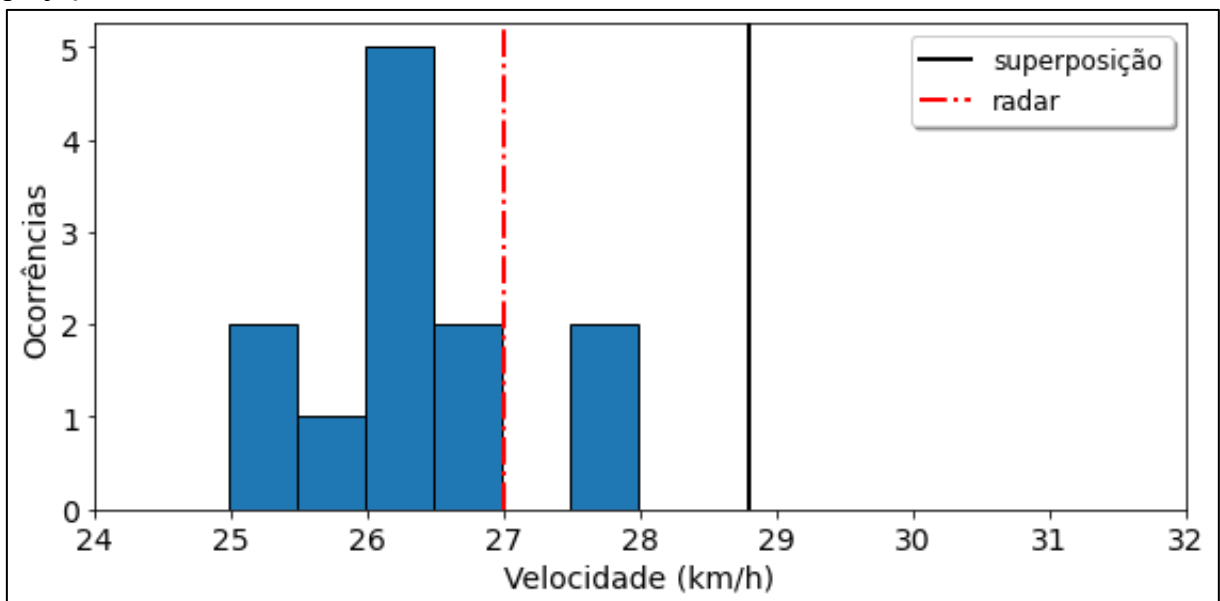
em que  $E\{v\}$  é obtido através de (53) e o intervalo de incerteza é definido por  $E\{v\} \pm \Delta v$  km/h. Em virtude do elevado custo computacional do processo de integração multidimensional em (59), o resultado pode ser obtido de forma mais rápida por simulação, obtendo seu valor médio e então aplicando o algoritmo de integração diretamente sobre a distribuição simulada. A partir

do exposto, por meio de qualquer uma das formas chega-se em um intervalo de incerteza de  $62,3 \pm 2,8$  km/h.

## 5.2 EXPERIMENTOS DE VERIFICAÇÃO: MÉTODO CONVENCIONAL

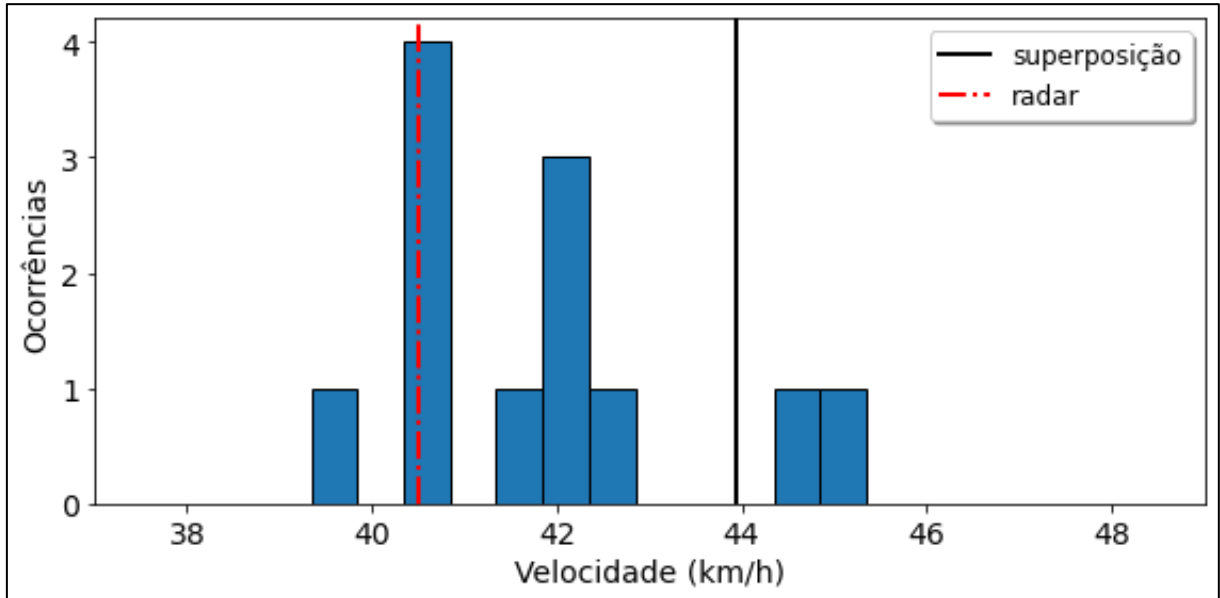
Na Figura 16 à Figura 20 são apresentados histogramas de velocidade, calculados a partir do método de razão cruzada convencional, considerando as marcações efetuadas pelos voluntários. Para tanto, foram utilizadas apenas as posições mais prováveis dos centros de eixo; ou seja, utilizando uma única estimativa de localização para cada centro de eixo (condição determinística). Para o tempo, utilizou-se a taxa de quadros por segundo associada ao arquivo de vídeo, bem como a diferença entre 3791 quadros no trecho. Adicionalmente, em cada figura, pode-se observar as referências de velocidade obtidas a partir do método da projeção reversa (Compton, Hague, & Murphy, 2003) (linha sólida preta) e da média dos valores provenientes da medição do radar de velocidade nos pontos inicial e final (tracejado-pontilhado vermelho).

Figura 16 – Distribuição dos valores de velocidade obtidos pelos 12 voluntários, utilizando o método de razão cruzada convencional nas imagens de pior nitidez. Velocidade de referência (método de projeção reversa) de 28,8 km/h. Em vermelho o radar e em preto método da projeção reversa.



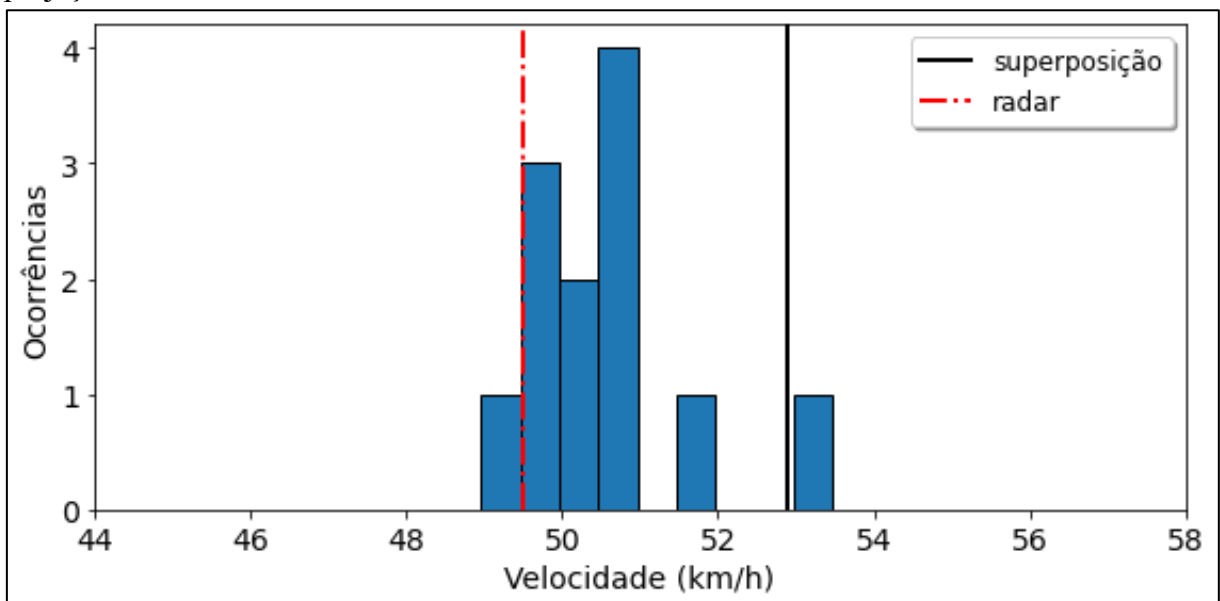
Fonte: autor (2023).

Figura 17 – Distribuição dos valores de velocidade obtidos pelos 12 voluntários, utilizando o método de razão cruzada convencional nas imagens de pior nitidez. Velocidade de referência (método de projeção reversa) de 43,9 km/h. Em vermelho o radar e em preto o método de projeção reversa.



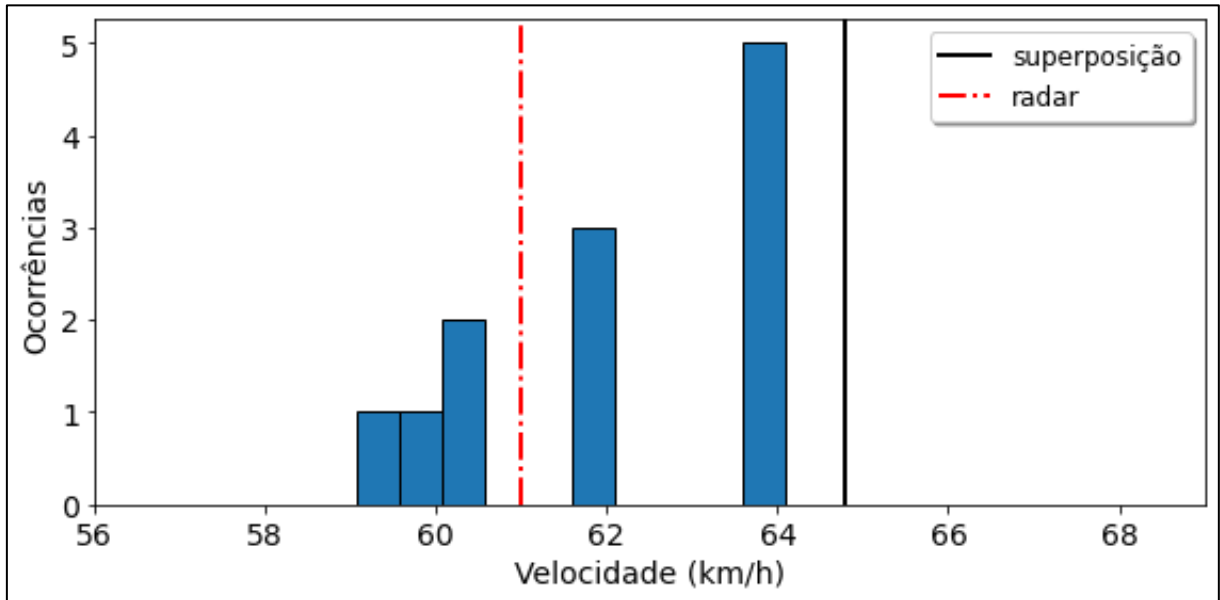
Fonte: autor (2023).

Figura 18 – Distribuição dos valores de velocidade obtidos pelos 12 voluntários, utilizando o método de razão cruzada convencional nas imagens de pior nitidez. Velocidade de referência (método de projeção reversa) de 52,9 km/h. Em vermelho o radar e em preto o método de projeção reversa.



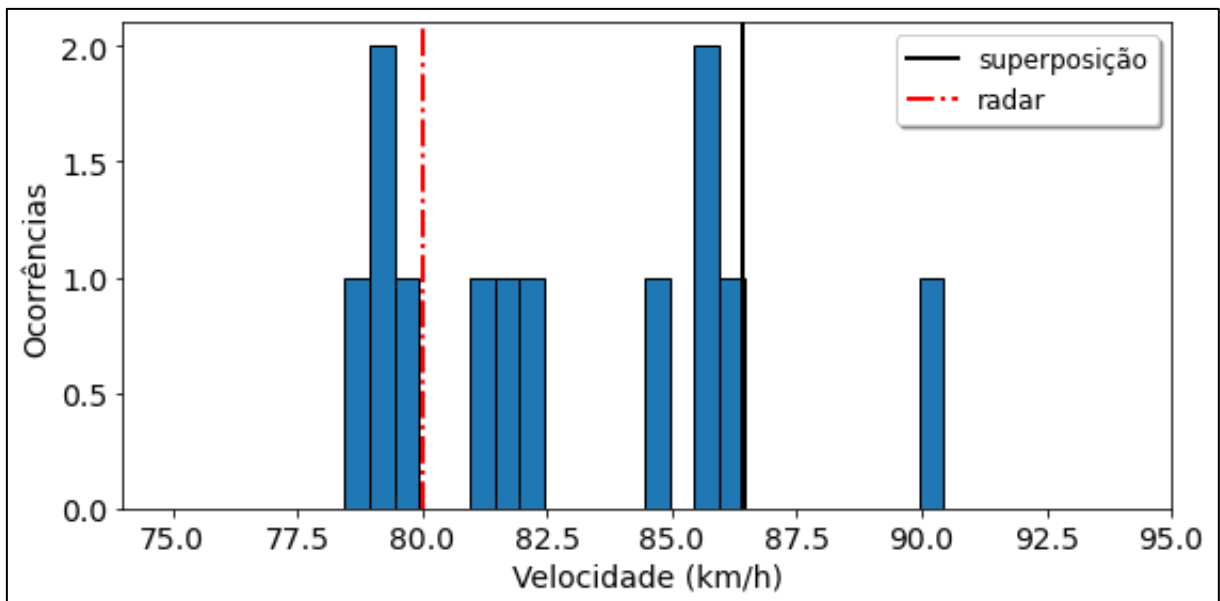
Fonte: autor (2023).

