



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Pedro Azevedo Abrantes de Oliveira

Visualizando os Perigos Não Visíveis na Via: Um Estudo sobre o Impacto de Visualizações de Dados em Realidade Aumentada no Para-brisas de Veículos para a Segurança da Condução

Recife

2025

Pedro Azevedo Abrantes de Oliveira

Visualizando os Perigos Não Visíveis na Via: Um Estudo sobre o Impacto de Visualizações de Dados em Realidade Aumentada no Para-brisas de Veículos para a Segurança da Condução

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Área de Concentração: Mídia e Interação

Orientador: Luiz Augusto de Macêdo Morais

Coorientadora: Veronica Teichrieb

Recife

2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Oliveira, Pedro Azevedo Abrantes de.

Visualizando os perigos não visíveis na via: um estudo sobre o impacto de visualizações de dados em realidade aumentada no para-brisas de veículos para a segurança da condução / Pedro Azevedo Abrantes de Oliveira. - Recife, 2025.

71f.: il.

Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Pernambuco, Centro De Informática, Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, 2025.

Orientação: Luiz Augusto de Macêdo Moraes.

Coorientação: Veronica Teichrieb.

1. Visualização situada; 2. Realidade aumentada; 3. Segurança na condução. I. Moraes, Luiz Augusto de Macêdo. II. Teichrieb, Veronica. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

Pedro Azevedo Abrantes de Oliveira

“Desvendando a Estrada à Frente: Aprimorando a Atenção do Condutor com Dados Contextuais em Exibições no Para-brisa Automotivo”

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação. Área de Concentração: Mídia e Interação.

Aprovado em: 30/07/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Nivan Roberto Ferreira Junior
Centro de Informática / UFPE

Profa. Dra. Fátima de Lourdes dos Santos Nunes Marques
Escola de Artes, Ciências e Humanidades / USP

Prof. Dr. Luiz Augusto de Macedo Moraes
Centro de Informática / UFPE
(orientador)

À Marta, a meus pais, Robson e Dalva, e a meus irmãos, Rafaela, Andreia e Arthur, por serem minha força, meu amparo e minha alegria em cada passo da vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço de todo coração aos meus pais, Robson Abrantes e Dalva Azevedo, que sempre foram meu maior exemplo de amor, dedicação e força. Vocês me ensinaram a sonhar alto e a nunca desistir, mesmo diante das maiores dificuldades. Este trabalho é também fruto de cada conselho, cada gesto de carinho e cada sacrifício que fizeram por mim. Estendo esse agradecimento a toda minha família, que esteve sempre presente, sendo porto seguro e fonte de motivação.

Ao meu orientador, Prof. Luiz Augusto de Macêdo Moraes, expresso minha profunda gratidão pelo apoio, pela dedicação, pela paciência e por acreditar no meu potencial em todos os momentos. Sua orientação foi essencial não apenas para este trabalho, mas para meu crescimento como pesquisador. Também agradeço à Profa. Veronica Teichrieb, pela coorientação, pela confiança e pelas contribuições sempre valiosas ao longo do caminho.

Ao VoxarLabs, meu muito obrigado pelo espaço de aprendizado e pela parceria diária. Foi no convívio com colegas e amigos de laboratório que aprendi, compartilhei experiências e cresci de forma que levarei para além desta pesquisa.

À Universidade Federal de Pernambuco e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, agradeço pela oportunidade de fazer parte desta instituição e pelo suporte ao longo de todo o mestrado.

À CAPES, agradeço pelo apoio financeiro, fundamental para que este trabalho pudesse ser desenvolvido.

RESUMO

A tomada de decisão durante a condução é frequentemente desafiada por perigos não visíveis, como animais na pista, buracos ou lombadas não sinalizadas, especialmente em condições de visibilidade limitada. Nesse contexto, tecnologias emergentes de Realidade Aumentada (RA), especialmente aquelas projetadas diretamente no para-brisas do veículo (Windshield Displays – WSD), oferecem novas oportunidades para aumentar a segurança ao antecipar visualmente esses perigos ocultos. Esta dissertação investiga, por meio de um estudo experimental controlado em um simulador de realidade virtual imersiva, o impacto de diferentes tipos de visualizações situadas na segurança da condução. Foram comparados dois cenários: visualizações regulares, que destacam apenas perigos já presentes no campo de visão do condutor, e visualizações aprimoradas, que sinalizam perigos ainda não visíveis, antes de surgirem na cena. Os resultados indicam que as visualizações aprimoradas ampliam o tempo disponível para reação dos condutores e reduzem o número de colisões, em comparação com as regulares. A pesquisa revelou que os benefícios surgem não pelo simples uso de visualizações, mas pela sua capacidade de antecipar e comunicar informações de forma clara. Com isso, o estudo contribui tanto academicamente, ao preencher lacunas sobre visualizações de perigos não visíveis no setor veicular, quanto praticamente, ao oferecer orientações para o desenvolvimento de interfaces automotivas mais eficazes e seguras.

Palavras-chaves: Realidade Aumentada. Visualização Situada. Windshield Display (WSD). Segurança na Condução. Perigos Não Visíveis.

ABSTRACT

Decision-making during driving is often challenged by non-visible hazards such as animals crossing the road, potholes, or unmarked speed bumps, especially under limited visibility conditions. In this context, emerging Augmented Reality (AR) technologies, particularly those projected directly onto the vehicle's windshield (Windshield Displays – WSD), offer new opportunities to enhance safety by visually anticipating hidden hazards. This dissertation investigates, through a controlled experimental study in an immersive virtual reality driving simulator, the impact of different types of situated visualizations on driving safety. Two conditions were compared: regular visualizations, which highlight hazards only once they are already within the driver's field of view, and enhanced visualizations, which anticipate hazards by signaling them before they become visible. The results show that enhanced visualizations provide drivers with more time to react and reduce the number of collisions compared to regular ones. The findings revealed that the benefits arise not from the mere use of visualizations, but from their ability to anticipate and communicate information clearly. Consequently, this study contributes academically, by addressing gaps in the literature on non-visible hazard visualization in the automotive domain, and practically, by offering guidelines for the design of more effective and safer in-vehicle interfaces.

Keywords: Augmented Reality. Situated Visualization. Windshield Display (WSD). Driving Safety. Non-Visible Hazards.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplos de categorias funcionais de visualizações em Windshield Displays. (A) Navegação: projeção da rota e sinalização de prioridade (MÜLLER et al., 2022). (B) Entretenimento: exibição de pontos de interesse, como restaurantes e avaliações (SCHRAMM et al., 2025a). (C) Segurança: destaque de elementos críticos da via, como sinal de parada e pedestres (CURRANO et al., 2021).	21
Figura 2 – Esquema conceitual adaptado de ASSOR et al., representando a relação entre o usuário, os dados e o referente físico não visível.	25
Figura 3 – Exemplos de visualizações aplicadas a referentes não visíveis em diferentes contextos. (A) Sistema automotivo See-Through, que transmite em tempo real o vídeo da câmera frontal do veículo à frente para possibilitar ultrapassagens seguras (OLAVERRI-MONREAL et al., 2010). (B) Cockpit com realidade diminuída, permitindo ao condutor visualizar áreas ocultas da carroceria do veículo (LINDEMANN; RIGOLL, 2017). (C) Aplicação médica de RA que projeta estruturas internas do paciente sobre o corpo durante procedimentos cirúrgicos (THAPA et al., 2021). (D) Interface de manutenção predial com visualização de tubulações subterrâneas em RA sobrepostas ao ambiente real (MUTHALIF; SHOJAEI; KHOSHELHAM, 2024).	26
Figura 4 – Estrutura do design de estudo.	35
Figura 5 – Resultado dos workshops	37
Figura 6 – Representação da visualização quando o perigo ainda não está visível para o condutor	38
Figura 7 – Representação da visão do condutor com e sem as visualizações no WSD	38
Figura 8 – Fluxograma dos procedimentos experimentais realizados com cada participante.	40
Figura 9 – Visão do participante no simulador	41
Figura 10 – Exemplo de configuração do experimento utilizada durante o estudo	43
Figura 11 – Representação <i>top-view</i> dos mapas desenvolvidos no simulador	44

Figura 12 – Resultados relativos ao tempo de reação para retomada do controle do veículo (QP1). (a) Distribuição dos tempos de reação nas condições <i>Com Visualização</i> e <i>Sem Visualização</i> ; (b) Comparação das médias de tempo de reação com seus respectivos intervalos de confiança de 95% para ambas as condições; (c) Diferença média entre as duas condições (Com e Sem Visualização), com intervalo de confiança de 95%, indicando ausência de efeito significativo.	48
Figura 13 – Tempo de reação para retomada do controle do veículo (QP2). (a) Distribuição por tipo de visualização (<i>Regular</i> e <i>Aprimorada</i>); (b) Médias com intervalos de confiança de 95%; (c) Diferença entre médias (<i>Aprimorada</i> – <i>Regular</i>), indicando maior tempo de reação na condição aprimorada. . . .	49
Figura 14 – Comportamento de direção após detecção do perigo (QP1). Médias dos intervalos interquartis (IQR) com intervalos de confiança de 95%, comparando as condições <i>Com Visualização</i> e <i>Sem Visualização</i> para: (a) velocidade, (b) intensidade de frenagem, (c) variabilidade do volante e (d) nível de aceleração.	50
Figura 15 – Comportamento de direção em função do tipo de visualização (QP2). Médias dos intervalos interquartis (IQR) com intervalos de confiança de 95%, comparando as condições <i>Visualização Aprimorada</i> e <i>Visualização Regular</i> para: (a) velocidade, (b) intensidade de frenagem, (c) variabilidade do volante e (d) nível de aceleração.	51
Figura 16 – Proporção de colisões para a QP1: Com Visualização vs. Sem Visualização.	52
Figura 17 – Proporção de colisões para a QP2: Aprimorada vs. Regular.	52

LISTA DE SIGLAS

CAAE	Certificado de Apresentação para Apreciação Ética
CHI	Conference on Human Factors in Computing Systems
CNH	Carteira Nacional de Habilitação
CNT	Confederação Nacional de Transportes
HUD	Head-Up Display
I2V	Invisible-to-Visible
IC	Intervalo de Confiança
IQR	Intervalo Interquartil
OSF	Open Science Framework
QP1	Questão de Pesquisa 01
QP2	Questão de Pesquisa 02
RA	Realidade Aumentada
RV	Realidade Virtual
TCLE	Termo de Consentimento Livre e Esclarecido
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
V2V	Vehicle-to-Vehicle
V2X	Vehicle-to-Everything
WSD	Windshield Display

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	13
1.2	MOTIVAÇÃO	14
1.3	PROBLEMA E QUESTÕES DE PESQUISA	15
1.4	OBJETIVOS	16
1.5	DESIGN DO ESTUDO	16
1.6	RESULTADOS	17
1.7	TERMINOLOGIA	18
1.8	ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	VISUALIZAÇÃO DE DADOS NO CONTEXTO AUTOMOTIVO	20
2.2	VISUALIZAÇÕES SITUADAS	22
2.3	VISUALIZAÇÃO DE DADOS NÃO VISÍVEIS	24
2.4	SEGURANÇA NA CONDUÇÃO	29
3	METODOLOGIA	32
3.1	VARIÁVEIS	32
3.1.1	Variáveis independentes	32
3.1.2	Variáveis dependentes	33
3.2	DESIGN DO ESTUDO	34
3.3	VISUALIZAÇÃO	36
3.4	PARTICIPANTES	39
3.5	PROCEDIMENTOS	39
3.6	SIMULADOR DE DIREÇÃO	41
3.7	AMBIENTE EXPERIMENTAL	43
3.8	CONSIDERAÇÕES ÉTICAS	45
3.9	ANÁLISE DOS DADOS	45
4	RESULTADOS	47
4.1	TEMPO DE REAÇÃO	47
4.1.1	Impacto da visualização na retomada do controle do veículo	47

4.1.2	Impacto da visualização de perigos ainda não visíveis na retomada de controle	48
4.2	COMPORTAMENTO DE DIREÇÃO	49
4.2.1	Efeitos da Visualização no Comportamento de Direção	49
4.2.2	Efeitos do Tipo de Visualização na Direção	50
4.3	ANÁLISE COMPLEMENTAR	51
4.3.1	Colisões sob Diferentes Condições de Visualização	51
4.3.2	Colisões sob Diferentes Níveis de Detalhamento Visual	52
4.4	FEEDBACK DOS PARTICIPANTES	53
4.4.1	Fatores que Motivariam a Retomada do Controle	53
4.4.2	Comportamento de Condução após a Retomada do Controle	54
4.4.3	Influência das Visualizações nas Decisões de Condução	55
5	DISCUSSÕES	57
5.1	PRESENÇA DE VISUALIZAÇÕES VS. AUSÊNCIA	57
5.2	EFEITOS DA ANTECIPAÇÃO DE PERIGOS NÃO VISÍVEIS	58
5.3	LIÇÕES APRENDIDAS E LIMITAÇÕES	60
5.4	IMPLICAÇÕES PARA O DESIGN DE VISUALIZAÇÕES	62
6	CONCLUSÕES	63
	REFERÊNCIAS	65
	 APÊNDICES	 71
	APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO PÓS-EXPERIMENTO	72

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Imagine uma viagem em família por uma rodovia pouco conhecida. A estrada parece tranquila, até que, de repente, um animal cruza a pista logo após uma curva. Nesse instante, a reação do condutor precisa ser rápida para evitar o acidente. Mas suponha que o perigo tivesse sido sinalizado com antecedência, mesmo antes de ser visível. Haveria mais tempo para reagir? A chance de evitar a colisão seria maior? Esse cenário ilustra um desafio real e recorrente: a tomada de decisão em situações de visibilidade reduzida ou percepção limitada. Motoristas frequentemente se deparam com obstáculos críticos para a segurança que não estão visíveis no momento ideal para uma resposta segura.

De acordo com a Organização Mundial da Saúde, os acidentes de trânsito causam cerca de 1,19 milhão de mortes por ano em todo o mundo e deixam entre 20 e 50 milhões de pessoas feridas, muitas delas com sequelas permanentes (World Health Organization, 2023). Esse panorama global encontra eco no Brasil, onde, além dos altos índices de mortalidade no trânsito, a precariedade da infraestrutura viária agrava os riscos: a Pesquisa Confederação Nacional de Transportes (CNT) de Rodovias de 2023 revelou que 67,5% da malha pavimentada apresenta problemas de conservação (LABOISSIÈRE, 2023). A soma da magnitude do problema mundial com as condições locais reforça a urgência de tecnologias capazes de ampliar a percepção e apoiar a atenção do condutor, oferecendo alertas antecipados que contribuam para reduzir riscos e salvar vidas.

O avanço de tecnologias de visualização, especialmente por meio dos *Windshield Displays* (WSD), surge como uma alternativa promissora. Esses sistemas possibilitam a projeção de informações diretamente no campo visual do condutor (WINKLER; SOLEIMANI, 2025; ZHOU et al., 2024), oferecendo apoio contínuo durante a condução. Contudo, a maioria das soluções atuais ainda se concentra na exibição de elementos já visíveis, como placas de trânsito, veículos próximos e semáforos (DETJEN et al., 2021; CURRANO et al., 2021).

De forma complementar, aplicativos amplamente utilizados, como o Waze, também procuram ampliar a consciência do condutor ao indicar buracos, acidentes e outros eventos adiante na via. Apesar de úteis, essas soluções dependem do reporte manual dos usuários e apresentam os alertas em telas externas ao campo de visão, o que pode aumentar a carga cognitiva e desviar a atenção da tarefa de conduzir.

Essas limitações reforçam a importância de explorar novas abordagens. E se o condutor pudesse visualizar no próprio para-brisa, com antecedência, perigos que ainda não estão ao alcance de sua visão? Essa ideia, inspirada no trabalho de (WILLETT et al., 2021), remete à metáfora dos “superpoderes” proporcionados por visualizações de dados. No caso da direção, trata-se da capacidade de antecipar riscos na pista antes que se tornem visíveis.

A antecipação de perigos representa uma oportunidade concreta de aumentar a segurança viária. Visualizações capazes de indicar, por exemplo, a presença de um animal escondido após uma curva ou de um buraco encoberto por sombra, têm o potencial de estender o tempo de reação do motorista, segundos preciosos que fazem a diferença entre uma manobra segura e um acidente. Além disso, em cenários de direção assistida ou semiautônoma, o papel da interface entre sistema e condutor torna-se ainda mais relevante. Ao fornecer uma representação clara e contextualizada do ambiente—inclusive sobre eventos ainda não visíveis—a interface pode fortalecer a colaboração humano-máquina e reduzir a dependência exclusiva dos sensores embarcados (PEČEČNIK; TOMAŽIČ; SODNIK, 2023).

1.2 MOTIVAÇÃO

A motivação deste trabalho está ancorada no desejo de ampliar a percepção do condutor, oferecendo-lhe um nível de consciência sobre o ambiente ao redor que vá além do que está visível a olho nu. A proposta é investigar uma solução de visualização situada e de Realidade Aumentada (RA) para para-brisas que possa atuar como uma espécie de extensão sensorial, antecipando a presença de perigos ocultos e potencialmente promovendo uma condução mais segura. Ao alinhar visualizações com seus referentes físicos no espaço real, essas representações tornam a informação mais compreensível e contextualizada (WILLETT; JANSEN; DRAGICEVIC, 2016). Por meio da RA, dados podem ser exibidos diretamente sobre objetos, locais ou pessoas, reforçando sua conexão semântica com o ambiente. Aplicações desse tipo já demonstraram seu valor em domínios como manutenção industrial e arquitetura (ENS et al., 2021), e começam a ser exploradas também em ambientes automotivos (SCHRAMM et al., 2025a; SCHRAMM et al., 2025b).

Um aspecto ainda pouco explorado nas visualizações situadas em veículos é o tratamento de objetos não visíveis. Grande parte da literatura assume que o referente físico—objeto ou local ao qual o dado se refere—está no campo de visão do usuário. Entretanto, durante a condução, diversos perigos críticos podem estar temporariamente fora do alcance visual, seja

por estarem atrás de curvas, ocultos por outros veículos ou encobertos por obstáculos visuais. São os chamados *referentes físicos não visíveis* (ASSOR et al., 2023).

Este trabalho se propõe a investigar como visualizações situadas podem representar esses referentes não visíveis no contexto da direção de veículos semiautônomos. O objetivo é avaliar como essas representações afetam o comportamento de direção, especialmente no que diz respeito ao tempo de reação e às decisões de condução em situações de risco. Além da motivação prática—contribuir com soluções aplicáveis para sistemas veiculares futuros—esta pesquisa também carrega uma motivação acadêmica. Busca-se fomentar a discussão sobre um tema ainda incipiente na área de visualização de dados: como representar, de forma situada e eficaz, elementos que ainda não estão acessíveis à percepção direta do usuário. Embora trabalhos recentes abordaram esse desafio em contextos como RA e visualizações móveis (ASSOR et al., 2023), sua aplicação no domínio da direção veicular permanece limitada. Assim, espera-se que este estudo contribua para preencher essa lacuna e inspire novas investigações nesse campo emergente.

1.3 PROBLEMA E QUESTÕES DE PESQUISA

Esta dissertação investiga empiricamente o impacto de visualizações em RA no para-brisa de veículos em relação à segurança da condução. Em particular, pretende-se explorar visualizações cujos objetos de interesse não estejam visíveis ao condutor. Para direcionar esta investigação, foram formuladas as seguintes questões de pesquisa:

- **Questão de Pesquisa 01 (QP1):** A utilização de uma visualização situada no para-brisa do veículo que alerta sobre perigos presentes na via afeta a capacidade do condutor de reagir a esses perigos de forma segura quando comparada a uma situação em que nenhuma visualização auxiliar é fornecida?
- **Questão de Pesquisa 02 (QP2):** Qual a diferença entre exibir uma visualização no para-brisa que destaca perigos ainda não visíveis com uma que destaca apenas perigos já visíveis em relação à capacidade do condutor de reagir a perigos na pista?

A hipótese central que norteia esta pesquisa é que a implementação de visualizações situadas, projetadas diretamente no para-brisa do veículo, pode melhorar o desempenho do condutor diante de perigos na via, ampliando o tempo de reação e favorecendo padrões de di-

reção mais seguros. Mais especificamente, postula-se que as visualizações focadas em *objetos de interesse não visíveis* têm o potencial de aprimorar a compreensão do cenário de trânsito e a antecipação de eventos futuros, além de reduzir a ocorrência de colisões, em comparação com visualizações que se restringem a elementos já presentes no campo de visão.

1.4 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é avaliar como visualizações situadas em RA, projetadas no para-brisa de veículos, podem contribuir para a segurança da condução ao alertar sobre perigos não visíveis na via. A pesquisa se propõe a analisar o impacto dessas visualizações em relação ao tempo de reação dos motoristas e ao seu comportamento de direção em situações críticas.

Objetivos Específicos

- Desenvolver um ambiente virtual em Realidade Virtual (RV), com características imersivas, capaz de simular visualizações situadas no para-brisa de veículos.
- Projetar e implementar visualizações para comunicar perigos na via.
- Realizar um experimento controlado para avaliar o impacto dessas visualizações sobre o tempo de reação e o comportamento de condução dos participantes.

1.5 DESIGN DO ESTUDO

Para investigar as questões de pesquisa, foram realizados experimentos controlados em um ambiente virtual de simulação de direção. Diferentes condições de visualização foram sistematicamente comparadas, utilizando-se métricas objetivas de desempenho e comportamento de condução, tais como o tempo de resposta a perigos simulados e a eficácia das manobras evasivas realizadas pelos participantes. Utilizamos um esquema experimental híbrido que combina designs de experimento do tipo *within-subjects* e *between-subjects*.

O design do Estudo *within-subjects* foi empregado para investigar se **ter ou não ter** uma visualização situada afeta a capacidade do condutor de reagir a perigos de forma segura. Cada participante conduziu quatro percursos simulados, com cinco perigos em cada trajeto, totalizando vinte eventos. Em metade desses eventos, um alerta visual era projetado no para-brisa,

na outra metade, nenhum auxílio era fornecido. A ordem das exposições foi contrabalanceada para evitar efeitos de aprendizagem: um subconjunto de participantes iniciou o percurso com um alerta ativo e alternou entre *com* e *sem* visualização a cada novo perigo; outro subconjunto experimentou a sequência inversa. Esse procedimento permite comparar diretamente, no mesmo condutor, tempos de reação e manobras sob as duas condições.

Para examinar o efeito de visibilidade em que o alerta é apresentado, adotou-se um design de estudo *between-subjects*. Os participantes foram aleatoriamente atribuídos a um de dois grupos. No grupo *Visualização Aprimorada*, a sinalização surgia antes que o obstáculo se tornasse visível, simulando dados provenientes de fontes externas (e.g., Vehicle-to-Everything (V2X) ou mapeamento colaborativo). No grupo *Visualização Regular*, o alerta só aparecia quando o perigo já estava no campo de visão, em linha com tecnologias baseadas apenas em sensores embarcados (e.g., LiDAR ou câmeras). A comparação dos indicadores médios, tempo de resposta, intensidade de frenagem, número de colisões, revela se antecipar a informação realmente traz vantagens adicionais. Mais detalhes sobre a metodologia empregada podem ser vistos no Capítulo 3.

1.6 RESULTADOS

Os resultados obtidos no experimento indicam que, no contexto avaliado, as condições *com visualização* e *sem visualização* apresentaram desempenhos semelhantes em termos de tempo de reação, comportamento de condução e número de colisões. Uma possível explicação é a diluição estatística: a variabilidade natural entre participantes pode ter mascarado diferenças sutis entre as condições.

Por outro lado, ao comparar as condições de visualização regular com a visualização aprimorada, os dados revelaram diferenças mais expressivas. A visualização aprimorada, ao antecipar a presença de perigos ainda não visíveis no ambiente, proporcionou aos condutores um maior tempo de reação em relação à visualização regular. Essa diferença também se refletiu em ajustes no comportamento de condução, como uma maior aplicação dos freios e variações mais acentuadas na direção do veículo, resultando em um número menor de colisões.

Esses achados reforçam a ideia de que o simples aumento do nível de informação visual nem sempre é suficiente. Em muitos casos, especialmente em situações críticas de baixa visibilidade, como um animal surgindo após uma curva fechada ou uma lombada mal sinalizada, a antecipação da informação é um fator essencial. A visualização aprimorada, por fornecer

ao condutor dados sobre elementos ainda fora de seu campo visual, parece ter sido capaz de ampliar o tempo disponível para reação e facilitar decisões mais preparadas frente ao risco iminente. Assim, o estudo evidencia que o diferencial não está apenas em visualizar mais, mas visualizar antes. Em outras palavras, o benefício de sistemas de RA no para-brisa pode estar especialmente associado à capacidade de antecipar perigos e não apenas à sobreposição de informações no campo de visão.

1.7 TERMINOLOGIA

Nesta seção, são apresentados os principais termos utilizados ao longo desta dissertação, com o intuito de esclarecer seu significado no contexto da pesquisa e garantir consistência conceitual na interpretação dos resultados.

Consciência Situacional Estado de entendimento contínuo do ambiente ao redor do veículo, envolvendo percepção, interpretação e antecipação de eventos. Visualizações no para-brisa podem ampliar esse entendimento, sobretudo diante de perigos não visíveis.

Tempo de reação Intervalo de tempo entre o momento em que o condutor recebe o primeiro estímulo de risco (e.g., o surgimento de um animal na pista ou a visualização de um alerta) e o início de sua resposta física, como pressionar o pedal do freio ou realizar uma manobra evasiva.

Visualização situada Representação gráfica de dados posicionada diretamente sobre o ambiente físico a que os dados se referem. No contexto veicular, refere-se a elementos visuais projetados no para-brisa, alinhados com a posição real dos perigos na via.

Referente físico Objeto, espaço ou pessoa no ambiente real ao qual os dados representados por uma visualização situada se referem. Trata-se do alvo físico da informação visualizada, cuja presença no mundo concreto ancora a visualização em um contexto espacial significativo. Referentes físicos também são conhecidos como **objetos de interesse**. Exemplos incluem veículos, pedestres, obstáculos na via ou elementos da infraestrutura urbana.

Referente não visível Referente físico que se encontra imperceptível visualmente para o usuário em um dado momento. Essa condição pode ocorrer se o objeto estiver fora do campo de visão, por estar ocluído por outros objetos ou por estar presente mas com seus

detalhes visuais inacessíveis (e.g., baixa iluminação, distância excessiva ou movimento rápido). O tratamento desses referentes é central para o design de visualizações situadas que visam manter a consciência situacional mesmo na ausência de visibilidade direta.