Figura 19 – Distribuição dos valores de velocidade obtidos pelos 12 voluntários, utilizando o método de razão cruzada convencional nas imagens de pior nitidez. Velocidade de referência (método de projeção reversa) de 64,8 km/h. Em vermelho o radar e em preto o método de projeção reversa.



Fonte: autor (2023).

Figura 20 – Distribuição dos valores de velocidade obtidos pelos 12 voluntários, utilizando o método de razão cruzada convencional nas imagens de pior nitidez. Velocidade de referência (método de projeção reversa) de 86,4 km/h. Em vermelho o radar e em preto o método de projeção reversa.



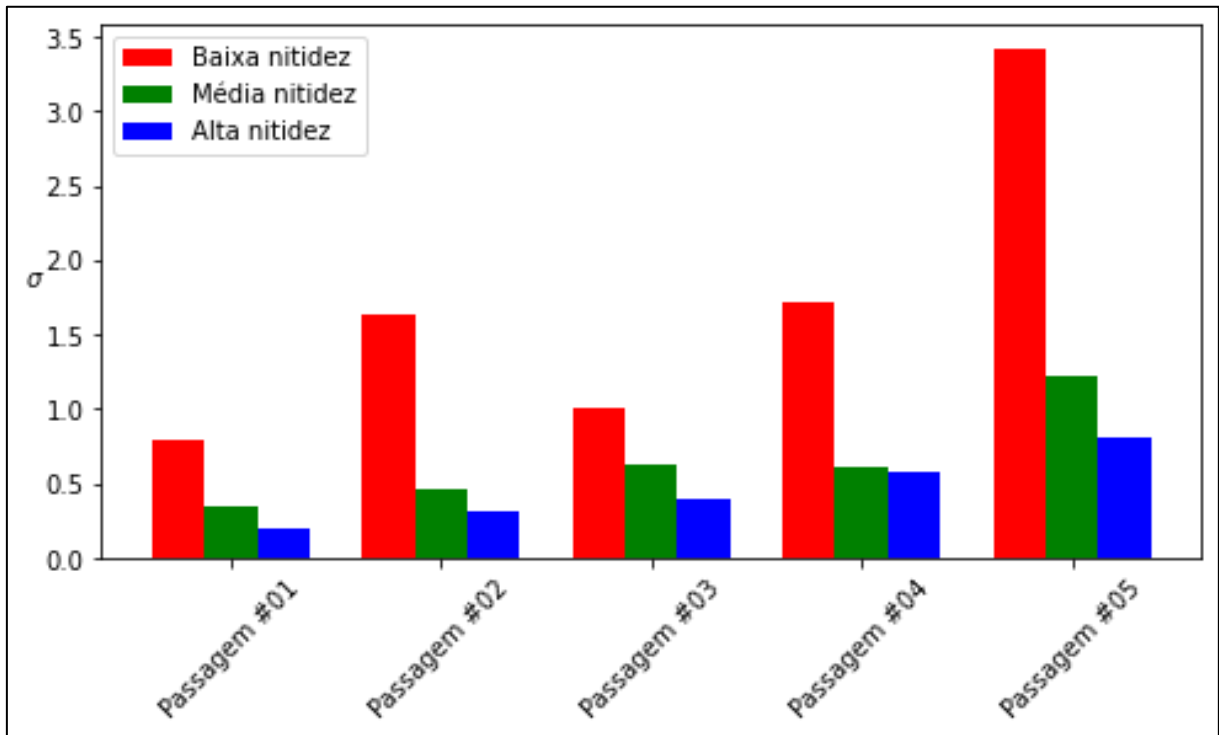
Fonte: autor (2023).



### 5.2.1 Comparação entre Cenários

Foram calculados os valores de desvio padrão das distribuições de velocidades obtidas pelos voluntários utilizando o método da razão cruzada convencional para cada câmera e passagem. Na Figura 21 pode-se observar os valores encontrados.

Figura 21 – Desvios padrões para as distribuições de velocidade obtidas pelos voluntários através do método da razão cruzada convencional para cada uma das três câmeras e passagem.

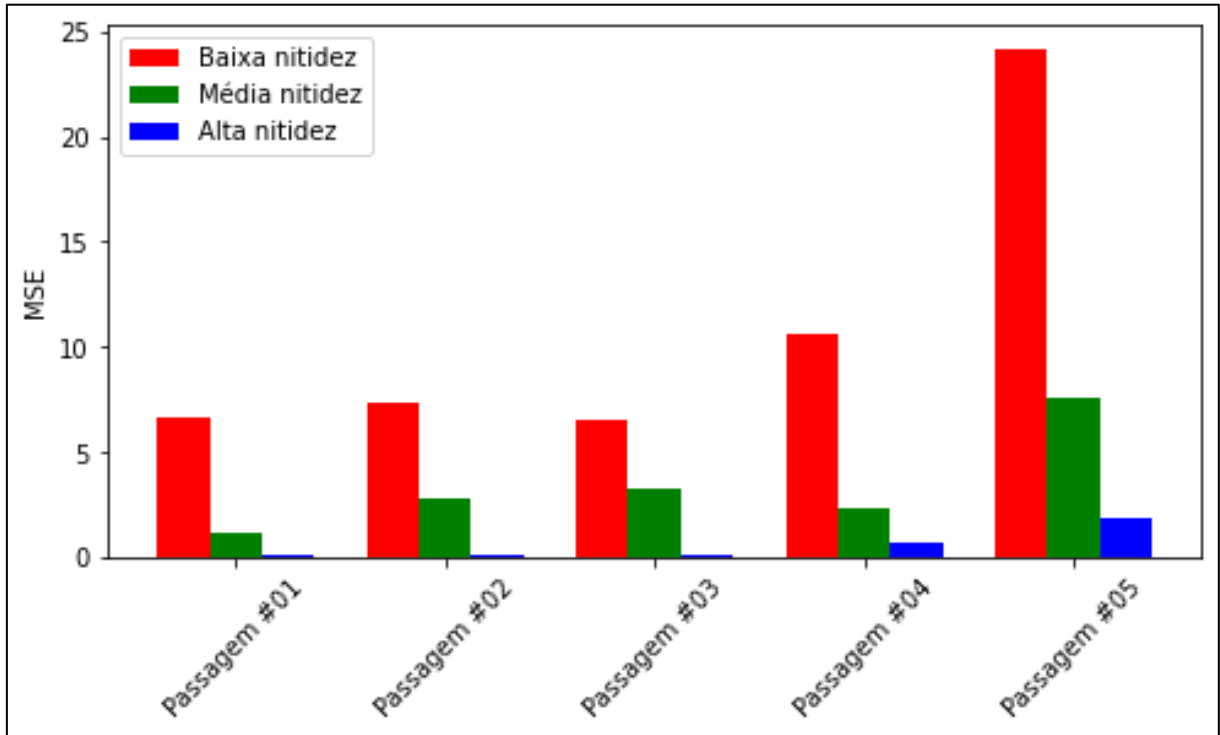


Fonte: autor (2023).

Além disso, também foi calculado o erro quadrático médio entre as estimativas de velocidade dos voluntários utilizando o método da razão cruzada convencional para cada câmera e passagem e a referência de velocidade proveniente do método da projeção reversa. Os resultados podem ser apresentados na Figura 22.

Na Tabela 3 pode-se visualizar a média, o desvio padrão e o erro percentual das distribuições associadas a cada câmera e passagem.

Figura 22 – Valores de erro quadrático médio (MSE) encontrados para as velocidades obtidas a partir das marcações individuais associadas a cada uma das três câmeras, para cada passagem.



Fonte: autor (2023).

Tabela 3 – Velocidades médias, desvios padrões e erros percentuais (em relação ao método de projeção reversa) obtidos para as estimativas realizadas pelos voluntários utilizando o método da razão cruzada convencional.

Passagem	Câmera VIP 1130 B G3 (baixa definição/nitidez)			Câmera VIP 3260 Z G2 (média definição/nitidez)			Câmera VIP 5550 Z IA (alta definição/nitidez)		
	$\mu$ (km/h)	$\sigma$ (km/h)	erro (%)	$\mu$ (km/h)	$\sigma$ (km/h)	erro	$\mu$ (km/h)	$\sigma$ (km/h)	erro (%)
#01	26,34	0,79	-8,52%	27,80	0,34	-3,46%	28,34	0,20	0,58%
#02	41,76	1,63	-4,93%	41,59	0,46	-3,72%	42,30	0,32	-0,46%
#03	50,54	1,00	-4,46%	51,19	0,63	-3,23%	51,85	0,40	0,02%
#04	62,03	1,72	-4,27%	61,81	0,62	-2,22%	63,83	0,58	0,96%
#05	82,87	3,42	-4,09%	83,94	1,22	-2,84%	85,30	0,81	-1,28%

Fonte: autor (2023).

### 5.3 EXPERIMENTOS DE VERIFICAÇÃO: MÉTODO PROPOSTO

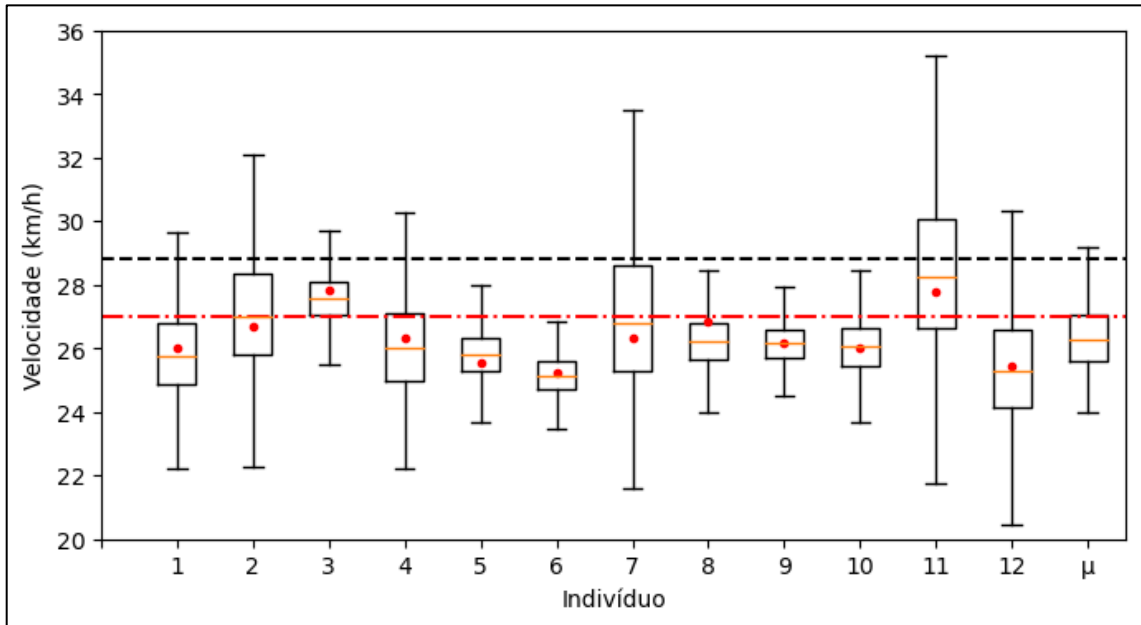
Nesta seção são apresentados resultados para que se possa obter um melhor entendimento sobre o uso do método proposto.

### 5.3.1 Resultados com Voluntários

Assumindo que o processo de marcação do centro de eixo resulta em uma variável aleatória, foram utilizadas as marcações dos limites (máximo e mínimo) definidos pelos voluntários para cada centro de eixo de forma a ajustar uma distribuição gaussiana truncada. A média de cada variável aleatória foi definida como o valor do centro de eixo utilizado no método da razão cruzada convencional. Assumiu-se um valor de desvio padrão infinito, resultando, portanto, em uma distribuição uniforme. A partir disso, foi gerado artificialmente um número de  $N = 10^5$  amostras, vista a equivalência da utilização da equação (30) utilizando informações obtidas a partir de um gerador de números pseudoaleatórios (menor tempo de realização) com a equação (52) (maior acurácia), conforme se observou na seção 5.1.1. Considerou-se o desvio padrão da variável aleatória FPS como zero, de modo que foi aproximada por uma constante determinística.