Visualização regular Tipo de visualização que alerta o condutor apenas quando o perigo já está visível diretamente em seu campo de visão, reproduzindo o funcionamento de tecnologias convencionais baseadas em sensores embarcados ou percepção humana.

Visualização aprimorada Visualização projetada para fornecer ao condutor informações sobre perigos antes que eles se tornem visíveis, ampliando sua consciência situacional por meio da antecipação de eventos críticos.

Windshield Display (WSD) Sistema de visualização que projeta informações no para-brisa do veículo, utilizando tecnologias de RA para integrar dados ao campo visual do condutor.

Comportamento de condução Conjunto de ações tomadas pelo condutor durante a direção em resposta a estímulos do ambiente, incluindo aceleração, frenagem e manobras com o volante.

1.8 ESTRUTURA DO TRABALHO

No Capítulo 2, são apresentados os conceitos fundamentais que sustentam esta pesquisa, incluindo visualizações situadas, RA, segurança na condução e a noção de referentes físicos não visíveis. O Capítulo 3 descreve o ambiente experimental, o desenho do estudo, as condições testadas e os procedimentos adotados para coleta e análise dos dados. No Capítulo 4, são detalhados os principais resultados obtidos a partir do experimento, com ênfase nas diferenças entre as condições de visualização e nos efeitos sobre o tempo de reação e o comportamento de condução. O Capítulo 5 discute esses achados à luz da literatura e das hipóteses formuladas, refletindo sobre suas implicações e limitações. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as considerações finais, sintetizando as contribuições do trabalho e apontando direções para estudos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção apresenta os conceitos centrais que embasam esta pesquisa. Inicialmente, é discutido o uso de visualizações de dados no contexto automotivo, com ênfase nas tecnologias que projetam informações diretamente no para-brisa dos veículos. Em seguida, introduzimos os princípios das visualizações situadas e sua aplicação na integração de dados ao ambiente físico. Também abordamos o conceito de segurança na condução, destacando as métricas relevantes e o papel das tecnologias de suporte visual. Por fim, discutimos a representação de dados não visíveis.

2.1 VISUALIZAÇÃO DE DADOS NO CONTEXTO AUTOMOTIVO

O uso crescente de tecnologias digitais tem mudado profundamente a forma como os motoristas recebem informações enquanto dirigem. Antes, esses dados apareciam apenas no painel do veículo, como no velocímetro, nas luzes de alerta e em indicadores analógicos. Em soluções emergentes, essas informações são projetadas diretamente no para-brisa com o uso de RA, passando a ocupar o campo de visão principal do condutor. Isso transforma o para-brisa em um espaço informativo contínuo, no qual dados como limites de velocidade, avisos de trânsito e obstáculos são sobrepostos à cena real, reduzindo a necessidade de o motorista desviar os olhos para outros painéis ou telas (WINKLER; SOLEIMANI, 2025).

Entre as tecnologias mais comuns utilizadas nos veículos atuais estão os Head-Up Display (HUD) (ZHOU et al., 2024). Esses sistemas projetam informações básicas, como a velocidade do carro, em uma pequena área do para-brisa, diretamente no campo de visão do condutor. Uma evolução dos HUD são os Windshield Display (WSD), que ampliam essa projeção para uma área maior do vidro. Com isso, é possível mostrar dados posicionados sobre elementos reais do ambiente, como placas de trânsito, ciclistas ou outros veículos (HAEUSLSCHMID; PFLEGING; ALT, 2016; MÜLLER et al., 2022; WINKLER; SOLEIMANI, 2025; CHENG; ZHONG; TIAN, 2023). Esses sistemas normalmente funcionam em conjunto com sensores do carro, como câmeras e radares, que detectam riscos e exibem alertas em tempo real. Ao possibilitar a visualização de dados relevantes sem quebra da atenção visual, sem precisar tirar sua visão da estrada, tais sistemas consolidam-se como parte de uma nova geração de interfaces voltadas à condução contextual e responsiva.

Essas visualizações podem ser classificadas em categorias funcionais, como segurança, navegação, entretenimento e monitoramento do veículo (HAEUSLSCHMID; PFLEGING; ALT, 2016; KETTLE; LEE, 2022). Cada uma dessas categorias possui características específicas quanto ao tipo de informação, finalidade e grau de urgência. Visualizações de navegação visam a orientar o trajeto, geralmente por meio de elementos como setas direcionais (SAWITZKY et al., 2019), projeções da rota futura (MÜLLER et al., 2022) (Figura 1-A), ou indicadores das intenções de manobra em veículos autônomos (COLLEY et al., 2022). Já as visualizações de entretenimento vêm sendo exploradas especialmente em cenários de direção automatizada, variando desde sistemas de mídia interativos para passageiros (LI et al., 2013; SCHRAMM et al., 2025b), informações sobre localizações de restaurantes e suas avaliações (SCHRAMM et al., 2025a) (Figura 1-B) até propostas de comunicação entre veículos (KNOBEL et al., 2013). As visualizações voltadas à segurança constituem o foco central desta dissertação, visando alertar o condutor sobre situações de risco iminente, como colisões potenciais, aproximação de veículos de emergência, pedestres ocultos, zonas de construção ou sonolência ao volante (CURRANO et al., 2021) (Figura 1-C).

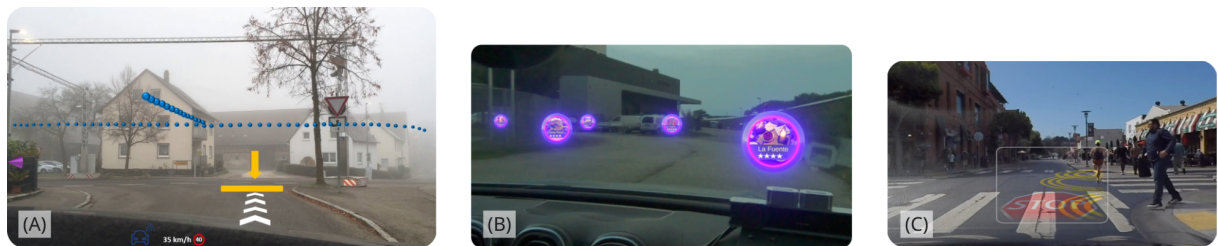


Figura 1 – Exemplos de categorias funcionais de visualizações em Windshield Displays. (A) Navegação: projeção da rota e sinalização de prioridade (MÜLLER et al., 2022). (B) Entretenimento: exibição de pontos de interesse, como restaurantes e avaliações (SCHRAMM et al., 2025a). (C) Segurança: destaque de elementos críticos da via, como sinal de parada e pedestres (CURRANO et al., 2021).

As múltiplas subfunções de segurança com WSD têm sido identificadas na literatura. A *extensão da visão* busca ampliar o campo perceptivo, permitindo que o condutor perceba elementos normalmente ocultos por obstáculos, curvas ou partes da estrutura do veículo, como em soluções de “transparência” de pilares ou visualização além de paredes (YASUDA; OHAMA, 2012). A *melhoria da visão* intensifica a capacidade de percepção em ambientes de baixa visibilidade, utilizando recursos como visão noturna ou controle de luminosidade (HOSSEINI; BACARA; LIENKAMP, 2014). Outras abordagens incluem *espelhos digitais* baseados em câmeras (OHTA et al., 2006), assistentes de *consciência espacial* que indicam distâncias e posições relativas entre veículos (SRIDHAR; NG-THOW-HING, 2012) e sistemas de *alerta ambiental* para

perigos emergentes (KIM et al., 2013). Há também soluções que *monitoram o próprio condutor*, identificando sinais de fadiga ou distração (AYAS; DONMEZ; TANG, 2024), e *assistentes de manobra* que indicam lacunas seguras ou a faixa adequada em cruzamentos (FERREIRA et al., 2013).

Apesar dos avanços alcançados, ainda existem desafios importantes no design de HUD e WSD. Um dos principais problemas é o excesso de informações na tela, que pode causar sobrecarga cognitiva, poluição visual e distrações perigosas para o condutor (COLLEY et al., 2020; PEČEČNIK; TOMAŽIČ; SODNIK, 2023). Outro ponto crítico envolve a precisão das informações e a forma como a incerteza é comunicada. Quando os dados são mostrados com muitos detalhes ou de forma imprecisa, a confiança do usuário pode ser prejudicada (COLLEY et al., 2021a; COLLEY et al., 2022). Estudo recente mostra que indicar de forma clara o grau de incerteza ajuda o condutor a ajustar suas expectativas e a confiar nos sistemas de maneira mais equilibrada, evitando uma dependência excessiva da tecnologia e reduzindo o risco de desatenção em situações críticas (OMEIZA et al., 2024).

Esse panorama evidencia não apenas o potencial das visualizações voltadas à segurança no contexto veicular, mas também os desafios envolvidos em seu desenvolvimento. Projetar interfaces eficazes exige mais que tecnologias avançadas e dados precisos, requer uma compreensão aprofundada de como os motoristas percebem, interpretam e respondem às informações apresentadas em seu campo de visão. Por isso, ainda são necessários mais estudos empíricos para investigar o efeito de diferentes visualizações na segurança da condução.

2.2 VISUALIZAÇÕES SITUADAS

Visualizações *in situ*, ou visualizações situadas, são representações de dados posicionadas espacialmente próximas aos seus **referentes físicos**, que são os objetos, espaços ou pessoas aos quais a informação se refere no mundo real (WILLETT; JANSEN; DRAGICEVIC, 2016). Essa abordagem visa maximizar a relevância e o impacto perceptivo ao integrar os dados diretamente ao ambiente físico. (BRESSA et al., 2021) argumentam que essa estratégia é particularmente eficaz quando combinada com tecnologias como a RA, que permite sobrepor informações digitais ao mundo físico. Complementando essa perspectiva, WILLETT; JANSEN; DRAGICEVIC destacam a importância da relação semântica entre os dados e seus referentes, ressaltando que o contexto espacial influencia diretamente a interpretação e favorece uma compreensão mais profunda, especialmente quando os dados são exibidos exatamente no qual são necessários.

A principal função das visualizações situadas é facilitar a compreensão e a interpretação dos dados por meio de sua contextualização no espaço físico. Exibidas diretamente no local em que são mais relevantes, promovem uma exploração mais intuitiva e contribuem para decisões mais ágeis e precisas (ASSOR et al., 2023). Além disso, podem funcionar como displays periféricos ou ambientes, mantendo os usuários informados sobre o estado de sistemas, alertas ou anomalias enquanto realizam outras tarefas (WILLETT; JANSEN; DRAGICEVIC, 2016). Essa integração entre dados e ambiente amplia a capacidade de compreensão situacional e ação eficiente (ENS et al., 2021).

No contexto veicular, visualizações situadas aprimoram a experiência do condutor ao alinhar informações diretamente ao cenário da condução. Esse alinhamento espacial facilita a interpretação rápida e precisa dos dados, mesmo em situações de tráfego intenso. Como apontam MARTINS et al., esse tipo de visualização oferece suporte direto à tomada de decisão em movimento, fornecendo dados contextuais relevantes para usuários em deslocamento. Isso é especialmente valioso em situações críticas, como quando se representa visualmente objetos que se aproximam rapidamente (YAO, 2025). Além disso, como discutido por WINKLER; SOLEIMANI, tecnologias como os WSD e HUD contribuem para manter a coerência espacial percebida pelo condutor. Mesmo que a tela esteja fisicamente afastada do objeto de referência, a percepção de alinhamento visual pode favorecer uma leitura mais natural e intuitiva da informação.

Esse tipo de visualização tem sido empregado em cenários em que a compreensão imediata do ambiente é essencial. Em operações de busca e resgate, por exemplo, a RA pode ser usada para marcar áreas já inspecionadas ou sinalizar perigos, facilitando a coordenação em locais afetados por desastres (WILLETT; JANSEN; DRAGICEVIC, 2016). Drones autônomos também têm sido utilizados para destacar a localização de vítimas e o grau de urgência do atendimento (WILLETT; JANSEN; DRAGICEVIC, 2016). Em ambientes industriais, visualizações situadas auxiliam operadores a reagir a falhas em tempo real, orientando a execução de tarefas com base em dados de sensores (KURZHALS et al., 2022). Nesse cenário, sistemas baseados em RA permitem localizar componentes e guiar processos de forma precisa, integrando a experiência física à informação digital (MARTINS et al., 2022).

Essa abordagem fortalece a premissa de que sua aplicação no contexto automotivo tende a ser eficaz, especialmente por sua capacidade de projetar a informação diretamente no referencial, isto é, na localização exata do objeto a que se refere. Com o suporte da RA em sistemas WSD, isso ganha ainda mais relevância, uma vez que o alinhamento espacial reduz

a necessidade de explicações adicionais e facilita a compreensão imediata (KURZHALS et al., 2022; ASSOR et al., 2023).

Nesse panorama, o conceito de empoderamento emerge como elemento central. Inspirado pelo trabalho de (WILLETT et al., 2021), esse conceito refere-se à capacidade das visualizações de ampliar as habilidades cognitivas e perceptivas do usuário, conferindo-lhe, metaforicamente, "superpoderes". Essa analogia remete à criação de visualizações que extrapolam os limites do possível, como dotar condutores de percepções expandidas sobre o ambiente ao seu redor. Por exemplo, seria possível imaginar uma visualização situada que funcionasse como uma "visão de raio-x", permitindo ao motorista enxergar além de obstáculos físicos, ou mesmo uma "visão emocional", capaz de revelar sinais de estresse ou comportamento de risco em outros condutores, antecipando situações de perigo iminente.