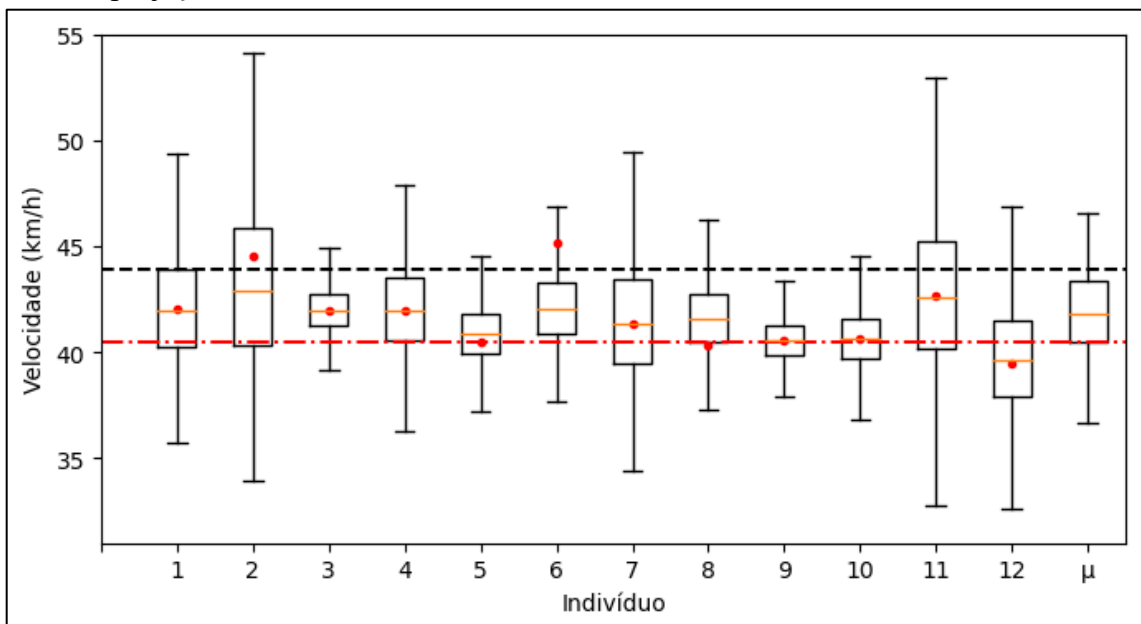
Da Figura 23 à Figura 27 são apresentados os resultados do método proposto para as cinco passagens. Em cada figura é apresentado o diagrama de caixas para cada um dos 12 voluntários individualmente e para a união de todos os resultados ( $\mu$ ). O gráfico em caixa está configurado para apresentar os valores entre o 1º e 3º quartil, mediana indicada por um traço na cor laranja e limites incrementados de 1,5 vezes a amplitude interquartil. O ponto em vermelho representa o valor obtido pelo método da razão cruzada convencional. Desenhado sobre os gráficos, na forma de linhas horizontais, pode-se observar as referências de velocidade obtidas a partir do método da projeção reversa (Compton, Hague, & Murphy, 2003) (linha tracejada preta) e do radar (tracejado-pontilhado vermelho).

Figura 23 – Diagramas de caixa das velocidades estimadas pelos 12 voluntários, utilizando o método proposto nas imagens de baixa nitidez. Velocidade de referência (método de projeção reversa) de 28,8 km/h. Em vermelho (linha ponto-traço) o radar e em preto (linha tracejada) o método de projeção reversa.



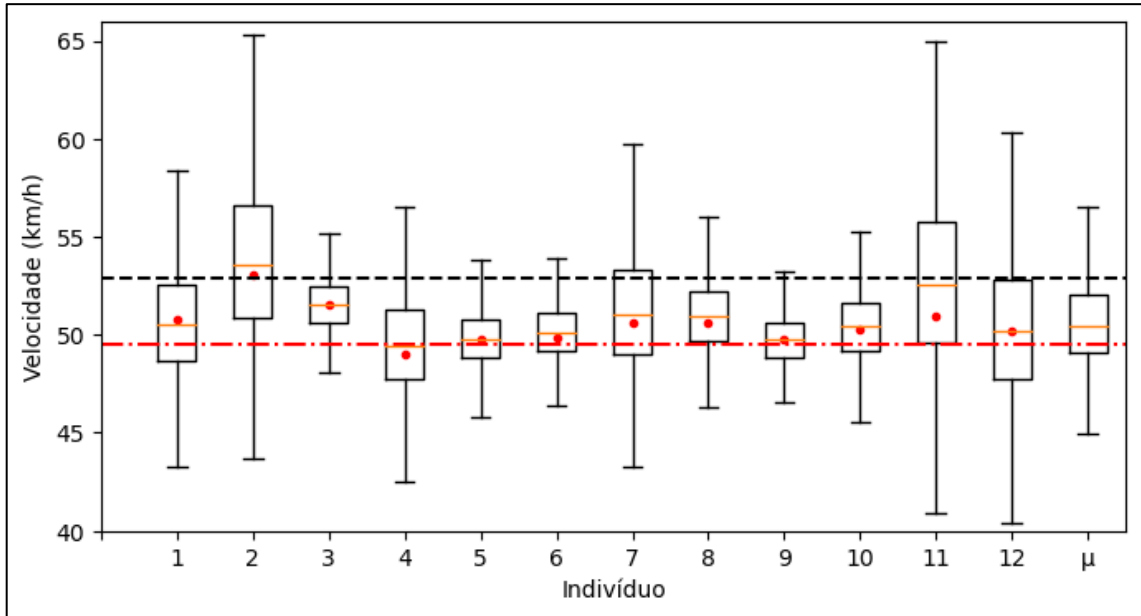
Fonte: autor (2023).

Figura 24 – Diagramas de caixa das velocidades estimadas pelos 12 voluntários, utilizando o método proposto nas imagens de baixa nitidez. Velocidade de referência (método de projeção reversa) de 43,9 km/h. Em vermelho (linha ponto-traço) o radar e em preto (linha tracejada) o método de projeção reversa.



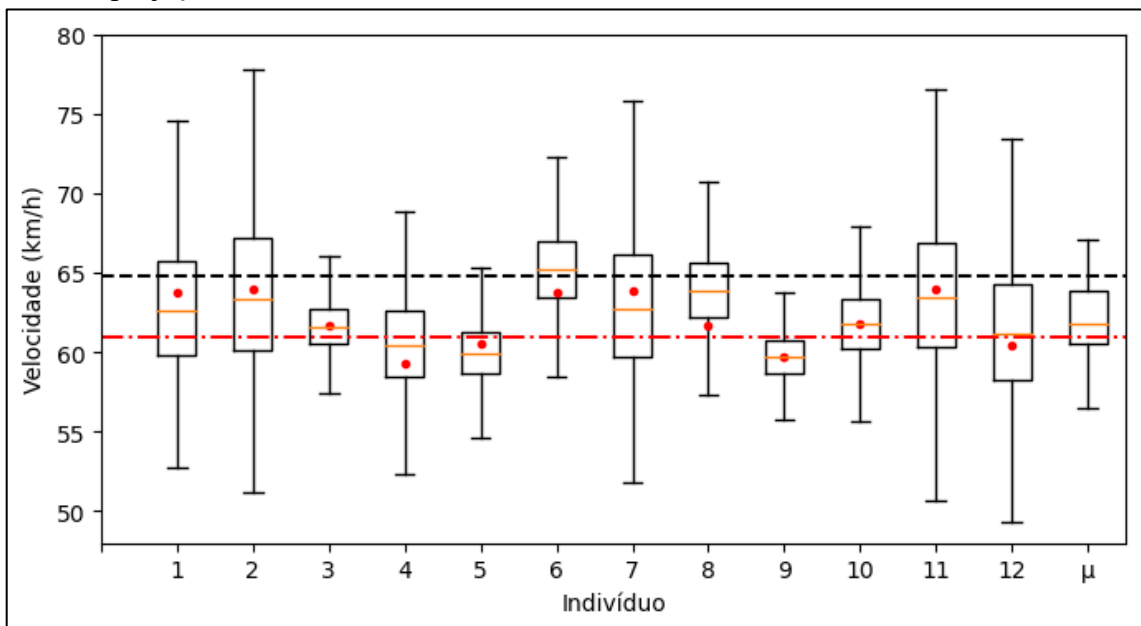
Fonte: autor (2023).

Figura 25 – Diagramas de caixa das velocidades estimadas pelos 12 voluntários, utilizando o método proposto nas imagens de pior nitidez. Velocidade de referência (método de projeção reversa) de 52,9 km/h. Em vermelho (linha ponto-traço) o radar e em preto (linha tracejada) o método de projeção reversa.



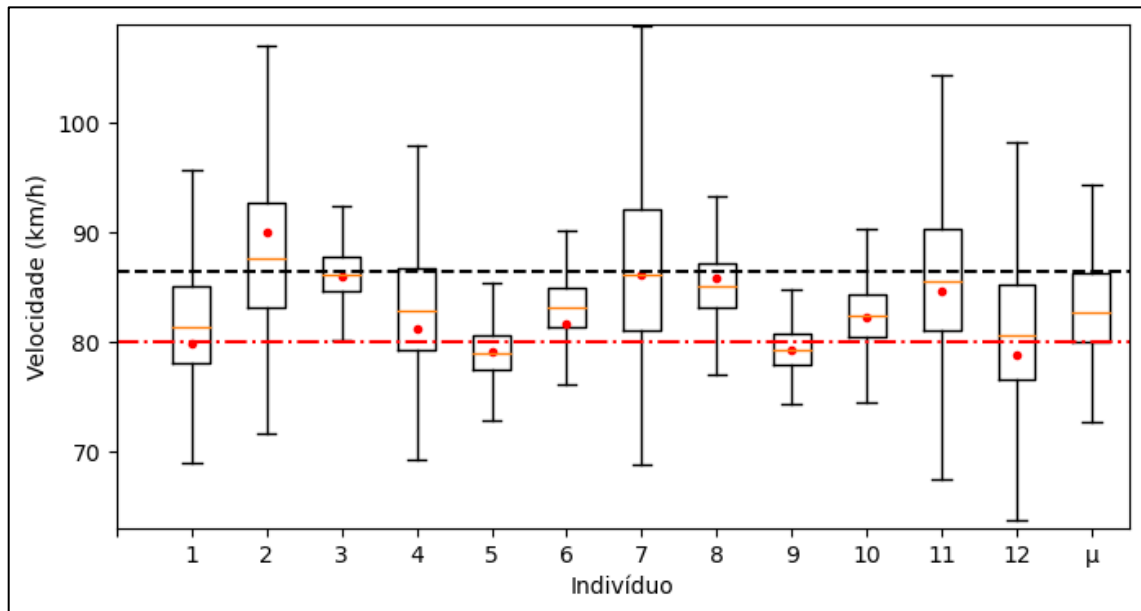
Fonte: autor (2023).

Figura 26 – Diagramas de caixa das velocidades estimadas pelos 12 voluntários, utilizando o método proposto nas imagens de pior nitidez. Velocidade de referência (método de projeção reversa) de 64,8 km/h. Em vermelho (linha ponto-traço) o radar e em preto (linha tracejada) o método de projeção reversa.



Fonte: autor (2023).

Figura 27 – Diagramas de caixa das velocidades estimadas pelos 12 voluntários, utilizando o método proposto nas imagens de pior nitidez. Velocidade de referência (método de projeção reversa) de 86,4 km/h. Em vermelho (linha ponto-traço) o radar e em preto (linha tracejada) o método de projeção reversa.

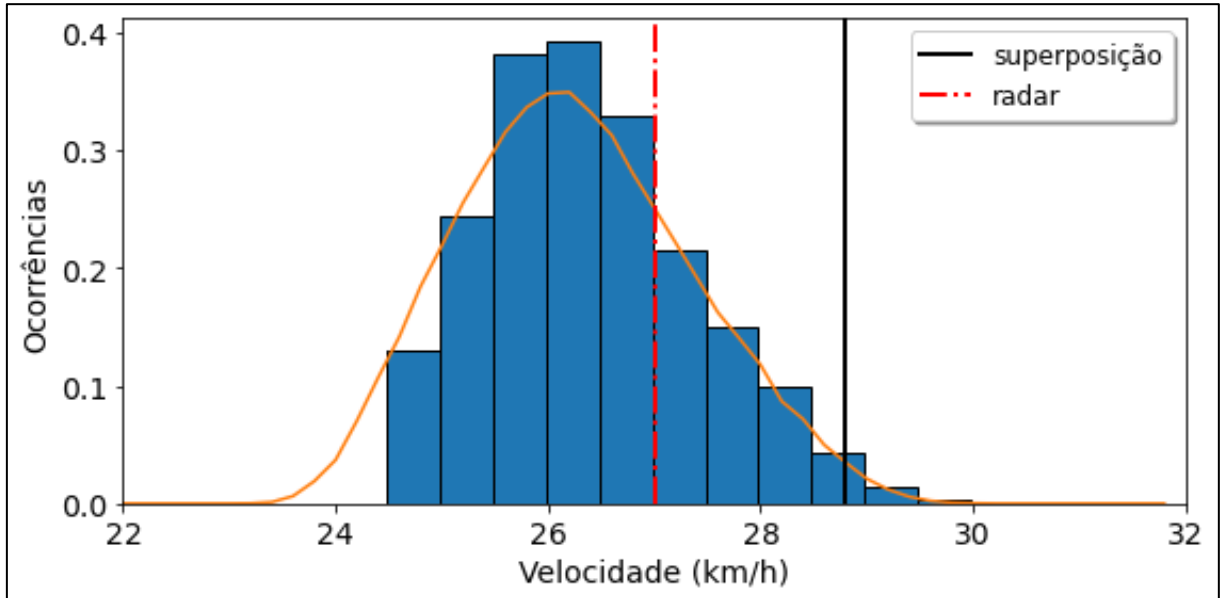


Fonte: autor (2023).