Essa perspectiva amplia o papel das visualizações situadas no design automotivo, destacando seu potencial não só como meio de apresentar dados, mas como ferramenta para ampliar a percepção e a consciência situacional do condutor. Ao integrar dados ao ambiente de ação, essas visualizações favorecem o entendimento imediato e decisões mais informadas. No contexto desta dissertação, essa abordagem será explorada como uma estratégia promissora para lidar com informações críticas, especialmente aquelas não visíveis no campo de visão do condutor, com foco em como projetar tais visualizações de maneira eficaz, compreensível e útil ao condutor em tempo real.

2.3 VISUALIZAÇÃO DE DADOS NÃO VISÍVEIS

A visualização de dados não visíveis refere-se a técnicas para representar informações ou objetos que não podem ser observados diretamente pelo usuário, seja porque estão ocultos atrás de obstáculos, fora do campo de visão, obstruídos por outros objetos ou de alguma forma ilegíveis a olho nu (ASSOR et al., 2023), ilustrado na Figura 2. No contexto de visualizações situadas, ASSOR et al. destacam que a maioria dos trabalhos anteriores assume o referente visível, ignorando casos em que o objeto físico está escondido ou fora de vista. Para preencher essa lacuna, eles propõem uma taxonomia e um espaço de design específicos para lidar com referentes não visíveis, a partir de um levantamento das técnicas já propostas em áreas de interface do usuário 3D, visualização 3D e Realidade Mista. Em suma, o objetivo é favorecer que usuários obtenham "visão além do alcance", integrando dados invisíveis ao seu campo visual de forma útil e intuitiva.

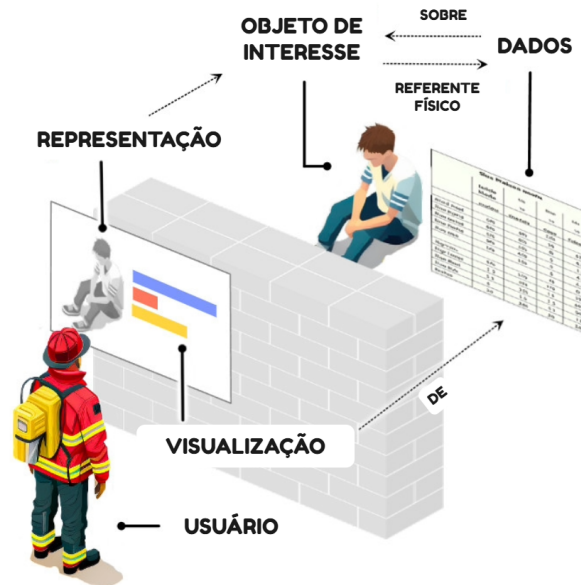


Figura 2 – Esquema conceitual adaptado de ASSOR et al., representando a relação entre o usuário, os dados e o referente físico não visível.

Diversas abordagens têm sido exploradas para tornar o invisível visível, tanto em aplicações gerais, como medicina, indústria, arquitetura e em cenários veiculares. Na medicina, por exemplo, sistemas de RA vêm revolucionando cirurgias ao tornar visíveis órgãos internos ou tumores ocultos dentro do corpo durante um procedimento, com RA, o cirurgião pode ver estruturas internas alinhadas sobre o paciente em tempo real, melhorando sua percepção e orientação no tratamento (SALEHAHMADI; HAJIALIASGARI, 2019). Estudos relatam que diferentes estruturas, como ossos e órgãos, podem ser alternadamente ocultadas ou destacadas na exibição conforme necessário, oferecendo efetivamente uma visão “transparente” do paciente (THAPA et al., 2021; SALEHAHMADI; HAJIALIASGARI, 2019) (Figura 3-C). Isso tem sido implementado com headsets ou projeções que registram imagens de exames, como tomografias ou ultrassom, diretamente no campo de visão do médico. Os benefícios incluem maior precisão cirúrgica e redução de riscos, embora desafios de registro preciso e latência precisem ser superados.

No contexto industrial e de manutenção, RA é usada para revelar componentes escondidos de máquinas ou infraestruturas. Por exemplo, em manutenção predial e construção civil, aplicações de RA ajudam técnicos a visualizar tubulações enterradas, fiação elétrica dentro de paredes ou estruturas atrás de painéis opacos, com técnicas de visualização que simulam um corte no solo para expor o encanamento subterrâneo (EREN; BALCISOY, 2018). Avaliações mostraram que métodos como “caixa de escavação”, que exibe um corte aberto do subsolo, melhoram a noção de profundidade e posicionamento dos encanamentos em comparação a simples sobreposição transparente (MUTHALIF; SHOJAEI; KHOSHELHAM, 2024) (Figura 3-D).

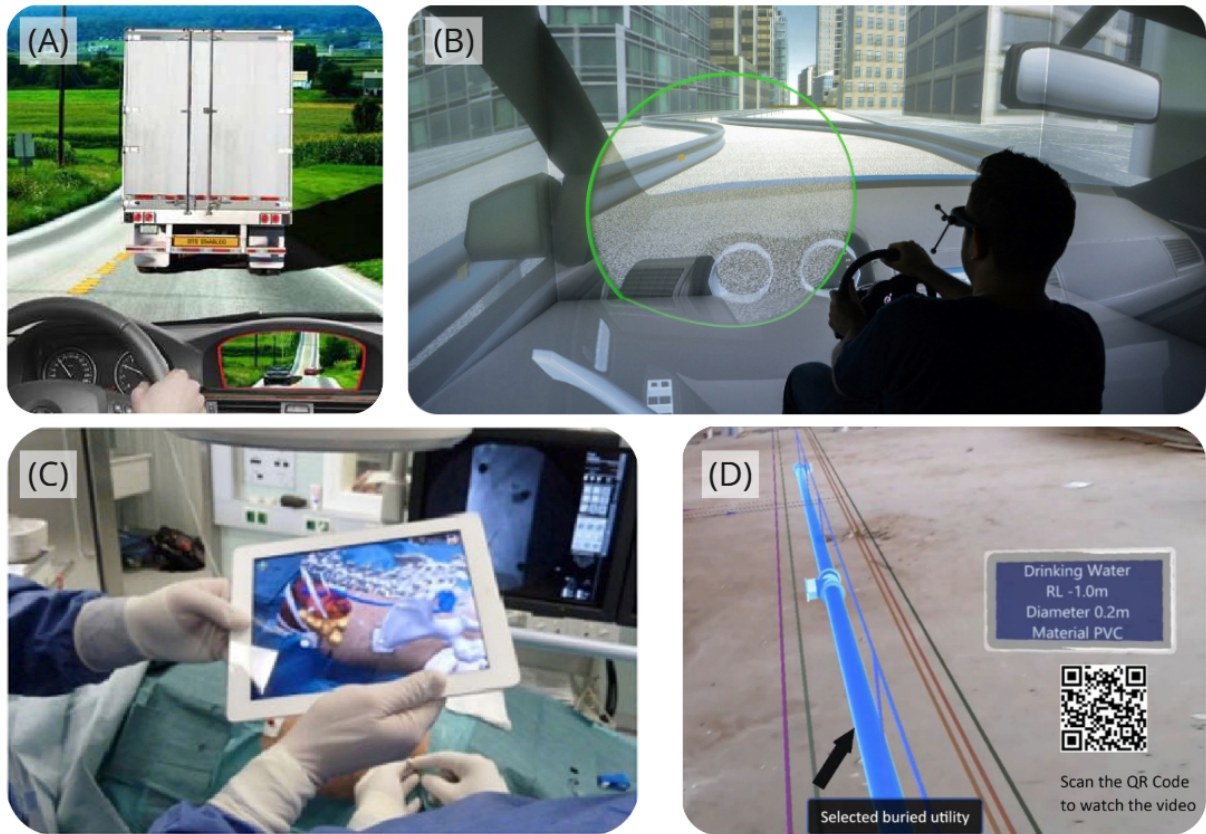


Figura 3 – Exemplos de visualizações aplicadas a referentes não visíveis em diferentes contextos. (A) Sistema automotivo See-Through, que transmite em tempo real o vídeo da câmera frontal do veículo à frente para possibilitar ultrapassagens seguras (OLAVERRI-MONREAL et al., 2010). (B) Cockpit com realidade diminuída, permitindo ao condutor visualizar áreas ocultas da carroceria do veículo (LINDEMANN; RIGOLL, 2017). (C) Aplicação médica de RA que projeta estruturas internas do paciente sobre o corpo durante procedimentos cirúrgicos (THAPA et al., 2021). (D) Interface de manutenção predial com visualização de tubulações subterrâneas em RA sobrepostas ao ambiente real (MUTHALIF; SHOJAEI; KHOSHELHAM, 2024).

De forma geral, a visão de raio-X em RA tem grande potencial na indústria, pois, permite que profissionais “vejam através” de estruturas físicas, inspecionando elementos estruturais ocultos, fios elétricos e sistemas de encanamento em tempo real. Isso facilita inspeções prediais, identificação de falhas escondidas e planejamento de intervenções sem precisar desmontar paredes ou escavar às cegas.

No domínio automotivo, em uma condução, diversos perigos podem estar presentes sem serem vistos diretamente. Por exemplo, um pedestre prestes a surgir por detrás de um veículo estacionado, um carro oculto no ponto cego, ou um obstáculo após uma curva fechada. HUD e WSD vêm sendo exploradas para trazer essas informações ocultas ao campo de visão do motorista em tempo real.

Uma abordagem interessante para tornar visível o que normalmente está oculto ao con-

dutor foi proposta por (LINDEMANN; RIGOLL, 2017), que exploram o conceito de realidade diminuída aplicada a cockpits transparentes. Em seu estudo, os autores desenvolveram um protótipo de simulação que permite ao motorista “ver através” da estrutura do próprio veículo, revelando obstáculos que estariam obstruídos pela lataria (Figura 3-B). Os resultados de um pré-estudo com oito participantes sugerem que áreas maiores de transparência são preferidas, proporcionando mais conforto, utilidade e menos distração visual em comparação às menores. A pesquisa reforça o potencial de HUD com realidade diminuída como ferramentas de percepção expandida, sugerindo que tornar visíveis os elementos ocultos do ambiente próximo ao veículo pode contribuir significativamente para a segurança e a tomada de decisão durante a condução.

Em um experimento em RV, (PEEREBOOM et al., 2024) testaram diferentes soluções de RA para avisar um pedestre cruzando oculto por um carro estacionado. As condições incluíam, uma tornando o veículo oclutor semi-transparente, outra projetando diretamente sobre ele a imagem do carro oculto vindo. Os resultados mostraram que as duas abordagens conformes e localmente embutidas foram as mais eficazes e bem avaliadas pelos participantes. Em contraste, a primeira interface causou desconforto e dividiu a atenção, pois os usuários tinham que alternar o olhar entre a tela fixa e a cena, e adicionar setas de indicação não trouxe benefício significativo além do vídeo. Ou seja, integrar a visualização do objeto oculto diretamente no ambiente, utilizando de visualização situada, tende a melhorar a detecção sem distrair tanto quanto displays separados.

Outra linha de pesquisa foca em expandir o campo de visão do motorista por meio de sensores e conectividade, efetivamente permitindo “ver” além das limitações visuais do veículo. Um exemplo pioneiro é o See-Through System desenvolvido por (OLAVERRI-MONREAL et al., 2010) (Figura 3-A). Esse sistema utiliza comunicação Vehicle-to-Vehicle (V2V) para habilitar uma espécie de visão transparente através de veículos à frente. Em sua concepção, caminhões ou ônibus na via seriam equipados com uma câmera frontal, enquanto os carros atrás possuem um display transparente embutido no para-brisa, assim, o vídeo ao vivo do que o caminhão vê à frente é transmitido e exibido na posição correspondente do para-brisa do carro de trás. Na prática, é como se o caminhão à frente se tornasse “invisível”, o motorista atrás consegue enxergar a estrada adiante através do veículo obstrutor, tendo condições de avaliar com segurança se pode ultrapassar. Os motoristas relataram que a informação fornecida foi extremamente útil para decidir ultrapassagens de forma segura.

Em paralelo, montadoras e pesquisadores vêm explorando conceitos similares de percepção

cooperativa e ampliada. A Nissan, por exemplo, introduziu o conceito Invisible-to-Visible (I2V), que integra dados de múltiplas fontes (sensores do veículo, infraestrutura conectada e nuvem) para projetar em RA informações que o motorista normalmente não conseguiria ver (Nissan Motor Corporation, 2025). O I2V promete exibir “informações do mundo real e virtual que o condutor não veria de outra forma”. Isso inclui desde detalhes do tráfego mais à frente até perigos potenciais escondidos, como um carro ou pedestre oculto atrás de um edifício na esquina, ou um obstáculo logo depois de uma curva cega. A Nissan prevê essa tecnologia emergindo comercialmente nos próximos anos, visando aumentar a confiança do condutor e a conveniência. Embora o I2V seja uma visão conceitual, ele exemplifica a direção dos esforços atuais, como usar RA e conectividade para “quebrar as barreiras” do campo de visão do motorista.

Essas capacidades são aprimoradas por sistemas cooperativos V2X. Pesquisas recentes demonstraram o conceito de “percepção coletiva” no trânsito, mostrando ganhos concretos de segurança. Em testes realizados pelo *Australian Centre for Field Robotics* com apoio do *iMOVE CRC*, uma infraestrutura de unidades inteligentes na via (*ITS stations*) comunicava a veículos conectados a presença de pedestres fora da vista (University of Sydney, 2021). Os resultados mostraram que um carro autônomo conectado pôde “enxergar” um pedestre oculto por um prédio vários segundos antes que seus próprios sensores de bordo ou um motorista humano o vissem surgindo na rua. Essa antecipação de segundos permitiu ao veículo reagir preventivamente, chegando a frear antes mesmo de o pedestre surgir na esquina. Em outro experimento, o sistema previu o movimento de um pedestre correndo em direção a uma faixa de travessia e fez o veículo reduzir proativamente. Esses estudos de V2X cooperativo comprovam que compartilhar o “campo de visão” entre veículos e infraestrutura pode quebrar as limitações físicas dos sensores de um único veículo. Em essência, cada veículo ganha uma espécie de visão de raio-X coletiva, vendo não apenas com seus “olhos” (câmeras, radares próprios) mas também com os dos demais agentes na via. Isso expande dramaticamente a percepção situacional e abre caminho para exibições HUD e WSD integrarem essas informações para o motorista em tempo real.

Diante desse cenário, é fundamental que a comunidade de visualização de dados reconheça o amadurecimento dessa área como um campo promissor, com potencial de consolidação no mercado nos próximos anos. Isso demanda o desenvolvimento de soluções com abordagens de design específicas, sensíveis às particularidades cognitivas e contextuais envolvidas na representação de informações não visíveis.

2.4 SEGURANÇA NA CONDUÇÃO

No contexto veicular, o termo segurança refere-se à capacidade de antecipar, evitar ou mitigar eventos que coloquem em risco a integridade dos ocupantes do veículo e demais usuários da via. Já um perigo é entendido como qualquer condição, objeto ou evento potencialmente capaz de causar um acidente, como um pedestre prestes a cruzar a via usando no celular, um ciclista escondido no ponto cego ou um obstáculo logo após uma curva. De acordo com (KOESDWIADY et al., 2016), mais de 90% dos acidentes de trânsito envolvem algum tipo de erro humano, com destaque para fatores como distração, fadiga e baixa consciência do exterior do veículo. Portanto, promover segurança na condução significa, em grande medida, fornecer suporte cognitivo ao condutor para que ele mantenha atenção, reaja rapidamente, tenha uma noção maior do que acontece no exterior do veículo e tome decisões apropriadas mesmo em condições de risco ou incerteza.

A literatura propõe diferentes abordagens para capturar e quantificar a segurança na condução. Uma dessas abordagens concentra-se na atenção do condutor, analisando fatores como distrações cognitivas, visuais e manuais, bem como sinais de fadiga, sonolência ou estresse (KOESDWIADY et al., 2016). Essas variáveis refletem diretamente o estado interno do motorista e sua capacidade de reagir adequadamente a eventos críticos. Em paralelo, outra linha de pesquisa enfatiza o aumento da consciência sobre o ambiente externo ao veículo, frequentemente descrito como a ampliação da consciência situacional do condutor. Segundo (ENDSLEY, 1995), esse conceito abrange três níveis: a percepção de elementos relevantes no ambiente, a compreensão de seu significado no contexto da tarefa e a projeção de seus desdobramentos futuros. Ambas as abordagens, atenção e consciência situacional, são complementares e fundamentais para avaliar o desempenho do condutor e o nível de segurança alcançado em diferentes condições de direção.

Alguns indicadores de desempenho dos condutores também podem ser utilizados para estimar seu nível de consciência situacional. Em especial, métricas relacionadas ao desempenho durante a retomada do controle do veículo, como o tempo de reação e o tempo até a colisão, são consideradas medidas eficazes para avaliar o grau de percepção e prontidão do motorista diante de situações críticas. Com base nisso, diversos estudos analisam aspectos do comportamento de direção, enquanto alguns investigam o desempenho na retomada da condução (LINDEMANN; MÜLLER; RIGOLLL, 2019; YANG et al., 2018; TELPAZ et al., 2015; TIJERINA et al., 2016; ZHANG et al., 2025), outros avaliam diretamente o tempo de reação frente a eventos

inesperados (PAWAR; VELAGA, 2020; KIM et al., 2019; KÖHN et al., 2019; KUNZE et al., 2019; YADAV; VELAGA, 2019; SCHMIDT; RITTGER, 2017), o comportamento geral de condução (ASHQAR et al., 2024; FEI et al., 2025; KIM et al., 2019; LINDEMANN; MÜLLER; RIGOLLL, 2019; BEUKEL; VOORT, 2017; KIM et al., 2017), ou ainda indicadores como o número de colisões, o tempo até a colisão, o desvio lateral na faixa de rolamento e outros dados veiculares (WANG et al., 2017; LARGE et al., 2019; WIEGAND et al., 2018; BEUKEL; VOORT, 2017). Esses indicadores, tomados em conjunto, ajudam a compreender se o condutor está ciente do ambiente e se consegue reagir de forma eficaz a possíveis riscos.

Por exemplo, (LINDEMANN; MÜLLER; RIGOLLL, 2019) utilizaram o tempo de reação como métrica para avaliar o desempenho de condutores durante retomadas de controle em situações urbanas com aviso de curto prazo. O objetivo foi verificar o impacto de diferentes tipos de interface, uma visualização convencional no painel e uma interface de projetada no WSD. Os resultados indicaram que a visualização RA aumentou o tempo de reação em tarefas de frenagem, sugerindo um possível custo cognitivo associado à interpretação da interface. Em outro estudo, (YADAV; VELAGA, 2019) modelaram a relação entre diferentes concentrações de álcool no sangue e o tempo de reação de motoristas jovens e maduros, evidenciando como o comprometimento cognitivo afeta a prontidão para reassumir o controle. De modo complementar, ZHANG et al. analisaram a qualidade das decisões dos motoristas em tarefas críticas de direção, com o objetivo de investigar como o tempo disponível influencia a racionalidade das escolhas em contextos típicos de retomada da condução. Já (CURRANO et al., 2021) exploraram como o nível de complexidade visual de um HUD, comparando interfaces com alta densidade de informações versus modelos minimalistas, influencia a percepção do motorista sobre o sistema autônomo, avaliando os efeitos dessa variação na consciência situacional durante a condução.

Complementarmente, estudos mais recentes têm adotado métricas estatísticas robustas para caracterizar o comportamento de condução, com destaque para o uso do Intervalo Interquartil (IQR) como medida de variabilidade. Por exemplo, (ASHQAR et al., 2024) utilizaram o IQR para derivar coeficientes de variação baseados em quantis, analisando como a volatilidade em aceleração, frenagem e velocidade pode distinguir estilos de direção e prever o consumo de combustível de forma mais precisa. De forma semelhante, (FEI et al., 2025) empregaram o IQR para quantificar o grau de instabilidade no comportamento dos condutores e correlacionar essas variações com índices de segurança, mostrando que maiores flutuações nos controles estão associadas a maior risco. Ambos os estudos reforçam o papel do IQR como métrica eficaz para capturar nuances no estilo de direção, especialmente por sua robustez a outliers e

sua capacidade de representar oscilações bruscas típicas de situações de risco.

Sendo assim, este trabalho adota duas métricas principais para avaliar a segurança na condução em cenários com perigos não visíveis: o tempo de reação e o comportamento de condução. O tempo de reação foi escolhido por ser amplamente reconhecido na literatura como um indicador direto da prontidão do condutor diante de eventos críticos, especialmente em contextos que envolvem a retomada do controle do veículo após uma fase de automação ou distração (LINDEMANN; MÜLLER; RIGOLLL, 2019; ZHANG et al., 2025). Já o comportamento de condução foi analisado com base na variabilidade dos comandos executados após a percepção do perigo, utilizando o IQR como medida estatística central. Essa escolha é fundamentada em estudos recentes (FEI et al., 2025; ASHQAR et al., 2024) que demonstram que o IQR é particularmente eficaz para capturar padrões de direção instáveis. Assim, a combinação dessas duas abordagens permite uma avaliação do impacto das visualizações situadas, tanto em termos da rapidez com que o condutor retoma o controle quanto da qualidade e estabilidade de sua condução diante de situações de risco.

3 METODOLOGIA

Este estudo seguiu uma abordagem experimental para investigar como visualizações situadas, projetadas no para-brisa de veículos, podem contribuir para a segurança do condutor ao alertar sobre perigos ocultos na via. Todos os procedimentos foram previamente registrados na plataforma Open Science Framework (OSF), disponível em: <https://osf.io/758by>, com o intuito de reforçar a transparência e a reprodutibilidade da pesquisa.

3.1 VARIÁVEIS

Nesta seção, apresentamos a definição e a operacionalização das variáveis utilizadas no estudo, projetadas para avaliar os efeitos das visualizações situadas sobre o comportamento dos condutores diante de perigos na via. O foco está tanto na resposta temporal quanto nas adaptações no estilo de condução sob diferentes condições experimentais.

3.1.1 Variáveis independentes

Duas variáveis independentes foram consideradas neste estudo para investigar o impacto de visualizações de perigos ocultos na segurança da condução:

Presença de visualização se refere à exibição (ou não) de elementos visuais no para-brisa do veículo correspondentes aos perigos na via. Ela serve para testar se a simples presença de uma informação visual pode afetar a forma como o condutor reage a perigos inesperados. Esta variável possui dois níveis: (i) situação *com visualização*, quando ícones ou alertas visuais sobre os perigos na via são projetados no para-brisa do veículo e (ii) situação *sem visualização*, quando nenhuma informação visual adicional é fornecida ao condutor.

Visibilidade dos dados é a distância na qual os elementos visuais que representam perigos podem ser vistos pelo condutor. Ela foi pensada para comparar a efetividade entre visualizações de perigos visíveis e de perigos ocultos. Esta variável possui dois níveis: (i) *visualização regular*, uma informação visual aparece quando o obstáculo já se encontra ao alcance do campo de visão do condutor, podendo ser detectado por sensores como câmeras ou LiDAR e (ii) *visualização aprimorada*, quando uma visualização é projetada

enquanto o perigo ainda está fora do campo de visão ou oculto por algum obstáculo, mas pode ser antecipado por tecnologias como comunicação V2X.

A escolha dessas variáveis é consistente com os desafios mapeados por ASSOR et al., que argumentam que grande parte das visualizações situadas assume que o objeto de interesse está visível, negligenciando contextos em que o perigo pode estar oculto. Ao manipular a presença de visualização e sua visibilidade no ambiente veicular, buscamos investigar o impacto dessas condições na prontidão do condutor para reagir a eventos críticos.

3.1.2 Variáveis dependentes

A variável dependente principal é o **tempo de reação**, medido em segundos. Este é o tempo que o condutor leva para reagir a um perigo iminente na pista (LINDEMANN; MÜLLER; RIGOLLL, 2019; YANG et al., 2018; ZHANG et al., 2025). Esse tempo corresponde ao intervalo entre o momento em que o perigo é percebido e o instante em que o condutor reage ao perigo. A métrica é formalizada pela Equação 3.1:

$$t_R = t_r - t_p \quad (3.1)$$

Onde t_R é o tempo de reação a um determinado perigo na via, t_p é o instante da percepção do perigo (o perigo pode ser visto pelo condutor, seja diretamente ou por meio de uma visualização) e t_r o instante da resposta motora (o condutor desativa o piloto automático ao clicar em um botão). Para análise estatística, será considerada a média dos tempos de reação registrados em cada uma das vinte ocorrências enfrentadas pelos participantes, formalizada pela Equação 3.2:

$$\bar{T}_R = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} T_{R,i} \quad (3.2)$$

Como variável dependente secundária, será analisado o **comportamento de direção**, definido como a resposta dinâmica do condutor diante do perigo. Esta variável é composta por quatro métricas: velocidade do veículo (km/h), intensidade de frenagem (pressão no pedal), variação no ângulo do volante (graus) e nível de aceleração (posição do pedal do acelerador). Embora o foco da análise esteja no tempo de reação, o comportamento de direção foi incluído como uma medida complementar para capturar nuances no estilo de condução e verificar se

diferentes condições experimentais influenciam não apenas o tempo de resposta, mas também a forma como os participantes conduzem o veículo após detectar o perigo.

Cada métrica foi avaliada durante o intervalo entre t_r (instante de resposta motora) e t_u (instante em que o veículo ultrapassa completamente o perigo). Foi calculado o IQR dos dados, formalizada pela Equação 3.3:

$$IQR_x = Q3_x - Q1_x \quad (3.3)$$

Sendo $Q3_x$ e $Q1_x$ os percentis 75 e 25, respectivamente, dos valores da variável x durante o intervalo de resposta. O uso do IQR permite capturar oscilações nos comandos de direção durante a janela de reação, funcionando como um indicativo da variabilidade no estilo de condução. Valores mais elevados de IQR estão associados a respostas mais bruscas e reativas, como desvios repentinos ou frenagens intensas, enquanto valores mais baixos sugerem um comportamento mais estável e controlado (FEI et al., 2025; ASHQAR et al., 2024).

3.2 DESIGN DO ESTUDO

Este estudo adota um design experimental composto por duas abordagens, o design *within-subjects*, no qual os mesmos participantes são expostos a diferentes condições experimentais, permitindo comparações intraindividuais, e o design *between-subjects*, onde diferentes grupos de participantes são expostos a diferentes condições, permitindo comparações intergrupos evitando a adaptação dos condutores a cada visualização, cada uma voltada para responder uma das perguntas de pesquisa.