### 5.3.2 Reforço Artificial do Conjunto de Dados

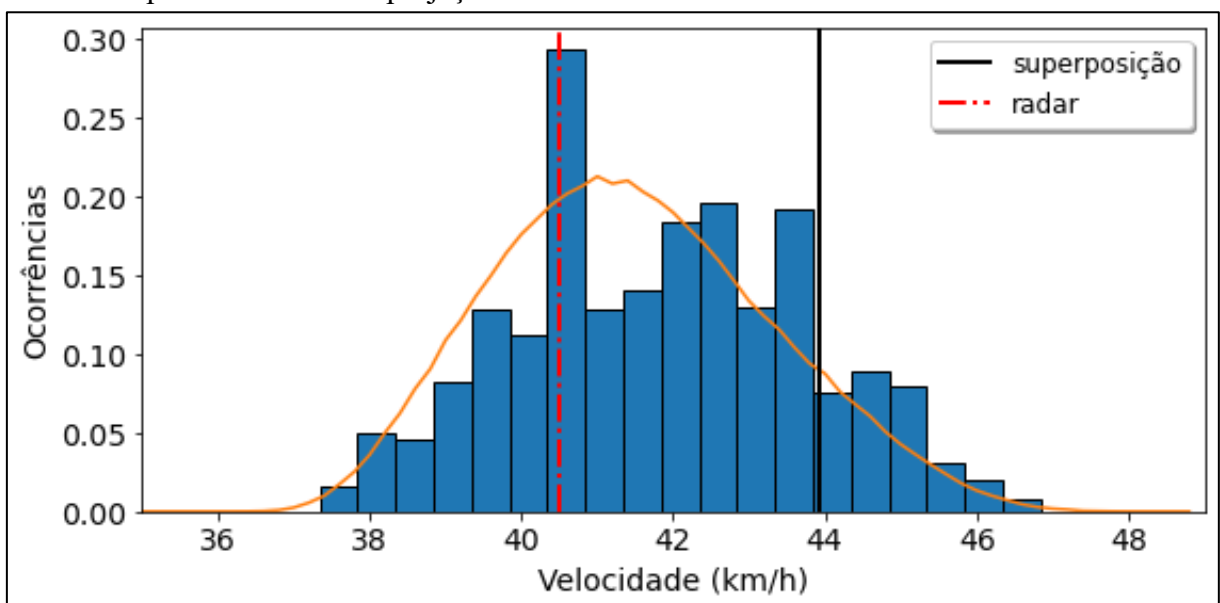
Em decorrência do pequeno número de voluntários e imagens, de forma a aumentar o conjunto de amostras de velocidade, foi feito um cruzamento entre as marcações dos diferentes indivíduos. Isto é, considerando-se a mesma imagem, utilizou-se combinações das marcações (pontos A, B, C e D) entre todos os voluntários para calcular a velocidade a partir do método de razão cruzada convencional. Dessa forma, a quantidade de resultados é igual ao número de participantes elevado à quarta potência ( $12^4 = 20736$ ). Na Figura 28 à Figura 32 pode-se visualizar as distribuições das velocidades resultantes. De forma sobreposta também são mostradas a velocidade de referência (linha contínua preta), obtida pelo método da projeção reversa, a velocidade média obtida pelo radar (linha tracejado-pontilhado vermelho) e a FDP obtida com o uso da equação (52) utilizando os valores médios das marcações efetuadas pelos participantes (curva em laranja).

Figura 28 – Distribuição dos valores de velocidade considerando a combinação das marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de baixa nitidez. Velocidade de referência (método de projeção reversa) de 28,8 km/h. Em laranja a FDP segundo a equação (52), em vermelho o radar e em preto o método de projeção reversa.



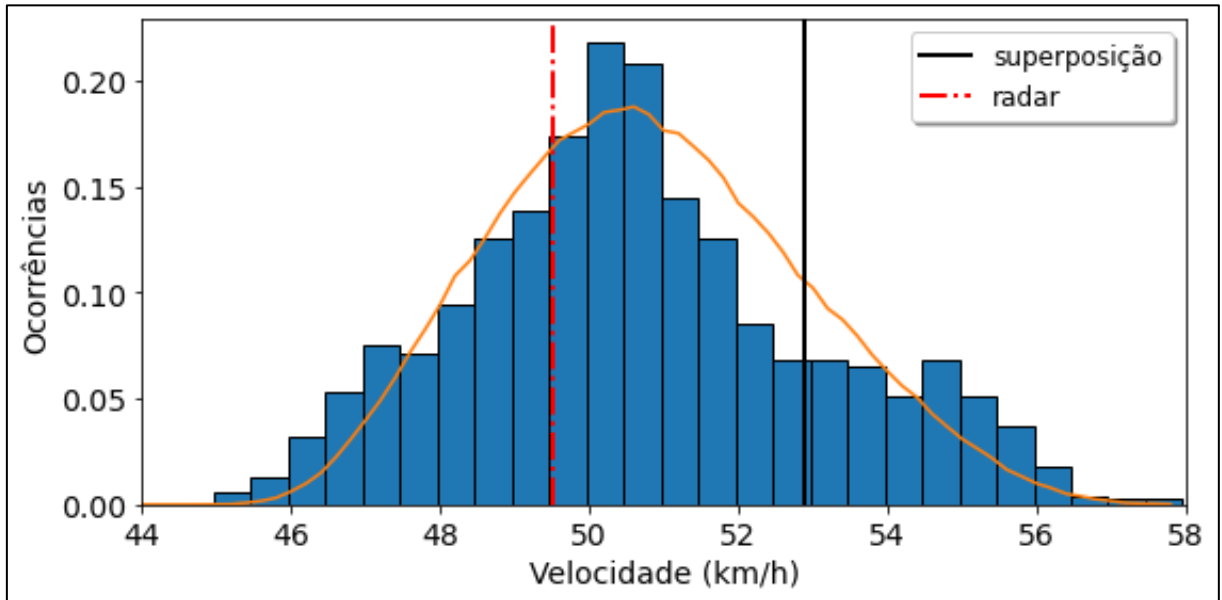
Fonte: autor (2023).

Figura 29 – Distribuição dos valores de velocidade considerando a combinação das marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de baixa nitidez. Velocidade de referência (método de projeção reversa) de 43,9 km/h. Em laranja a FDP segundo a equação (52), em vermelho o radar e em preto o método de projeção reversa.



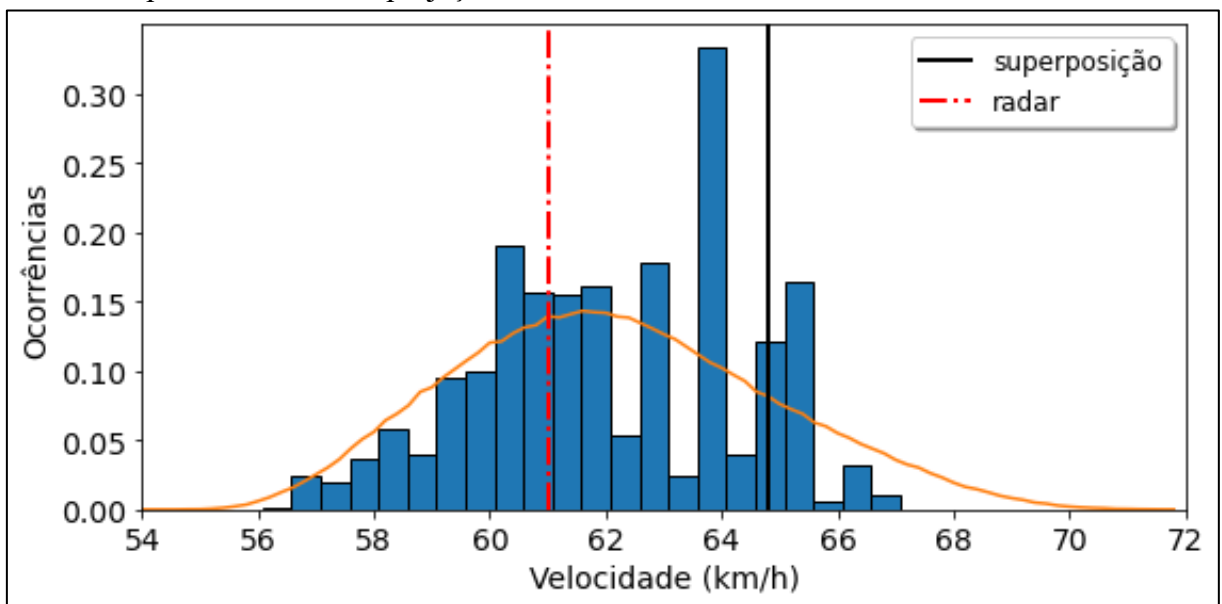
Fonte: autor (2023).

Figura 30 – Distribuição dos valores de velocidade considerando a combinação das marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de baixa nitidez. Velocidade de referência (método de projeção reversa) de 52,9 km/h. Em laranja a FDP segundo a equação (52), em vermelho o radar e em preto o método de projeção reversa.



Fonte: autor (2023).

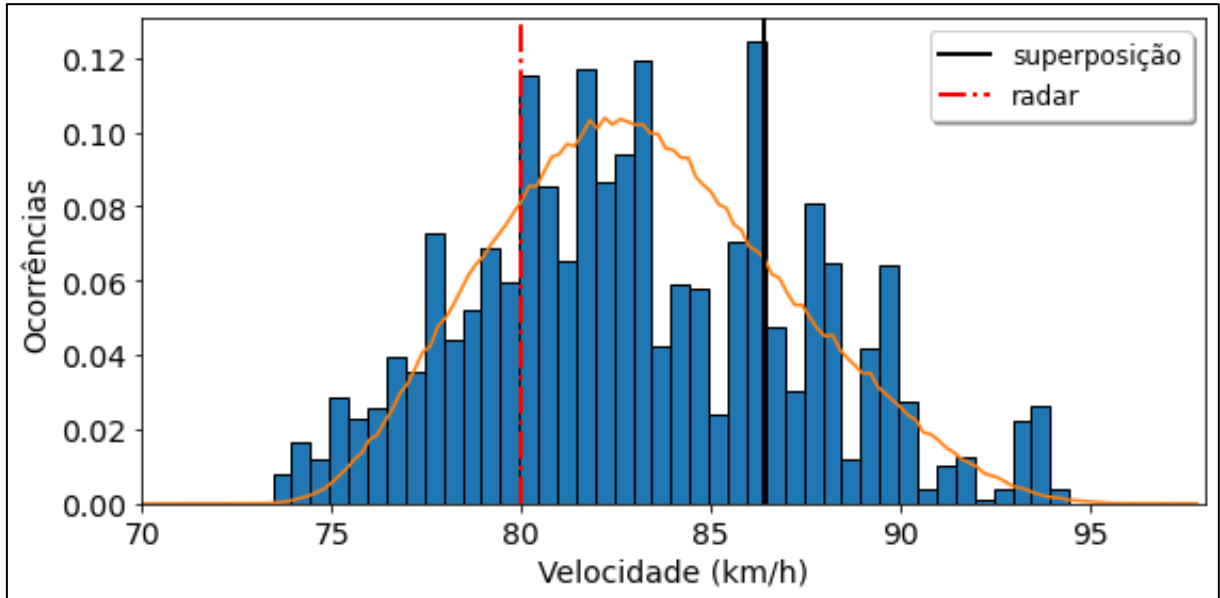
Figura 31 – Distribuição dos valores de velocidade considerando a combinação das marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de baixa nitidez. Velocidade de referência (método de projeção reversa) de 64,8 km/h. Em laranja a FDP segundo a equação (52), em vermelho o radar e em preto o método de projeção reversa.



Fonte: autor (2023).



Figura 32 – Distribuição dos valores de velocidade considerando a combinação das marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de baixa nitidez. Velocidade de referência (método de projeção reversa) de 86,4 km/h. Em laranja a FDP segundo a equação (52), em vermelho o radar e em preto o método de projeção reversa.



Fonte: autor (2023).

Na Tabela 4 pode-se visualizar a comparação entre os valores de velocidade obtidos pela média das distribuições em relação aos valores obtidos a partir do valor esperado da FDP (equação (53)), bem como os intervalos obtidos de forma simétrica em relação à média, contendo 95% da área das respectivas FDPs. Os resultados para as situações de média e alta nitidez podem ser visualizados no Apêndice B.

Tabela 4 – Comparação das médias das distribuições obtidas a partir das combinações de marcações dos participantes e pelas FDPs. Velocidade em km/h.

	Câmera VIP 1130 B G3 (baixa definição)				Proj. Rev.	Radar
	Distribuição	FDP	Mín. (FDP)	Max. (FDP)		
<b>Passagem #01</b>	26,37	26,26	24,75	27,75	28,80	27,00
<b>Passagem #02</b>	41,81	41,46	38,88	44,04	43,90	40,50
<b>Passagem #03</b>	50,68	50,78	47,91	53,65	52,90	49,50
<b>Passagem #04</b>	62,09	62,13	58,48	65,78	64,80	61,00
<b>Passagem #05</b>	83,02	83,20	78,37	88,03	86,40	79,00

Fonte: autor (2023).

## 6 DISCUSSÃO

Neste capítulo é apresentada uma discussão em relação aos resultados obtidos.