Para investigar o efeito da exibição de visualizações na segurança da condução (QP1), foi adotado um design *within-subjects*. Essa abordagem é particularmente adequada para essa pergunta de pesquisa porque permite comparar diretamente o desempenho de um mesmo participante com e sem a presença de visualizações no para-brisa, sob condições controladas e idênticas. Ao utilizar os próprios indivíduos como controle, esse tipo de design elimina a influência de diferenças individuais, como experiência ao volante ou familiaridade com tecnologia, o que aumenta a precisão estatística da análise e reduz a necessidade de grandes amostras (FEIERLE; BELLER; BENGLER, 2019).

Todos os participantes se depararam ao longo do trajeto com os mesmos tipos de perigos na via, caracterizados como buracos no asfalto, animais cruzando a pista e lombadas não

sinalizadas (mais detalhes na Seção 3.3). Esses eventos foram distribuídos de forma fixa ao longo das quatro rotas do experimento. Em metade das vezes em que esses perigos surgiram, foi exibida uma visualização no para-brisa para alertar o motorista, na outra metade, o evento ocorreu sem nenhum tipo de aviso visual. Para mitigar os efeitos de aprendizagem, a ordem em que as visualizações foram apresentadas foi contrabalançada entre os participantes.

Para examinar o efeito da antecipação de perigos na via por meio de visualizações (QP2), utilizamos um design *between-subjects*. Essa abordagem foi escolhida para evitar a influência cruzada entre condições, se um mesmo participante fosse exposto às duas formas de visualização, regular e aprimorada, a experiência com uma poderia influenciar sua resposta à outra. Ao alocar os participantes em dois grupos independentes, cada um vivencia apenas uma versão do sistema, o que aumenta o realismo contextual e elimina efeitos de aprendizagem ou expectativa (EYRAUD; ZIBETTI; BACCINO, 2015).

Cada participante foi alocado em apenas um dos grupos definidos pelo design *between-subjects*, sendo *Visualização Aprimorada* ou *Visualização Regular*, o que determina o tipo de visualização que receberá ao longo do experimento. Dentro de cada grupo, aplicou-se também o design *within-subjects*, no qual o participante vivenciou tanto situações com visualização quanto sem visualização, possibilitando uma comparação direta entre as duas condições. O design do experimento foi ilustrado na Figura 4.

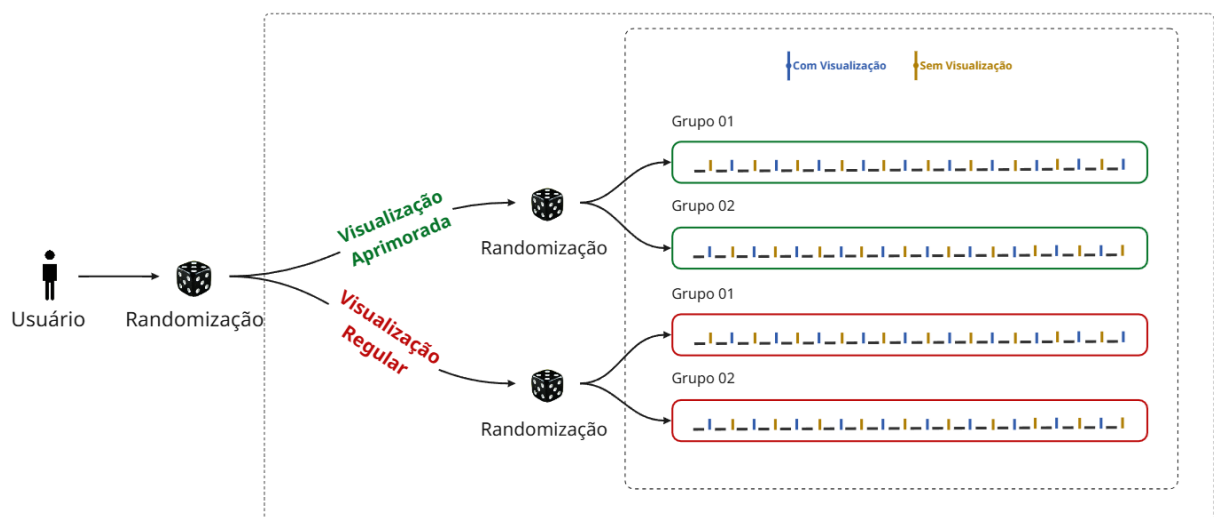


Figura 4 – Estrutura do design de estudo.

3.3 VISUALIZAÇÃO

A concepção das visualizações utilizadas no experimento fez parte do método e foi conduzida inicialmente por meio de workshops com especialistas em realidade aumentada e visualização de dados. Os cenários apresentados em ambos os workshops foram definidos de forma a representar situações de risco plausíveis e desafiadoras, como animais surgindo em trechos de curva, lombadas dispostas em áreas de sombra sem sinalização adequada, e buracos distribuídos ao longo dos trechos.

A primeira sessão contou com participantes do laboratório VoxarLabs, da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), especializados em computação gráfica e inteligência artificial, incluindo dois doutores, dois mestrandos e um graduando. Embora a sessão não tenha contado com engenheiros de tráfego ou especialistas formais em segurança viária, os pesquisadores envolvidos atuam diretamente em projetos automotivos com empresas como Volkswagen e Stellantis, trazendo experiência prática em cenários de mobilidade e segurança veicular. Essa experiência prática com o setor forneceu embasamento relevante sobre aspectos técnicos e desafios computacionais associados à implementação das visualizações. Na segunda sessão, participaram ainda dois especialistas em visualização de dados, um professor da UFPE e um professor da University of Calgary (Canadá). Esta colaboração trouxe importantes considerações sobre design gráfico e estratégias eficazes de comunicação visual. Ao final das sessões, as contribuições foram sistematizadas em um documento denominado *Mockup*¹, que organizou as ideias discutidas levando em consideração tanto os requisitos levantados quanto os recursos técnicos e o tempo disponível para implementação.

A Figura 5 ilustra, de forma geral, o processo conduzido durante o workshop. A atividade foi estruturada em duas etapas principais. A primeira consistiu em um exercício de desbloqueio criativo, no qual os participantes foram convidados a propor visualizações capazes de alertar o condutor sobre perigos iminentes, como animais, buracos e lombadas. Na segunda etapa, o foco foi direcionado para o contexto da pesquisa, desafiando os participantes a imaginar como essas visualizações poderiam comunicar perigos não visíveis. Foram levantadas questões provocativas como: "Como informar ao condutor sobre um buraco em um ambiente com múltiplos veículos?" ou "Como alertar sobre um animal cruzando a pista logo após uma curva quando o veículo está em alta velocidade?"

Após a finalização dos workshops, identificamos a necessidade de delimitar um ambiente

¹ Disponível em: <https://miro.com/mockup>

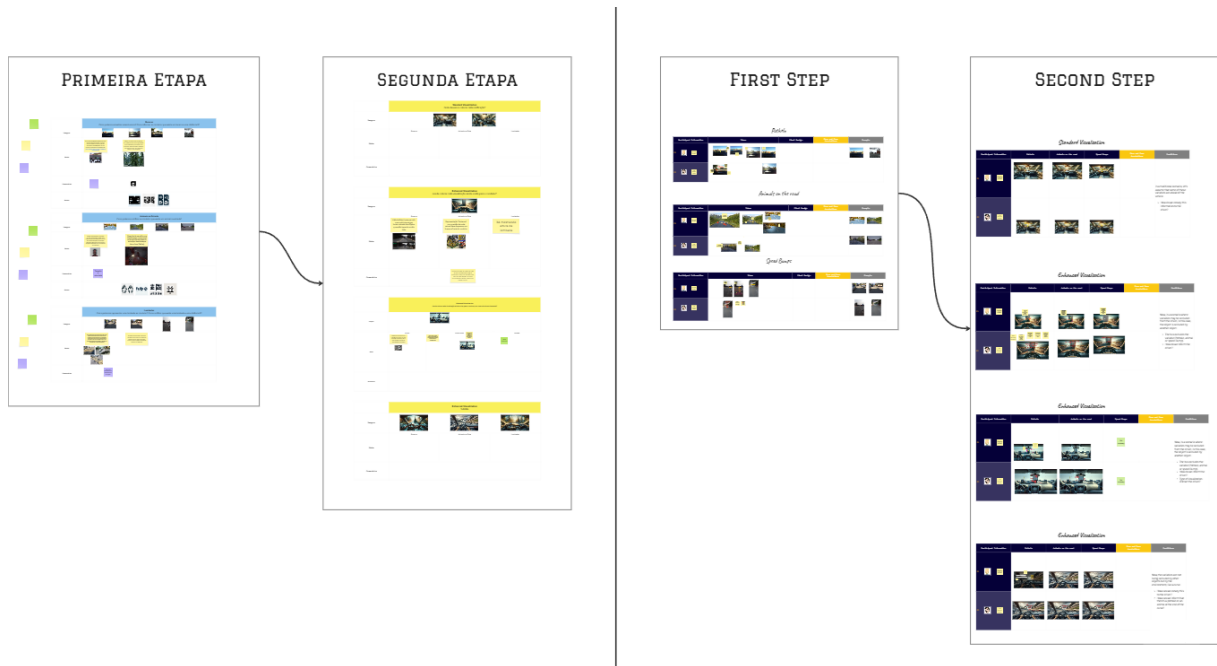


Figura 5 – Resultado dos workshops

específico para a pesquisa. Isso se deve ao fato de que o tema da visibilidade de perigos ocultos é pouco explorado na literatura, especialmente como variável independente, conforme discutido na Seção 3.1. Representar esses perigos em cenários com alta densidade de veículos, como áreas urbanas ou em congestionamentos, poderia introduzir efeitos colaterais inesperados. Por esse motivo, optamos por conduzir o experimento em um ambiente com menor complexidade visual, como rodovias com poucos veículos, reduzindo assim o número de variáveis externas, como pedestres, ciclistas e outros carros.

Em seguida, focamos no desenvolvimento das visualizações no ambiente rodoviário. Nos inspiramos nas ideias desenvolvidas no workshop e nas recomendações apresentadas em HA-EUSLSCHMID; PFLEGING; ALT, priorizando a visibilidade das informações, sejam elas com referentes visíveis ou não visíveis. Sempre imaginado o uso de uma interface WSD, com elementos gráficos 2D alinhados espacialmente ao objeto de interesse. Decidimos usar ícones semelhantes a placas de sinalização, com o intuito de identificar cada tipo de perigo utilizando um simbolismo familiar do trânsito (SHINAR; VOGELZANG, 2013).

A segunda etapa consistiu da implementação da visualização, seguindo padrões de projeto específicos, em especial os padrões *Glifo* e *Rótulo* descritos por LEE; SEDLMAIR; SCHMALSTIEG. O *Glifo* é uma codificação visual simplificada que representa de forma clara o tipo de perigo, destacando regiões específicas do referente. Esse padrão foi utilizado para indicar o objeto de



Figura 6 – Representação da visualização quando o perigo ainda não está visível para o condutor

interesse quando ele não está visível, ilustrado na Figura 6. Já os elementos do tipo *Rótulo* complementaram a visualização com informações adicionais, como o tipo de perigo ou o nível de alerta. No experimento, aplicamos rótulos sobre o referente e um pequeno identificador no canto inferior do WSD, inspirado na sinalização de trânsito. O resultado final pode ser observado na Figura 7.



Figura 7 – Representação da visão do condutor com e sem as visualizações no WSD

As visualizações de cada perigo na via tem duas condições experimentais, que refere-se as variáveis independentes, descrito na Seção 3.1. A visualização regular, que está ilustrada na Figura 7, onde os perigos estão visíveis e a visualização aprimorada, onde os perigos não estão visíveis, como ilustrado na Figura 6.

3.4 PARTICIPANTES

Os participantes são adultos, sem a exigência de possuir carteira de motorista ou experiência prévia em direção. Para participar, foi necessário ter idade igual ou superior a 18 anos, estar em condições físicas e cognitivas que permitam o uso do simulador e não apresentar histórico de desconforto severo, tontura, enjoo ou outros sintomas associados ao uso de realidade virtual.

O recrutamento foi realizado por e-mail, direcionado a alunos, professores e funcionários da UFPE. A estratégia ocorreu em duas fases: na primeira, o convite foi enviado aos grupos de pesquisa da UFPE; na segunda, um e-mail institucional geral, distribuído pelo canal oficial da universidade.

A amostra deste estudo foi composta por 30 participantes, cujas características demográficas e de experiência de condução fornecem o contexto necessário para interpretar os resultados. No que se refere à faixa etária, observou-se variação entre 21 e 49 anos, com média de 29,5 anos e mediana de 26 anos. Esses valores indicam que a maioria dos voluntários era composta por adultos jovens e indivíduos de meia-idade, o que pode influenciar aspectos como tempo de reação e familiaridade com tecnologias automotivas.

Em relação à distribuição por gênero, 76,2% dos participantes identificaram-se como do gênero masculino e 23,8% como do gênero feminino. Quanto à habilitação para conduzir, 66,7% possuíam Carteira Nacional de Habilitação (CNH), enquanto 33,3% não a possuíam. Em relação ao tempo de condução entre os que declararam possuir CNH, verifica-se que 42,1% dos motoristas relataram ter entre 3 e 10 anos de experiência ao volante. Em seguida, 31,6% dos condutores tinham de 0 a 1 ano de prática, ao passo que 21,1% contavam com mais de 10 anos de direção. A menor proporção (5,3%) referiu ter entre 1 e 3 anos de experiência.