### 6.1 UTILIZAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

Os resultados apresentados na seção 5.1 referem-se a duas formas de utilização do método proposto em aplicações forenses. Na primeira forma (seção 5.1.1), é calculada a probabilidade de a velocidade do veículo sob análise estar contida em um determinado intervalo arbitrário de interesse. Nesta mesma seção também são apresentadas evidências de que os resultados obtidos a partir das equações (52) e (54) são aderentes à realizações da equação (30) utilizando geração de números pseudoaleatórios (Tabela 2), o que corrobora a validade da equação (52) (Figura 15). Na segunda aplicação (seção 5.1.2), apresenta-se uma inversão do problema apresentado na seção 5.1.1 que permite obter o intervalo de velocidades a partir da definição da probabilidade desejada. Para simplificar o processo, foi incluída a restrição de que o intervalo deve ser simétrico em relação à média, mas isso não é uma limitação associada ao método, apenas ao exemplo de aplicação.

O método proposto neste trabalho foi desenvolvido a partir de premissas probabilísticas razoáveis que estabelecem que, embora seja possível identificar um intervalo no qual o centro de eixo esteja contido, nem sempre a posição correta é adequadamente conhecida, de forma que a marcação realizada pelo perito pode ser considerada uma variável aleatória. Como resultado, a equação (52) foi derivada utilizando a teoria de processos estocásticos, fornecendo não apenas o suporte para obtenção da distribuição de velocidades através de simulações com variáveis pseudoaleatórias, como também uma formulação matemática para sua FDP. A partir desses resultados, diferentes inferências sobre as incertezas associadas podem ser realizadas.

### 6.2 EXPERIMENTOS COM O MÉTODO CONVENCIONAL

A partir da inspeção dos resultados obtidos na seção 5.2, verifica-se uma variabilidade consistente nos resultados dos voluntários, principalmente nas imagens com menor nitidez (Figura 16 à Figura 20). Os resultados referentes às imagens de média e alta nitidez podem ser encontrados no Apêndice B. As referências de velocidade a partir do método da projeção

reversa e da velocidade média captada por radar não coincidem necessariamente com o intervalo de velocidades estimadas pelos peritos nem com o valor médio dessas estimativas, embora o número de voluntários possa ser considerado pequeno para uma conclusão. De qualquer forma, verifica-se que há uma incerteza não nula nas medidas de velocidade obtidas a partir do método da razão cruzada convencional e que este método não provê informações quantitativas acerca dela.

Na Figura 21, pode ser visualizado de forma gráfica o desvio padrão das estimativas dos 12 peritos utilizando o método da razão cruzada convencional. À medida em que a velocidade aumenta, aumenta a incerteza nos resultados desse método. De forma semelhante, o desvio padrão é maior quanto pior for a nitidez da imagem. A Figura 22 apresenta o erro quadrático médio em relação ao resultado obtido pelo método da projeção reversa. A Tabela 3 apresenta um resumo dos resultados obtidos, indicando que o maior erro percentual na estimativa de velocidade ocorre para as imagens de baixa nitidez (8,2%).

A partir dos resultados, pode-se concluir que estimações de velocidade através do método de razão cruzada convencional, mesmo envolvendo peritos criminais treinados e com experiência nos exames periciais de imagem, apresentam variações que podem comprometer um processo judicial. Conforme a Figura 20, para o valor de referência de 86,4 km/h, por exemplo, há uma diferença de aproximadamente 11 km/h entre a velocidade mínima e máxima para as imagens de baixa nitidez. Essa diferença pode ser relevante nos casos de investigação criminal envolvendo ocorrências de trânsito em que o veículo envolvido estava desenvolvendo velocidade próxima ao limite da via, tendo em vista que pequenas diferenças podem induzir a um julgamento equivocado tanto em sentido de inocência quanto de condenação.

A partir do exposto, constata-se a necessidade de que os resultados dos exames de estimativa de velocidade no âmbito pericial sejam acompanhados de informações quantitativas acerca de sua incerteza.

### 6.3 EXPERIMENTOS COM O MÉTODO PROPOSTO

Na seção 5.3.1, a partir da inspeção dos diagramas de caixa apresentados da Figura 23 à Figura 27, observa-se que as estimativas de velocidade obtidas a partir do método da razão cruzada convencional (representadas pelos pontos vermelhos) estão contidas entre o 1º e 3º quartil da distribuição obtida pelo método proposto, na maior parte dos casos. Note-se que, a velocidade estimada pelo método convencional não coincide, necessariamente, com a mediana

da distribuição obtida pelo método proposto. Isso é explicado pelo fato de que posição marcada como a mais provável para a localização do centro de eixo, não necessariamente se encontrava no centro do intervalo de existência definido pelo participante. Isso pode ser considerado como um indicativo de que a função densidade de probabilidade da localização do centro de eixo dentro do intervalo não é uniforme.

É interessante notar que os limites da distribuição média ( $\mu$ ) incluem todas as velocidades médias calculadas pelos voluntários utilizando o método da razão cruzada convencional, todas as medianas das distribuições obtidas pelo método proposto, como também a velocidade média estimada pelo radar e pelo método da projeção reversa.

Da Figura 28 à Figura 32, pode-se visualizar as distribuições de velocidade obtidas a partir das combinações das marcações dos centros de eixo efetuadas pelos voluntários. A FDP estimada pelo método proposto utilizou intervalos para os centros de eixos definidos como os limites mais amplos entre os apresentados pelos voluntários. Como resultado, verificou-se certa aderência à distribuição simulada e que as velocidades obtidas pelo radar e pelo método da projeção reversa sempre se encontram contidas dentro dos limites de existência da distribuição (probabilidade não-nula). Esse resultado é destacado na Tabela 4 que apresenta um resumo das velocidades obtidas.

#### 6.4 DISCUSSÃO GERAL

O método proposto para a estimativa de velocidade é baseado em um conjunto de premissas razoáveis que resulta na qualificação da velocidade estimada como uma variável aleatória. Desta forma, a velocidade estimada do veículo é caracterizada não apenas por um valor médio, mas por uma função densidade de probabilidade. Como principal vantagem sobre o método convencional, cita-se a incorporação das incertezas iniciais no processo de estimação, resultando na possibilidade de obtenção das incertezas finais decorrentes. Isso permite uma abordagem mais realista e confiável, fornecendo informações sobre a variabilidade associada à estimativa de velocidade.

O método proposto permite apresentar o resultado em termos de uma incerteza em torno da média estimada, o que torna mais clara a identificação das limitações do processo de medição. Isso também resulta em uma representação mais compreensível dos resultados, especialmente para leigos no assunto. Ao fornecer um intervalo de confiança em torno da média, o método proposto informa sobre a faixa de valores prováveis para a velocidade

estimada. Esta abordagem transparente e intuitiva facilita a interpretação dos resultados e ajuda a evitar conclusões errôneas ou simplistas, promovendo uma análise mais clara dos valores obtidos para subsidiar o processo criminal.

Uma importante vantagem do método proposto, ao evitar conclusões pontuais sobre a velocidade média, é evitar a confrontação equivocada entre laudos de diferentes especialistas que utilizem as mesmas imagens e o método convencional. Em vez de diferentes valores determinísticos, sem informações quanto às incertezas envolvidas, podem ser utilizadas faixas de velocidade com probabilidades associadas.

Embora seja necessário um número maior de voluntários peritos para comprovar a acurácia e precisão do método proposto em relação ao método convencional, foram apresentadas evidências das vantagens da utilização de uma abordagem inovadora ao lidar com as incertezas inerentes ao processo de estimativa de velocidade. Ao incorporar as incertezas no processo de estimação e de fornecer uma medida quantitativa da variabilidade envolvida, o método proposto contribui para uma análise forense mais robusta. O que possibilita uma avaliação mais precisa das provas materiais e uma compreensão mais completa dos resultados obtidos, garantindo uma abordagem mais aprofundada para a análise de estimativa de velocidade de veículos.

## 7 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada a proposta de uma generalização do método de razão cruzada, proposto por Wong *et al.* (2014), referente à estimação de velocidade por vídeoanálise. Método esse, amplamente utilizado pelas unidades periciais brasileiras e internacionais nas análises de sinistros de trânsito em que a velocidade dos envolvidos pode ser relevante para o processo criminal ou cível.

Na seção 2 foram descritos os principais métodos de estimação de velocidade por vídeoanálise presentes na literatura, bem como suas vantagens e desvantagens. O método da razão cruzada foi destacado tendo em vista o fato de que o deslocamento ao local do evento pela equipe pericial não é necessário, permitindo maior eficiência no tempo dos servidores e redução de recursos financeiros.

Na seção 3 foi apresentado o método proposto, denominado de razão cruzada generalizada, em que valores determinísticos são substituídos por intervalos de existência, o que caracterizaria uma formulação probabilística. Definiu-se a distribuição gaussiana truncada como estrutura estatística teórica genérica que, em casos práticos, é particularizada para a distribuição uniforme. Uma formulação para o cálculo da probabilidade do veículo se encontrar dentro de um determinado intervalo de velocidade foi desenvolvida.

Na seção 4 são apresentadas formas de utilização do método proposto, assim como a metodologia utilizada para realizar simulações computacionais e experimentos envolvendo voluntários peritos criminais. Na seção 5 foram apresentados os resultados obtidos.

Na seção 6 foi apresentada uma discussão, mostrando evidências da necessidade, validade e vantagem do uso do método proposto em comparação ao convencional.

A partir do exposto, acredita-se que, com o método proposto, os peritos criminais podem apresentar um resultado mais robusto ao juízo, englobando incertezas atinentes às características do material analisado, como nitidez da imagem, qualidade do vídeo, taxa de gravação incerta etc., trazendo mais justiça ao processo criminal com um menor custo ao contribuinte.

### 7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, destacam-se:

- estudo envolvendo mais participantes voluntários para caracterizar a distribuição estatística de marcações provenientes de peritos criminais previamente treinados no exame pericial de estimativa de velocidade por razão cruzada;
- aplicação do método de Monte Carlo em outros métodos de estimação de velocidade;
- determinação de um método quantitativo para estimar os parâmetros dos intervalos relacionados aos centros de eixo (variáveis aleatórias com distribuição gaussiana truncada), tendo em vista que o método atual depende do fator humano, o que envolve treinamento, bem-estar, descanso, boa estação de trabalho, entre outros.

## REFERÊNCIAS

- Abdel-Aziz, Y., & Karara, H. (2015). Direct linear transformation from comparator coordinates into object. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 81, 103-107. doi:<https://doi.org/10.14358/PERS.81.2.103>
- Baumer. (2022). *Function principle and applications of rolling shutter CMOS cameras*. São Paulo. Fonte: <https://www.baumer.com/br/en/service-support/function-principle/function-principle-and-applications-of-rolling-shutter-cmos-cameras/a/CMOS-rolling-shutter-cameras>
- Bourzeix, F., Bourja, O., Boukhris, M. A., & Es-sbai, N. (2014). Speed estimation using stereoscopic effect. *Tenth International Conference on Signal-Image Technology & Internet-Based Systems*, (pp. 148-151). doi:10.1109/SITIS.2014.62
- Brandon, E., & Westlake, B. G. (2019). Determination of Vehicle Speed from Recorded Video Using Reverse Projection Photogrammetry and File Metadata. *Journal of Forensic Sciences*, 64(5), 1523-1529.
- Brannan, D., Esplen, M., & Gray, J. (2012). *Geometry* (2<sup>a</sup> ed.). Cambridge: Cambridge University press.
- Bruehs, W., & Stout, D. (2021). Determination of average vehicle speed utilizing reverse projection. *Journal of Forensic Sciences*, 67, 188-199. doi:<https://doi.org/10.1111/1556-4029.14891>
- Burkardt, J. (2014). *The Truncated Normal Distribution*. Florida State University, Department of Scientific Computing. Fonte: [https://people.sc.fsu.edu/~jburkardt/presentations/truncated\\_normal.pdf](https://people.sc.fsu.edu/~jburkardt/presentations/truncated_normal.pdf)
- Compton, D., Hague, D., & Murphy, S. (2003). Determination of vehicle speed and traffic signal phasing from cctv images. *6th International Conference on Accident Investigation, Reconstruction, Interpretation and the Law*, (pp. 51-61). Derby.
- Costa, L. R., Rauen, M., & Fronza, A. B. (2020). Car speed estimation based on image scale factor. *Forensic Science International*, 310.
- Desmoulin, G., Kalkat, M., & Milner, T. (2022). Forensic application of inverse and reverse projection photogrammetry to determine subject location and orientation when both camera and subject move relative to the scene. *Forensic Science International*, 331. doi:<https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2021.111145>
- Dietrich, C. F. (1991). *Uncertainty, calibration, and probability: the statistics of scientific and industrial measurement* (2th ed.). Boca Raton, Florida: Taylor and Francis Group.



- Espindula, A., & Tocchetto, D. (2019). *Criminalística: procedimentos e metodologias* (4ª ed.). Campinas: Millenium.
- FARO. (2021). *Faro FocusS 350*. Fonte: Faro Laser Scanners: <https://www.faro.com/en/Resource-Library/Tech-Sheet/techsheet-faro-focus-laser-scanners>
- Gelman, A., Carlin, J. B., Stern, H. S., Dunson, D., Vehtari, A., & Rubin, D. B. (2014). *Bayesian Data Analysis* (3ª ed.). Boca Raton: CRC Press.
- Golban, C., & Nedeveschi, S. (2013). Speed estimation for scene objects using stereo visual odometry methods. *IEEE 9th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP)*, (pp. 91-94).
- Han, I. (2016). Car speed estimation based on cross-ratio using video data of car-mounted camera (black box). *Forensic Science International*, 269, 89-96.
- Hartley, R., & Andrew, Z. (2003). *Multiple View Geometry in Computer Vision* (2th ed.). Cambridge: Cambridge Univeristy Press.
- Hoogeboom, B., & Alberink, I. (2010). Measurement Uncertainty When Estimating the Velocity of an Allegedly Speeding Vehicle from Images. *Journal of forensic sciences*, 55, 47-51.
- Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - INMETRO. (2019). *Portaria Inmetro/Dimel nº 273, de 11 de dezembro de 2019*. Duque de Caxias.
- Intelbras. (2022). *Especificações técnicas da câmera VIP 3260 Z G2*.
- Intelbras. (2022). *Especificações técnicas das câmeras VIP 1130 B G3 e VIP 1130 D G3*.
- Intelbras. (2022). *Especificações técnicas das câmeras VIP 5550 Z IA e VIP 5550 D Z IA*.
- Kim, J.-H., Oh, W.-T., Choi, J.-H., & Park, J.-C. (2018). Reliability verification of vehicle speed estimate method in forensic videos. *Forensic Science International*, 287, 195-206.
- KINOVEA. (s.d.). *Kinovea*. Fonte: <https://www.kinovea.org/>
- Kolla, E., Adamová, V., & Vertal', P. (2022). Simulation-based reconstruction of traffic incidents from moving vehicle mono-camera. *Science & Justice*, 62(1), 94-109.
- Kumar, T., & Kushwaha, D. S. (2016). An Efficient Approach for Detection and Speed Estimation of Moving Vehicles. *Procedia Computer Science*, 89, 726-731.
- Laroche, E., & Kagami, S. (2009). Dynamical models for position measurement with global shutter and rolling shutter cameras. *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (pp. 5204-5209). doi:10.1109/IROS.2009.5354454
- Laser Tech. (2021). *LTI 20/20 TRUCAM® II specifications*.

- Le, T., Le, N.-T., & Jang, Y. (2015). Performance of Rolling Shutter and Global Shutter Camera in Optical Camera Communications. *2015 International Conference on Information and Communication Technology Convergence*, (pp. 124-128). doi:10.1109/ICTC.2015.7354509
- Lee, R., Wong, G., Wong, S., & Koh, A. (2021). Use of Singapore's "Standard Details of Road Elements" for distance estimation in traffic crash reconstruction: A comparison with onsite measurements and Google Earth Pro. *Forensic Science International*, 313. doi:https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2020.110260
- Liu, S., Yang, X., Cui, J., & Yin, Z. (2017). A Novel Pixel-Based Method to Estimate the Instantaneous Velocity of a Vehicle from CCTV Images. *Journal of Forensic Science*, 62(4). doi:10.1111/1556-4029.13381
- Meingast, M., Christopher, G., & Shankar, S. (2005). Geometric Models of Rolling-Shutter Cameras. *Omnidirectional Vision, Camera Networks and Non-classical Cameras*, 1-8.
- Mieremet, A., Alberink, I., Hoogeboom, B., & Vrijdag, D. (2018). Probability intervals of speed estimations from video images: The Markov Chain Monte Carlo approach. *Forensic Science International*, 288, 29-35.
- Moser, A., & Burg, H. (2017). Estimation of vehicle speed using video images and laserscanner data in PC-Crash. *26th EVU Conference*. Haarlem.
- Mrovlje, J., & Vrančić, D. (2008). Distance measuring based on stereoscopic pictures. *9th International PhD Workshop on Systems and Control: Young Generation Viewpoint*.
- Newman, M., & Barkema, G. (1999). *Monte Carlo methods in statistical physics*. Oxford: Oxford University Press.
- Osman, M., & Tahar, K. (2016). 3D accident reconstruction using low-cost imaging technique. *Advances in Engineering Software*, 100, 231-237. doi:https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.07.007
- Pagounis, V., Tsakiri, M., Palaskas, S., Biza, B., & Zaloumi, E. (2006). 3D Laser Scanning for Road Safety and Accident Reconstruction. *Proceedings of the XXIIIth international FIG congress*, 8.
- Papoulis, A., & Pilai, U. (2002). *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes* (4th ed.). Boston: McGraw Hill.
- Porter, G. (2011). *The reliability of CCTV images as forensic evidence*. Sydney: University of Western Sydney.
- Seckiner, D., Mallet, X., Roux, C., Meuwly, D., & Maynard, P. (2018). Forensic image analysis – CCTV distortion and artefacts. *Forensic Science International*, 285, 77-85.

- Wong, T. W., Tao, C. H., Wong, K. H., & Tam, C. N. (2014). Application of cross-ratio in traffic accident reconstruction. *Forensic Science International*, 235, 19-23.
- World Health Organization. (2018). *Global status report on road safety*.
- Wright, D., Michael, F., Gutwirth, S., Langheinrich, M., Mordini, E., Bellanova, R., . . . Bigo, D. (2010). Sorting out smart surveillance. *Computer Law & Security Review*, 26(4), 343-354.

## ANEXO A – Integração de Monte Carlo

Os procedimentos de integração numérica utilizados neste trabalho foram realizados através do método de integração de Monte Carlo (Newman & Barkema, 1999).

A integração de Monte Carlo é um algoritmo para avaliação aproximada de integrais definidas. É especialmente vantajosa em problemas multidimensionais, em que são escolhidos pontos aleatórios ao invés de uma grade regular. A seguir é apresentada uma pequena descrição do processo realizado.

A média de uma função  $f$  no intervalo entre  $a$  e  $b$  pode ser dada por

$$\bar{f} \Big|_a^b = \frac{1}{b-a} \int_a^b f(x) dx, \quad (60)$$

que pode ser escrita como

$$(b-a) \bar{f} \Big|_a^b = \int_a^b f(x) dx. \quad (61)$$

A média da função  $f$  no intervalo entre  $a$  e  $b$  também pode ser expressa na forma

$$\bar{f} \Big|_a^b = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(x_i), \quad (62)$$

em que os valores  $x_i$  estão contidos aleatoriamente entre  $a$  e  $b$ .

Utilizando (62) em (61), chega-se em

$$\int_a^b f(x) dx = \lim_{N \rightarrow \infty} (b-a) \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(x_i), \quad (63)$$

que pode ser expandido para funções com mais de uma variável da seguinte forma

$$\int_{x_1=a_1}^{b_1} \int_{x_2=a_2}^{b_2} \cdots \int_{x_m=a_m}^{b_m} f(x_1, x_2, \dots, x_m) dx = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{(b_1 - a_1)(b_2 - a_2) \cdots (b_m - a_m)}{N} \cdot \sum_{i=1}^N f(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{mi}), \quad (64)$$

sendo este procedimento denominado integração por Monte Carlo.

O erro na integração por Monte Carlo aproxima-se de  $1/\sqrt{N}$ . Assim sendo, para um  $N$  consideravelmente grande, o erro tende a ser pequeno, de modo que:

$$\int_{x_1=a_1}^{b_1} \int_{x_2=a_2}^{b_2} \cdots \int_{x_m=a_m}^{b_m} f(x_1, x_2, \dots, x_m) dx \approx \frac{(b_1 - a_1)(b_2 - a_2) \cdots (b_m - a_m)}{N} \cdot \sum_{i=1}^N f(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{mi}) \quad (65)$$

## APÊNDICE A – Imagens utilizadas no Experimento

Aqui são apresentadas as imagens que foram apresentadas aos voluntários para marcação dos pontos associados ao método da razão cruzada generalizada.

Figura 33 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #01 com a câmera VIP 1130 B G3 após processo de remoção de distorção, manipulação e adição de reta colinear aos centros de eixo do veículo.



Fonte: autor (2022).

Figura 34 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #01 com a câmera VIP 3260 Z G2 após processo de remoção de distorção, manipulação e adição de reta colinear aos centros de eixo do veículo.



Fonte: autor (2022).

Figura 35 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #01 com a câmera VIP 5550 Z IA após processo de remoção de distorção, manipulação e adição de reta colinear aos centros de eixo do veículo.



Fonte: autor (2022).

Figura 36 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #02 com a câmera VIP 1130 B G3 após processo de remoção de distorção, manipulação e adição de reta colinear aos centros de eixo do veículo.



Fonte: autor (2022).

Figura 37 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #02 com a câmera VIP 3260 Z G2 após processo de remoção de distorção, manipulação e adição de reta colinear aos centros de eixo do veículo.



Fonte: autor (2022).

Figura 38 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #02 com a câmera VIP 5550 Z IA após processo de remoção de distorção, manipulação e adição de reta colinear aos centros de eixo do veículo.



Fonte: autor (2022).

Figura 39 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #03 com a câmera VIP 1130 B G3 após processo de remoção de distorção, manipulação e adição de reta colinear aos centros de eixo do veículo.



Fonte: autor (2022).



Figura 40 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #03 com a câmera VIP 3260 Z G2 após processo de remoção de distorção, manipulação e adição de reta colinear aos centros de eixo do veículo.



Fonte: autor (2022).

Figura 41 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #03 com a câmera VIP 5550 Z IA após processo de remoção de distorção, manipulação e adição de reta colinear aos centros de eixo do veículo.



Fonte: autor (2022).

Figura 42 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #04 com a câmera VIP 1130 B G3 após processo de remoção de distorção, manipulação e adição de reta colinear aos centros de eixo do veículo.



Fonte: autor (2022).

Figura 43 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #04 com a câmera VIP 3260 Z G2 após processo de remoção de distorção, manipulação e adição de reta colinear aos centros de eixo do veículo.



Fonte: autor (2022).

Figura 44 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #04 com a câmera VIP 5550 Z IA após processo de remoção de distorção, manipulação e adição de reta colinear aos centros de eixo do veículo.



Fonte: autor (2022).

Figura 45 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #05 com a câmera VIP 1130 B G3 após processo de remoção de distorção, manipulação e adição de reta colinear aos centros de eixo do veículo.



Fonte: autor (2022).

Figura 46 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #05 com a câmera VIP 3260 Z G2 após processo de remoção de distorção, manipulação e adição de reta colinear aos centros de eixo do veículo.



Fonte: autor (2022).

Figura 47 – Sobreposição de quadros referente à captura da passagem #05 com a câmera VIP 5550 Z IA após processo de remoção de distorção, manipulação e adição de reta colinear aos centros de eixo do veículo.

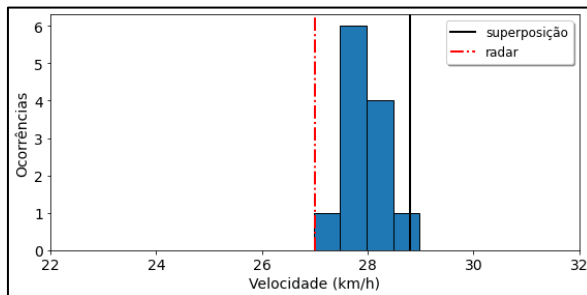


Fonte: autor (2022).

## APÊNDICE B – Resultados para as câmeras de média e alta nitidez

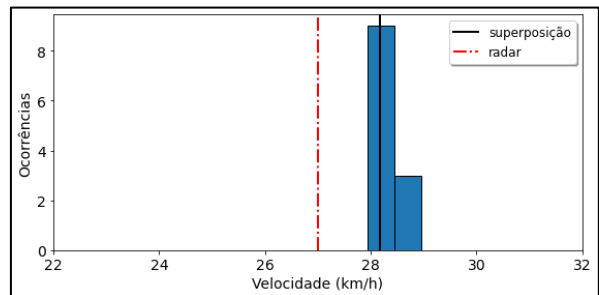
Da Figura 48 à Figura 57, são apresentados os resultados obtidos para as câmeras VIP 3260 Z G2 (média nitidez) e VIP 5550 Z IA (alta nitidez) para cada passagem, considerando as marcações únicas de cada indivíduo e o método convencional.

Figura 48 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de média nitidez, velocidade de referência de 28,8 km/h.



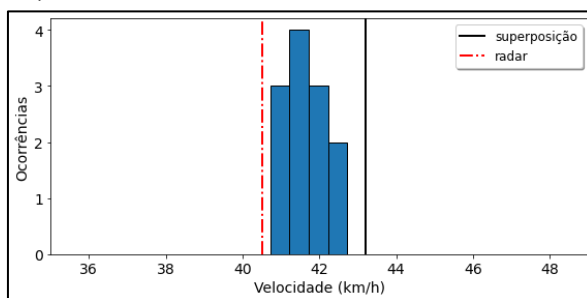
Fonte: autor (2023).

Figura 49 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de alta nitidez, velocidade de referência de 28,8 km/h.



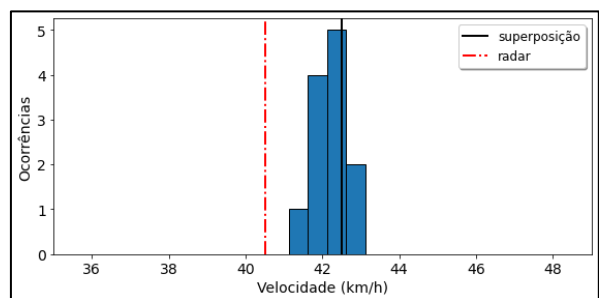
Fonte: autor (2023).

Figura 50 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de média nitidez, velocidade de referência de 43,9 km/h.