3.5 PROCEDIMENTOS

A distribuição dos participantes nas condições experimentais ocorreu por meio de um sorteio com blocos de fichas coloridas. A cada ciclo de dez participantes, foram oferecidas dez fichas divididas igualmente entre duas cores, cada cor representando uma das condições experimentais. Cada pessoa sorteia uma ficha que define sua condição para todo o experimento. Após o fechamento de cada bloco de dez sorteios, as fichas são reinseridas, garantindo que, a cada grupo de dez participantes, haja sempre um equilíbrio perfeito entre as condições. Esse método de randomização por blocos foi escolhido para evitar desequilíbrios acidentais

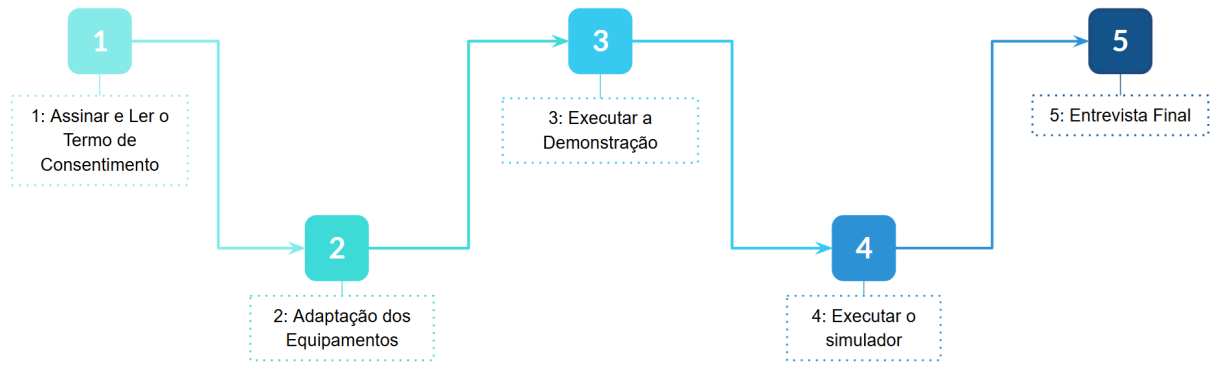


Figura 8 – Fluxograma dos procedimentos experimentais realizados com cada participante.

na distribuição dos participantes ao longo do tempo, assegurando homogeneidade entre os grupos.

Antes do início da sessão experimental, cada participante recebeu um breve resumo explicativo sobre os objetivos do estudo, as etapas do experimento e os cuidados éticos adotados. Em seguida, foi realizada a leitura padronizada de um documento introdutório e a assinatura do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE), assegurando que o voluntário está ciente de sua participação e pode desistir a qualquer momento, sem prejuízos.

Na etapa seguinte, foi feita a calibração do dispositivo de realidade virtual para ajustar a experiência às características visuais e ergonômicas do participante. Após a calibração, cada voluntário foi conduzido por uma simulação de demonstração com duração aproximada de cinco minutos, cujo objetivo é familiarizá-lo com o ambiente virtual, os controles do veículo e o funcionamento geral do simulador. Nesta etapa, os participantes não tiveram contato com as visualizações. Essa demonstração padronizada de familiarização teve o objetivo de normalizar o desempenho inicial dos participantes e minimizar diferenças associadas à adaptação ao simulador.

Ao iniciar o experimento, cada participante realizou quatro trajetos, percorrendo cenários que incluem cinco perigos em cada rota, totalizando vinte eventos por sessão. O objetivo do experimento descrito aos participantes era ultrapassar cada perigo na via da melhor forma possível, evitando acidentes. Durante as instruções, foi pedido aos participantes que, ao visualizarem um perigo na via, desativassem o piloto automático e desviassem do perigo da forma mais segura que ela imaginasse.

Ao término da atividade, foi realizada uma entrevista semiestruturada com o intuito de explorar impressões qualitativas sobre as visualizações, eventuais desconfortos e sugestões de

melhoria para futuras versões do sistema. A sequência completa dos procedimentos experimentais pode ser visualizada de forma resumida na Figura 8.

3.6 SIMULADOR DE DIREÇÃO



Figura 9 – Visão do participante no simulador

O simulador de direção foi desenvolvido especificamente para esta pesquisa, com o propósito de criar um ambiente experimental controlado, seguro e compatível com os requisitos de avaliação de visualizações situadas em RA. A adoção de simulações é uma prática consolidada em estudos sobre interfaces veiculares baseadas em WSD, permitindo investigar o comportamento e a percepção de condutores em contextos de risco sem comprometer sua segurança. Pesquisas anteriores exploraram desde configurações com monitores convencionais (LIANG; ZHENG; XIA, 2023; EYRAUD; ZIBETTI; BACCINO, 2015) até ambientes imersivos com headsets de realidade virtual (JOSE; LEE; BILLINGHURST, 2016; OMEIZA et al., 2024; LINDEMANN; RIGOLL, 2017). Nesse contexto, a construção do simulador adotado neste estudo pautou-se pela fidelidade perceptual e pelo rigor metodológico, assegurando a reprodução precisa dos estímulos, a coleta automatizada dos dados e a consistência entre as diferentes condições experimentais.

O sistema foi desenvolvido no Unreal Engine 5, plataforma que oferece renderização fotorrealista, simulação física de alta precisão e suporte nativo a RV. A utilização da RV permitiu expor os participantes a situações de risco plausíveis sem comprometer sua integridade física,

proporcionando ao mesmo tempo um nível de imersão sensorial próximo ao de uma condução real (ENS et al., 2021). O motor gráfico viabilizou a criação de um cenário rodoviário detalhado e responsivo, com controle granular sobre variáveis como iluminação, clima e comportamento dos elementos da cena. A escolha pelo Unreal deve-se, sobretudo, à sua capacidade de processar múltiplas fontes de entrada em tempo real e à flexibilidade na integração de dispositivos externos, como headsets de RV e periféricos de direção, garantindo desempenho estável e realismo perceptual durante a execução do experimento.

Durante a fase de concepção, foi considerada a adoção do CARLA – (DOSOVITSKIY et al., 2017), um dos simuladores de condução mais utilizados na pesquisa em direção autônoma. O CARLA é uma plataforma de código aberto baseada no Unreal Engine 4, desenvolvida para experimentos de percepção, controle e aprendizado de máquina em contextos urbanos complexos. Seu ecossistema oferece recursos robustos, como simulação de sensores, condições climáticas variáveis e agentes não controláveis (veículos e pedestres), o que o torna uma ferramenta de referência em estudos de direção autônoma e visão computacional.

Entretanto, o foco do CARLA está na avaliação de sistemas de direção autônoma, não em estudos perceptuais centrados em condutores humanos. Sua arquitetura cliente-servidor, o conjunto de APIs voltado à instrumentação de agentes automáticos e a complexidade de sua camada de controle dificultam a adaptação para um experimento imersivo orientado à cognição humana. Ajustar o CARLA e até outros simuladores para esse propósito implicaria em alterações substanciais de seus módulos de controle, física e renderização em primeira pessoa, resultando em um custo de implementação comparável ao de um novo desenvolvimento. Assim, optou-se pela criação de um simulador próprio, mais leve e direcionado ao contexto de avaliação de visualizações situadas projetadas no para-brisa em primeira pessoa, como ilustrado na Figura 9.

O simulador proposto foi estruturado em módulos independentes: (i) o módulo de controle do veículo, responsável pela interface com o volante e pedais; (ii) o módulo de visualização, que gerencia a renderização das condições experimentais e a exibição dos elementos visuais no para-brisa virtual; e (iii) o módulo de registro de dados, responsável por armazenar telemetria e eventos em tempo real. A coleta incluiu variáveis como velocidade, posição, aceleração, tempo de reação e ocorrência de colisões, garantindo a rastreabilidade completa das ações do participante.

A simulação foi executada em headset Meta Quest 3, configurado para operar a 90 Hz, proporcionando fluidez visual e baixa latência. O conjunto de direção Logitech G27 foi utili-

zado para entrada física, com force feedback calibrado para reforçar a sensação de resistência mecânica e feedback tátil durante frenagens ou desvios. Antes de cada sessão, o sistema realizava uma calibração automática para alinhar a altura do assento virtual, o campo de visão e a distância interpupilar, assegurando consistência perceptual entre os participantes, visto na segunda etapa da Figura 8. O ambiente virtual reproduzia uma rodovia com trechos retos e curvas, variações de luminosidade e obstáculos contextuais como animais atravessando a pista, buracos e lombadas.

Em síntese, o simulador desenvolvido constituiu o núcleo experimental deste estudo, permitindo investigar o impacto de visualizações situadas sob condições de alta imersão, com controle rigoroso das variáveis e sem riscos físicos aos participantes. Sua arquitetura própria foi essencial para garantir a flexibilidade metodológica e o alinhamento com os objetivos da pesquisa, diferenciando-se de simuladores generalistas como o CARLA e outros, cujo escopo e finalidade pertencem a um domínio distinto da investigação aqui proposta.

O simulador desenvolvido, denominado URA Simulador, encontra-se disponível em repositório institucional no GitCIN (URA-Simulador), contendo o código-fonte e a documentação técnica completa.

3.7 AMBIENTE EXPERIMENTAL



Figura 10 – Exemplo de configuração do experimento utilizada durante o estudo

O experimento foi conduzido no ambiente imersivo desenvolvido especificamente para esta pesquisa, utilizando o simulador descrito na Seção 3.6. Sendo assim, o ambiente experimental

foi composto por um espaço controlado e silencioso, preparado para reduzir distrações externas e promover o foco dos participantes na tarefa de direção. O participante permanecia sentado em uma posição ergonômica ajustada de acordo com sua altura, utilizando o headset *Meta Quest 3* e o conjunto de direção *Logitech G27*, como ilustrado na Figura 10. Essa configuração foi projetada para maximizar a sensação de presença e garantir validade ecológica, ou seja, a aproximação entre a experiência simulada e as condições reais de condução.

A simulação consistiu de dirigir um carro em primeira pessoa em uma rodovia (veja a Figura 9). Os cenários utilizados no experimento foram compostos por rotas rodoviárias que combinam trechos retos e curvas de diferentes complexidades (veja a Figura 11). Embora tenham sido utilizados apenas dois mapas distintos, foram definidos quatro trajetos experimentais, variando o ponto de partida e permitindo a inversão do sentido do percurso em cada mapa, o que amplia a variedade de situações experimentais sem introduzir novos elementos visuais.

Mapa 01



Mapa 02

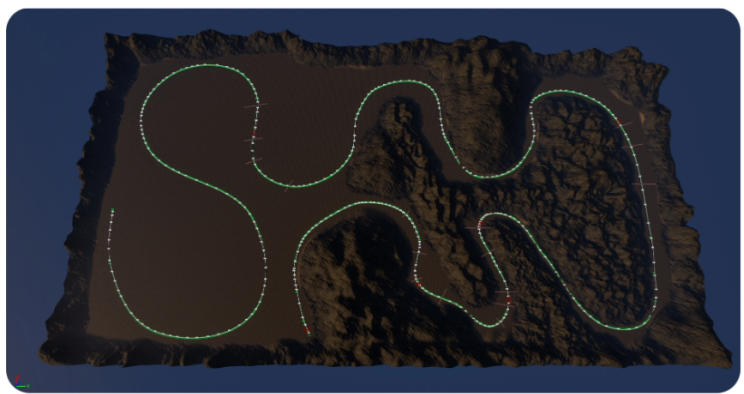


Figura 11 – Representação *top-view* dos mapas desenvolvidos no simulador

Os eventos críticos foram posicionados de forma a representar situações plausíveis e desafiadoras de risco, como a aparição de animais em curvas fechadas, lombadas em áreas de sombra com baixa visibilidade e buracos distribuídos ao longo de trechos retos. Cada cenário foi projetado para testar o impacto no tempo de reação e no comportamento dos participantes.

A coleta de dados foi realizada automaticamente pelo simulador, registrando variáveis de desempenho e comportamento durante toda a sessão. Entre os dados coletados estão: o grupo experimental ao qual o participante foi designado, o tipo de perigo presente na via, a localização e rotação do veículo, o valor da intensidade no uso do pedal de freio e a aceleração do veículo (ambos variando entre 0 e 1), a velocidade do veículo, o estado do

piloto automático (ativado ou desativado), o momento exato em que o participante desativou o piloto automático, o horário dos eventos, o número de colisões, a angulação do volante e a distância até o próximo perigo na pista. Todos os dados foram coletados de forma anônima, sem vinculação a informações pessoais dos participantes, assegurando sua privacidade conforme os princípios éticos da pesquisa.

3.8 CONSIDERAÇÕES ÉTICAS

Este estudo foi previamente aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa da instituição, sob o Certificado de Apresentação para Apreciação Ética (CAAE) 76678123.8.0000.5208. Todos os procedimentos seguiram as diretrizes éticas estabelecidas para pesquisas com seres humanos, conforme a Resolução nº 510/2016 do Conselho Nacional de Saúde.

Antes da participação no experimento, cada voluntário foi informado sobre os objetivos da pesquisa, os procedimentos envolvidos, os possíveis riscos e benefícios, bem como seus direitos enquanto participante. Em seguida, foi solicitado que assinassem o TCLE, documento no qual é garantido o direito de recusa ou desistência a qualquer momento, sem qualquer ônus ou justificativa.

Adicionalmente, foi obtida uma carta de anuência da instituição responsável pelo espaço físico e equipamentos utilizados na realização do estudo. Foi assinado um termo de confidencialidade, assegurando o sigilo das informações coletadas e a privacidade dos voluntários.