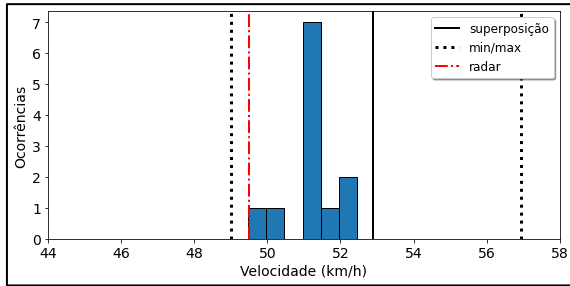
Fonte: autor (2023).

Figura 51 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de alta nitidez, velocidade de referência de 43,9 km/h.



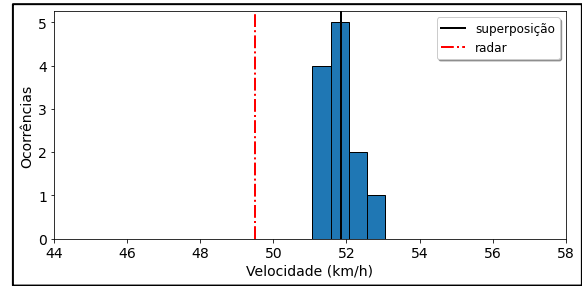
Fonte: autor (2023).

Figura 52 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de média nitidez, velocidade de referência de 52,9 km/h.



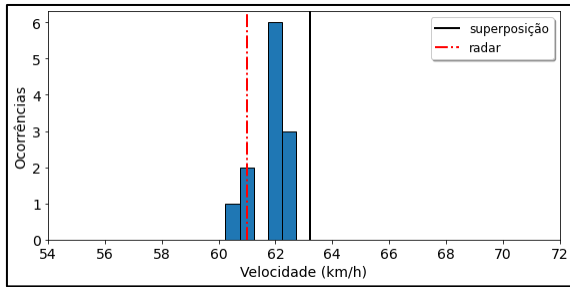
Fonte: autor (2023).

Figura 53 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de alta nitidez, velocidade de referência de 52,9 km/h.



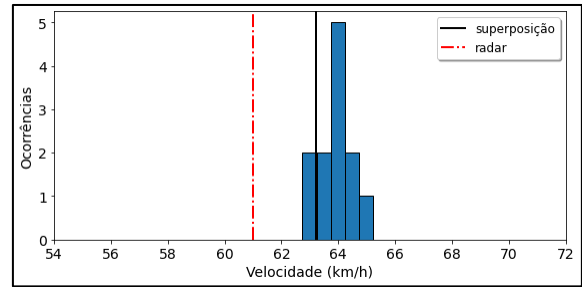
Fonte: autor (2023).

Figura 54 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de média nitidez, velocidade de referência de 64,8 km/h.



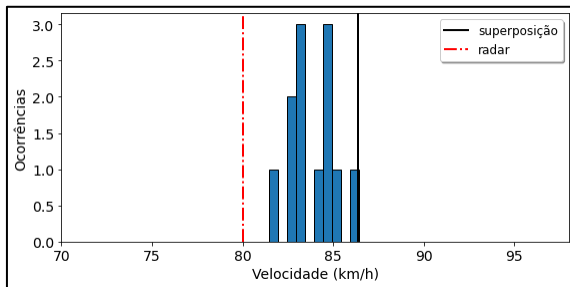
Fonte: autor (2023).

Figura 55 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de alta nitidez, velocidade de referência de 64,8 km/h.



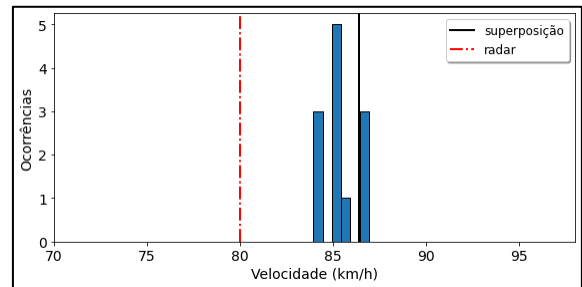
Fonte: autor (2023).

Figura 56 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de média nitidez, velocidade de referência de 86,4 km/h.



Fonte: autor (2023).

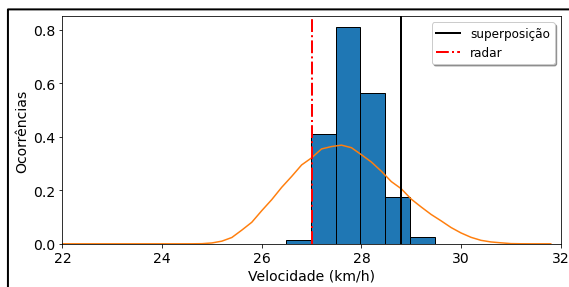
Figura 57 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de alta nitidez, velocidade de referência de 86,4 km/h.



Fonte: autor (2023).

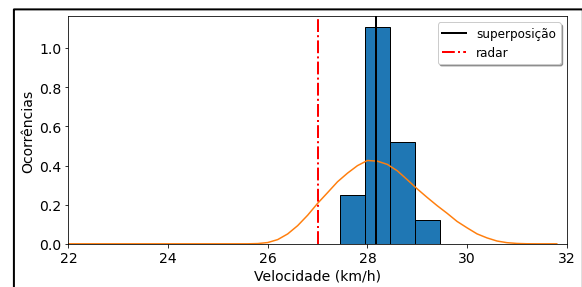
Da Figura 58 à Figura 67, são apresentados os resultados obtidos para as câmeras VIP 3260 Z G2 (média nitidez) e VIP 5550 Z IA (alta nitidez) para cada passagem, considerando as combinações das marcações únicas de cada indivíduo e o método convencional.

Figura 58 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as combinações das marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de média nitidez, velocidade de referência de 28,8 km/h.



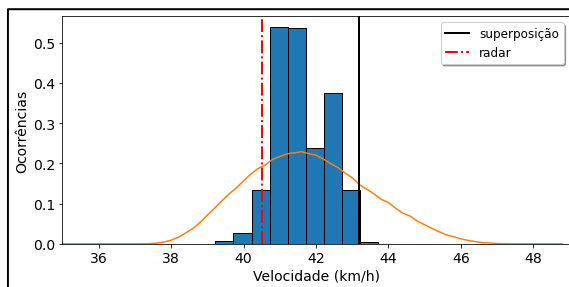
Fonte: autor (2023).

Figura 59 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as combinações das marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de alta nitidez, velocidade de referência de 28,8 km/h.



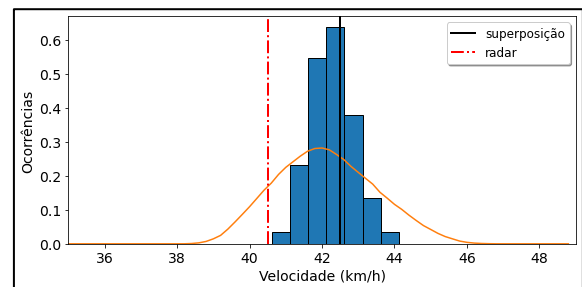
Fonte: autor (2023).

Figura 60 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as combinações das marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de média nitidez, velocidade de referência de 43,9 km/h.



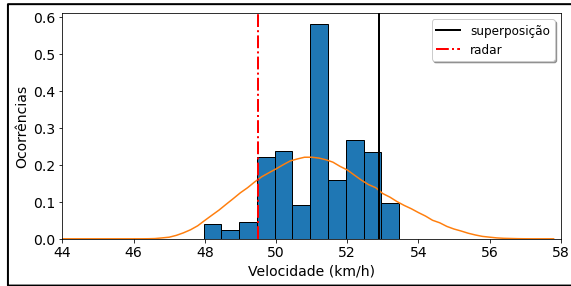
Fonte: autor (2023).

Figura 61 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as combinações das marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de alta nitidez, velocidade de referência de 43,9 km/h.



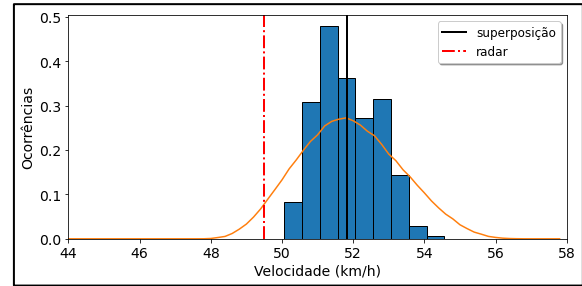
Fonte: autor (2023).

Figura 62 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as combinações das marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de média nitidez, velocidade de referência de 52,9 km/h.



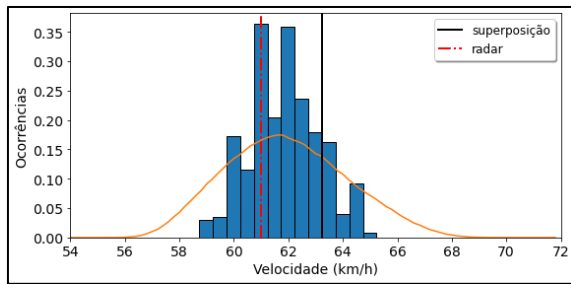
Fonte: autor (2023).

Figura 63 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as combinações das marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de alta nitidez, velocidade de referência de 52,9 km/h.



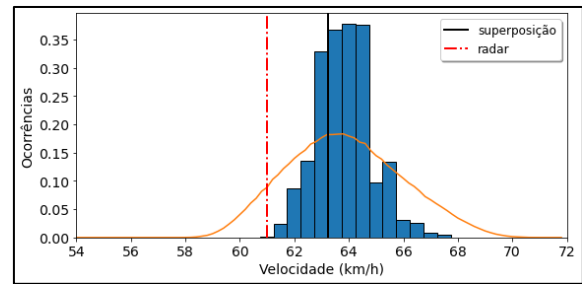
Fonte: autor (2023).

Figura 64 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as combinações das marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de média nitidez, velocidade de referência de 64,8 km/h.



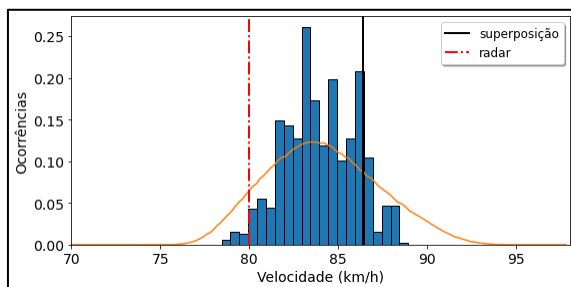
Fonte: autor (2023).

Figura 65 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as combinações das marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de alta nitidez, velocidade de referência de 64,8 km/h.



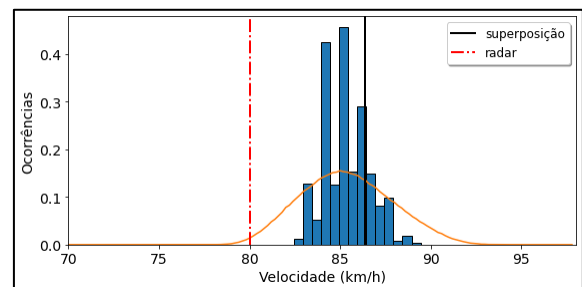
Fonte: autor (2023).

Figura 66 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as combinações das marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de média nitidez, velocidade de referência de 86,4 km/h.



Fonte: autor (2023).

Figura 67 – Distribuição dos valores de velocidade considerando as combinações das marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de alta nitidez, velocidade de referência de 86,4 km/h.

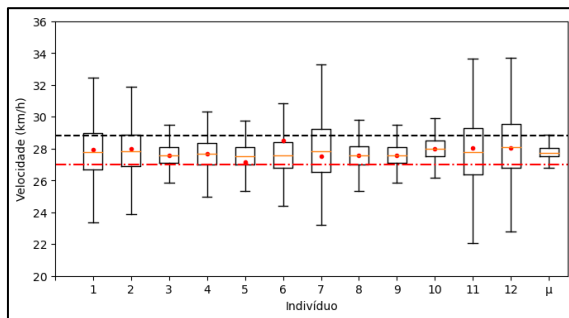


Fonte: autor (2023).



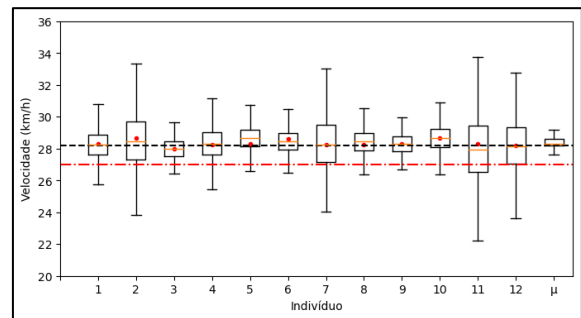
Da Figura 68 à Figura 77, são apresentados os resultados obtidos para as câmeras VIP 3260 Z G2 (média nitidez) e VIP 5550 Z IA (alta nitidez) para cada passagem, por meio das marcações efetuadas considerando o método generalizado.

Figura 68 – Distribuições dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de média nitidez utilizando o método proposto, velocidade de referência de 28,8 km/h.



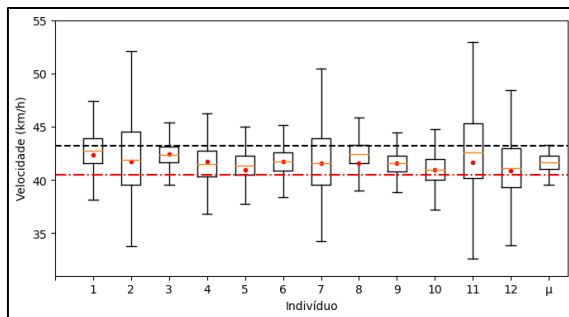
Fonte: autor (2023).

Figura 69 – Distribuições dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de alta nitidez utilizando o método proposto, velocidade de referência de 28,8 km/h.



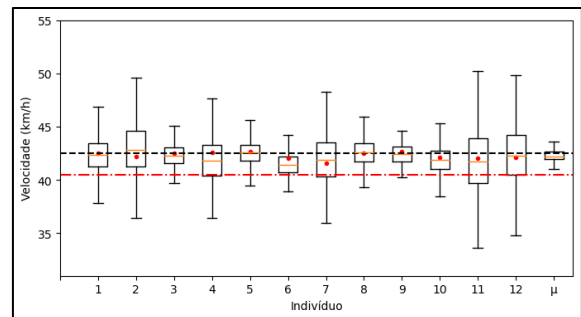
Fonte: autor (2023).

Figura 70 – Distribuições dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de média nitidez utilizando o método proposto, velocidade de referência de 43,9 km/h.



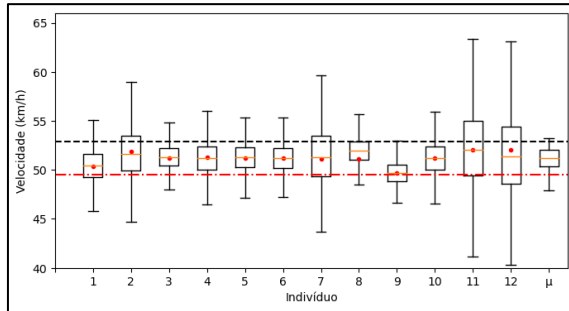
Fonte: autor (2023).

Figura 71 – Distribuições dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de alta nitidez utilizando o método proposto, velocidade de referência de 43,9 km/h.



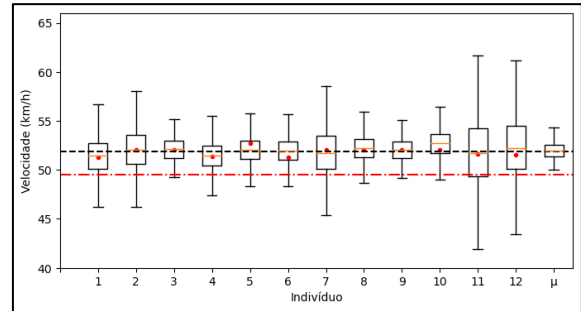
Fonte: autor (2023).

Figura 72 – Distribuições dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de média nitidez utilizando o método proposto, velocidade de referência de 52,9 km/h.



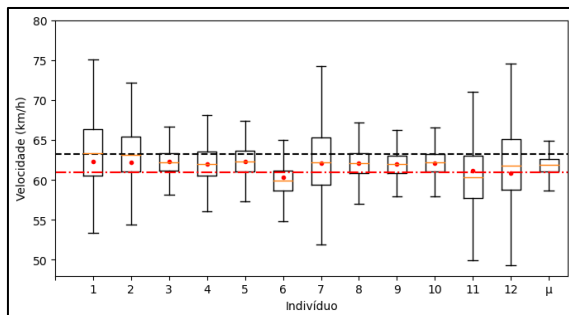
Fonte: autor (2023).

Figura 73 – Distribuições dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de alta nitidez utilizando o método proposto, velocidade de referência de 52,9 km/h.



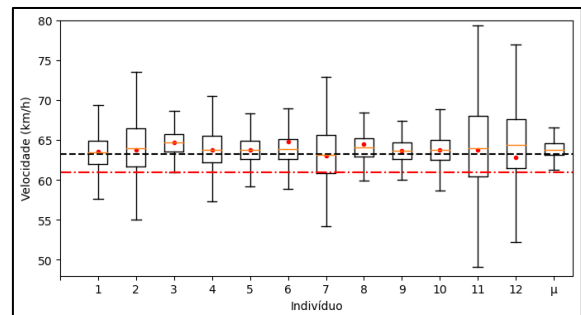
Fonte: autor (2023).

Figura 74 – Distribuições dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de média nitidez utilizando o método proposto, velocidade de referência de 64,8 km/h.



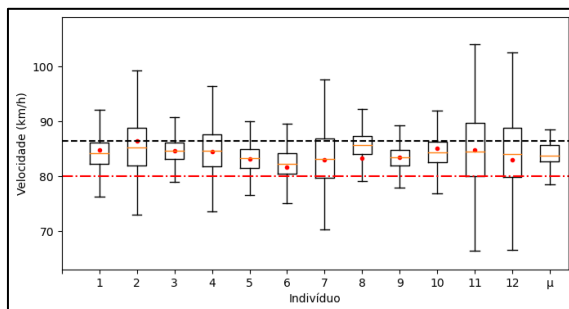
Fonte: autor (2023).

Figura 75 – Distribuições dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de alta nitidez utilizando o método proposto, velocidade de referência de 64,8 km/h.



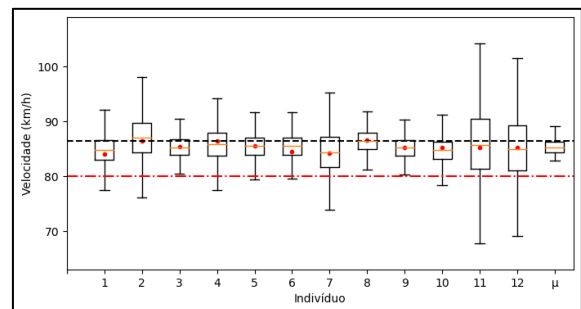
Fonte: autor (2023).

Figura 76 – Distribuições dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de média nitidez utilizando o método proposto, velocidade de referência de 86,4 km/h.



Fonte: autor (2023).

Figura 77 – Distribuições dos valores de velocidade considerando as marcações efetuadas pelos participantes nas imagens de alta nitidez utilizando o método proposto, velocidade de referência de 86,4 km/h.



Fonte: autor (2023).

A partir das FDPs apresentadas da Figura 28 à Figura 32, bem como para passagens capturadas com as câmeras de média e alta definição, foram calculados os intervalos de velocidade, de forma simétrica em relação à média, contendo 95% da área das respectivas FDPs. Os valores podem ser visualizados na Tabela 5 e na Tabela 6.

Tabela 5 – Comparação das médias das distribuições obtidas a partir das combinações de marcações e pelas FDPs. Velocidade em km/h.

	<b>Câmera VIP 3260 Z G2 (média definição)</b>				<b>Proj. Rev.</b>	<b>Radar</b>
	Distribuição	FDP	Min. (FDP)	Max. (FDP)		
<b>Passagem #01</b>	27,81	27,67	26,14	29,20	28,80	27,00
<b>Passagem #02</b>	42,60	41,78	39,65	43,91	43,90	40,50
<b>Passagem #03</b>	51,22	51,17	48,68	53,66	52,90	49,50
<b>Passagem #04</b>	61,84	61,92	58,70	65,14	64,80	61,00
<b>Passagem #05</b>	83,99	84,10	80,19	88,01	86,40	79,00

Fonte: autor (2023).

Tabela 6 – Comparação das médias das distribuições obtidas a partir das combinações de marcações e pelas FDPs. Velocidade em km/h.

	<b>Câmera VIP 5550 Z IA (alta definição)</b>				<b>Proj. Rev.</b>	<b>Radar</b>
	Distribuição	FDP	Min. (FDP)	Max. (FDP)		
<b>Passagem #01</b>	28,34	28,23	26,87	29,60	28,80	27,00
<b>Passagem #02</b>	42,30	42,10	40,24	43,96	43,90	40,50
<b>Passagem #03</b>	51,87	51,90	50,02	53,78	52,90	49,50
<b>Passagem #04</b>	63,84	63,84	60,69	66,99	64,80	61,00
<b>Passagem #05</b>	82,84	85,35	81,51	89,19	86,40	79,00

Fonte: autor (2023).

## APÊNDICE C – Termo de Consentimento Livre e Esclarecido



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**CENTRO TECNOLÓGICO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Campus Universitário – Trindade – Florianópolis-SC – CEP 88040-900

Fone: (48) 3721-9422

**TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO**

Prezado participante

Gostaríamos de convidá-lo a participar de nossa pesquisa, cujo título é “**Estudo sobre Incertezas na Estimativa de Velocidade por Vídeo-análise Utilizando o Método da Razão Cruzada**”.

O objetivo desse documento é informar sobre o referido trabalho para obter uma autorização por escrito, referente à vossa participação na pesquisa que está sendo realizada.

As informações contidas nesse termo foram fornecidas por Fernando Henrique Lonzeiti, estudante de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina, sob supervisão do professor Dr. Márcio Holsbach Costa do Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica da Universidade Federal de Santa Catarina.

**Objetivo:** Este projeto tem como objetivo estimar a distribuição das medidas de velocidade por vídeo-análise utilizando o método da razão cruzada.

**Método:** Sua participação é voluntária e consiste em marcar sobre uma imagem os pontos nos quais acredita, com maior probabilidade, estarem localizados os centros de eixo do veículo e, para cada centro de eixo, os intervalos espaciais em que acredita que os centros de eixo estejam contidos. Para tanto, serão fornecidas até quinze (15) imagens, nas quais estarão representadas

uma sobreposição de dois quadros de um arquivo de vídeo contendo um veículo em sua posição inicial e final. Em cada imagem poderá já existir ou ser requerido (conforme explicado na etapa de treinamento) o traçado de uma semirreta colinear à trajetória e aos centros de eixo do veículo. O tempo total do procedimento não deve exceder cinquenta (50) minutos, podendo ser realizado de forma contínua ou com interrupções, conforme as suas necessidades. Os pesquisadores garantem que o participante receberá todo acompanhamento e assistência necessários ao longo de toda a pesquisa.

**Benefícios:** A participação neste estudo não trará benefício direto para o participante. É esperada a produção de conhecimento científico, a médio e longo prazo, que pode servir para a avaliação, melhoria e proposição de métodos de estimação de velocidade por vídeo-análise, podendo levar a um aumento na qualidade de exames periciais.

**Desconfortos e riscos:** Os procedimentos e informações obtidas a partir dos resultados não oferecem riscos diretos ao participante. Entretanto, um risco possível seria a quebra de sigilo das informações repassadas. Nesse sentido, os pesquisadores se comprometem a zelar pelo resguardo dos dados coletados. Além disso, as respostas serão armazenadas de maneira anônima, de modo que não haverá vínculo do resultado à identificação do participante. O processo pode ser interrompido a qualquer momento e retomado em período oportuno em caso de desconforto físico ou mental.

**Outras informações:** Não haverá ônus ou bônus financeiro, em nenhum momento, decorrente da participação nessa pesquisa. Você receberá respostas e esclarecimentos a todas as perguntas e dúvidas sobre os procedimentos realizados e assuntos relacionados a essa pesquisa por meio de contato com o pesquisador, que assume o compromisso de proporcionar informações atualizadas sobre o estudo. O pesquisador declara que cumprirá as exigências contidas na Resolução CNS 466/2012, que o sigilo e a privacidade dos participantes serão garantidos durante todas as etapas da pesquisa, inclusive na divulgação dos resultados e que os participantes terão direito ao ressarcimento de eventuais despesas e indenização diante de eventuais danos produzidos por essa pesquisa. Em caso de necessidade de contato, o endereço do pesquisador responsável é: Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica, Centro Tecnológico, Bloco E, terceiro andar, Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário João David Ferreira Lima, bairro Trindade, CEP 88.040-900, Florianópolis-SC, telefone (48) 3721-2260, e-mail: [marcio.costa@ufsc.br](mailto:marcio.costa@ufsc.br). O endereço do Comitê de Ética em Pesquisa com Seres Humanos da Universidade Federal de Santa Catarina é: Prédio Reitoria II, Rua Desembargador Vitor Lima, número 222, sala 401, Trindade, Florianópolis-SC, CEP 88040-400, telefone (48) 3721-6094, e-mail: [cep.propesq@contato.ufsc.br](mailto:cep.propesq@contato.ufsc.br).

O Comitê de Ética em Pesquisa com Seres Humanos da Universidade Federal de Santa Catarina é um órgão colegiado interdisciplinar, deliberativo, consultivo e educativo, vinculado à Universidade Federal de Santa Catarina, mas independente na tomada de decisões, criado para defender os interesses dos participantes da pesquisa em sua integridade e dignidade e para contribuir no desenvolvimento da pesquisa dentro de padrões éticos.

### CONSENTIMENTO PÓS-INFORMADO

Eu, \_\_\_\_\_ concordo em participar da pesquisa “Estudo sobre Incertezas na Estimativa de Velocidade por Vídeo-análise Utilizando o Método da Razão Cruzada”, desde que seja mantido o sigilo de minha identificação, conforme as normas do Comitê de Ética em Pesquisa com Seres Humanos dessa Universidade. A minha participação é voluntária podendo ser cancelada a qualquer momento. Pelo presente consentimento, declaro que fui esclarecido(a) sobre a pesquisa a ser realizada, de forma detalhada, livre de qualquer constrangimento e obrigação, e que recebi uma via desse termo, assinada pelo pesquisador.

Florianópolis, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 20\_\_\_\_.

\_\_\_\_\_  
Assinatura do participante

\_\_\_\_\_  
Assinatura do Pesquisador Principal/Responsável  
Prof. Dr. Márcio Holsbach Costa  
RG: 5.808.610 SSP/SC

*Elaborado com base na Resolução 466/2012 do CNS.*