Todos os dados foram armazenados de forma segura e anonimizada, sendo utilizados exclusivamente para fins científicos. Nenhuma informação de identificação pessoal foi divulgada em qualquer etapa da pesquisa, respeitando os princípios de confidencialidade, autonomia e integridade dos participantes.

3.9 ANÁLISE DOS DADOS

A análise dos dados foi organizada para que os efeitos das diferentes condições experimentais pudessem ser interpretados de forma clara. Para isso, foram utilizadas estimativas pontuais acompanhadas de intervalos de confiança, apresentados visualmente em gráficos. Essa estratégia, inspirada no conceito de *Inference by Eye* (CUMMING; FINCH, 2005) e em recomendações sobre *Modern Statistical Methods for HCI* (DRAGICEVIC, 2016), privilegia a interpretação das tendências dos dados e da amplitude das incertezas representadas pelos intervalos.

Vale ressaltar que esses intervalos estão diretamente relacionados aos valores de p , de modo que um valor fora do intervalo corresponde a $p < 0.05$. A escolha por enfatizar intervalos de confiança, em vez de apresentar apenas testes de significância, visou evitar uma decisão binária e comunicar de maneira mais informativa tanto a direção quanto a precisão dos efeitos observados.

Todas as variáveis foram mantidas em sua forma original ao longo da análise, sem a aplicação de transformações matemáticas. Essa decisão visou preservar a integridade dos dados, garantindo que os resultados representassem fielmente as respostas dos participantes diante das condições propostas pelo experimento.

Para assegurar a consistência da base de dados, alguns critérios de exclusão foram adotados. Nos casos em que o participante não desativou o piloto automático diante de um perigo na via, os dados referentes àquele evento específico não foram considerados no cálculo do tempo de reação nem na análise de comportamento de direção, uma vez que não houve retomada de controle do veículo. Esse episódio foi tratado como colisão automática, uma vez que o veículo inevitavelmente colidia com o obstáculo na ausência de intervenção humana.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os principais resultados obtidos no experimento, organizados de acordo com as duas perguntas de pesquisa. Primeiramente, são analisados os tempos de reação dos participantes diante dos perigos na via. Em seguida, investigamos o comportamento de direção após a retomada do controle, bem como a ocorrência de colisões. Por fim, sintetizamos os comentários dos participantes sobre como as visualizações influenciaram suas decisões de condução. Os resultados são organizados respeitando o design experimental adotado: nas análises da QP1, os mesmos participantes foram expostos a condições com e sem visualização (within-subjects), enquanto na QP2, participantes diferentes foram comparados de acordo com o tipo de visualização recebida (between-subjects).

4.1 TEMPO DE REAÇÃO

Esta seção apresenta os resultados relacionados ao tempo de reação dos participantes ao retomarem o controle do veículo. Esta foi a principal métrica adotada para investigar o impacto das visualizações na segurança da condução. O tempo de reação foi definido como o intervalo entre o momento em que o perigo se tornou visível ou foi exibido na visualização (t_p) e o instante em que o condutor desativou o piloto automático (t_r), conforme descrito na Seção 3.1.

4.1.1 Impacto da visualização na retomada do controle do veículo

A Figura 12 apresenta os resultados relacionados à primeira questão de pesquisa (QP1), que comparou os tempos de reação para retomar o controle do veículo entre as condições *Com Visualização* e *Sem Visualização*. O objetivo desta análise é investigar se o uso de visualizações—sejam elas referentes a informações visíveis ou ocultas ao condutor—influencia a segurança da condução diante da presença de perigos na via.

Nossos resultados apontam que ter uma visualização qualquer parece ter efeitos semelhantes a não ter visualizações sendo exibidas no para-brisas. Na condição *Com Visualização*, o tempo médio de reação foi de 3,53 segundos [IC 95%: 2,52 – 4,54]. Já na condição *Sem Visualização*, a média foi de 3,78 segundos [IC 95%: 2,47 – 5,09]. Isto significa que, em média,

os participantes de ambas as condições levaram cerca de 3,5 segundos para visualizarem um perigo na pista e tomarem o controle do volante. Por conta desta pequena diferença entre a média do tempo de reação nas duas condições (ilustrado na Figura 12-c), não conseguimos encontrar evidências que apontem a presença de visualizações no para-brisa do veículo como um fator que impacte o tempo de reação dos condutores ao se depararem com perigos na pista.

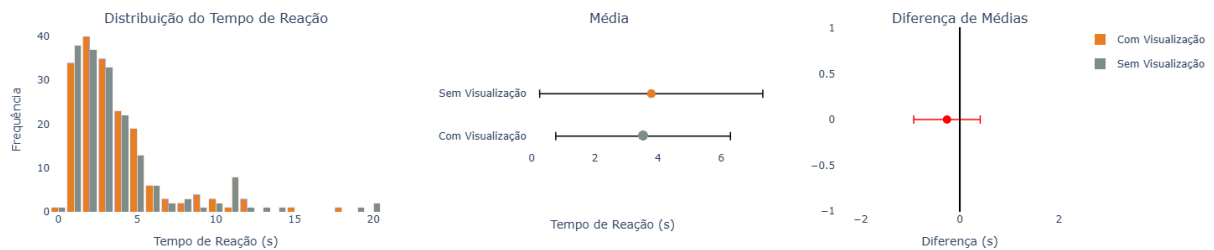


Figura 12 – Resultados relativos ao tempo de reação para retomada do controle do veículo (QP1). **(a)** Distribuição dos tempos de reação nas condições *Com Visualização* e *Sem Visualização*; **(b)** Comparação das médias de tempo de reação com seus respectivos intervalos de confiança de 95% para ambas as condições; **(c)** Diferença média entre as duas condições (*Com* e *Sem Visualização*), com intervalo de confiança de 95%, indicando ausência de efeito significativo.

4.1.2 Impacto da visualização de perigos ainda não visíveis na retomada de controle

A Figura 13 apresenta os resultados referentes à segunda questão de pesquisa (QP2), que examinou o impacto do tipo de visualização exibida no para-brisa, sendo ela *Regular*—com dados já visíveis—ou *Aprimorada*—com dados inicialmente ocultos—afeta a resposta do condutor diante de um risco na via. Na condição *Visualização Aprimorada*, o tempo médio de reação foi de 4,30 segundos [IC 95%: 3,12 – 5,48]. Já na condição *Visualização Regular*, a média foi de 2,87 segundos [IC 95%: 2,05 – 3,69].

Isso indica que, em média, os participantes expostos à condição *Visualização Aprimorada* levaram mais tempo para retomar o controle do volante em comparação àqueles na condição *Visualização Regular*. A diferença aproximada de 1 segundo e meio (como ilustrado na Figura 13-c) pode sugerir que os condutores que viram a visualização aprimorada conseguiram ter mais tempo para reagirem aos perigos na via.

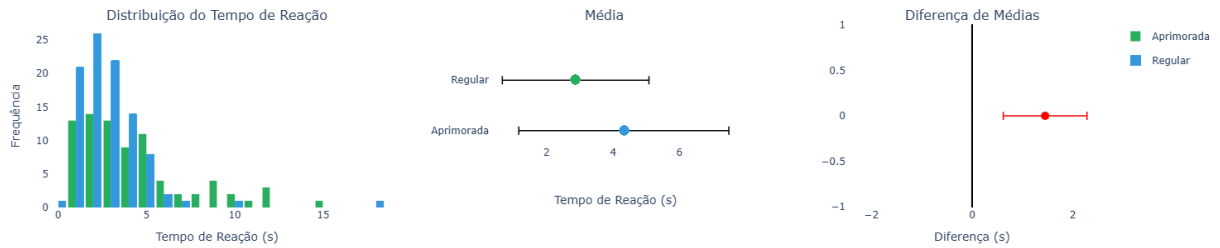


Figura 13 – Tempo de reação para retomada do controle do veículo (QP2). **(a)** Distribuição por tipo de visualização (*Regular* e *Aprimorada*); **(b)** Médias com intervalos de confiança de 95%; **(c)** Diferença entre médias (*Aprimorada* – *Regular*), indicando maior tempo de reação na condição aprimorada.

4.2 COMPORTAMENTO DE DIREÇÃO

O comportamento de direção foi analisado como uma variável dependente secundária, com o objetivo de complementar os resultados relacionados ao tempo de reação. A análise abrange o intervalo compreendido entre o momento em que o participante desativou o piloto automático (t_r) e o instante em que o veículo ultrapassou completamente o obstáculo na via (t_u). Nesse período, foram avaliadas quatro métricas: nível de aceleração, velocidade do veículo, intensidade de frenagem e variação no ângulo do volante, com o intuito de capturar padrões na condução adotada após a detecção do perigo.

Essa abordagem busca oferecer uma visão geral do comportamento do condutor ao retomar o controle do veículo diante de um perigo. Para isso, foi calculado o intervalo interquartil (IQR) de cada métrica ao longo dos perigos apresentados em cada sessão, conforme descrito na Seção 3.1, permitindo capturar a variabilidade nas ações do condutor.

4.2.1 Efeitos da Visualização no Comportamento de Direção

Investigamos se a presença de visualizações situadas no para-brisa influencia o comportamento de direção dos participantes. Os resultados são ilustrados na Figura 14, que compara as condições *Com Visualização* e *Sem Visualização*.

De modo geral, a presença da visualização não parece ter alterado significativamente a forma como os participantes conduziram o veículo após a detecção do perigo. As diferenças observadas entre os grupos foram pequenas, com sobreposição considerável entre os intervalos de confiança, o que sugere um padrão de direção semelhante nas duas condições. A velocidade do veículo variou entre 34,88 [IC 95%: 28,92 – 40,83] com visualização, e 34,06 [IC 95%: 28,54

– 39,58] sem visualização. Quanto à aceleração, observou-se uma média de (0,1783 [IC 95%: 0,1323 – 0,2244]) com o uso da visualização em comparação a (0,1940 [IC 95%: 0,1620 – 0,2260]) no grupo controle. Em relação à intensidade de frenagem, os participantes no grupo com visualização apresentaram valores de (0,0922 [IC 95%: 0,0574 – 0,1271]) no grupo com visualização contra (0,0785 [IC 95%: 0,0470 – 0,1100]) dos que não viram visualização. Por fim, a variabilidade da direção foi estatisticamente equivalente entre as condições, com médias de 0,1023 [IC 95%: 0,0738 – 0,1307] e 0,1052 [IC 95%: 0,0828 – 0,1275] para os grupos com e sem visualização, respectivamente.

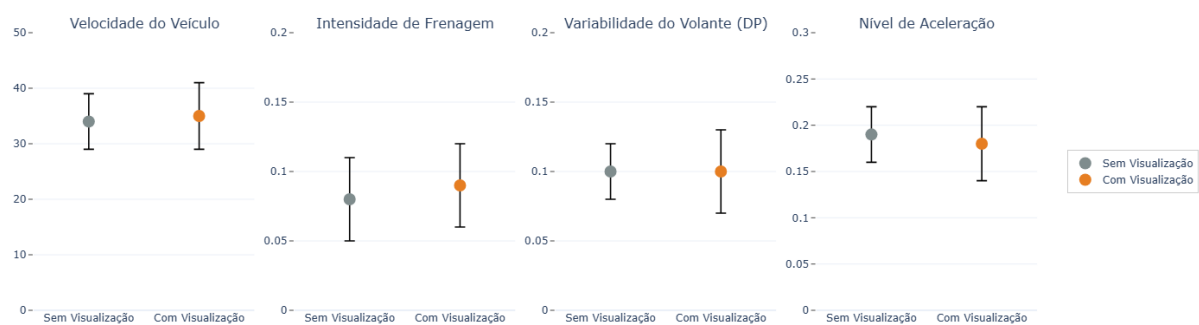


Figura 14 – Comportamento de direção após detecção do perigo (QP1). Médias dos intervalos interquartis (IQR) com intervalos de confiança de 95%, comparando as condições *Com Visualização* e *Sem Visualização* para: (a) velocidade, (b) intensidade de frenagem, (c) variabilidade do volante e (d) nível de aceleração.

4.2.2 Efeitos do Tipo de Visualização na Direção

A Figura 15 apresenta os resultados sobre a diferença de condução dos participantes que viram as visualizações *Aprimorada* e *Regular*.

De uma maneira geral, observou-se que a velocidade, aceleração e manobras com o volante foram semelhantes entre as condições, mas existe uma pequena evidência que os motoristas que visualizaram perigos ocultos com antecipação tiveram uma variabilidade maior em suas frenagens. Para a velocidade, a média dos IQRs foi de 20,40 [IC 95%: 13,50 – 27,31] na condição aprimorada e de 19,36 [IC 95%: 11,31 – 27,41] na condição regular. Para a aceleração, a condição aprimorada apresentou um IQR médio de 0,1067 [IC 95%: 0,0713 – 0,1422], frente a 0,1297 [IC 95%: 0,0776 – 0,1818] na condição regular. Já na intensidade de frenagem, os participantes na condição aprimorada apresentaram um IQR médio de 0,1046 [IC 95%: 0,0690 – 0,1401], enquanto na condição regular o valor foi de 0,0542 [IC 95%: 0,0266 – 0,0817].

Por fim, a variabilidade da direção foi de 0,0649 [IC 95%: 0,0424 – 0,0874] na condição aprimorada em relação a 0,0779 [IC 95%: 0,0455 – 0,1103] na condição regular. Embora o resultado da frenagem dos participantes que viram os perigos com antecipação indique uma maior variabilidade na frenagem, esta diferença precisa ser considerada com cautela.

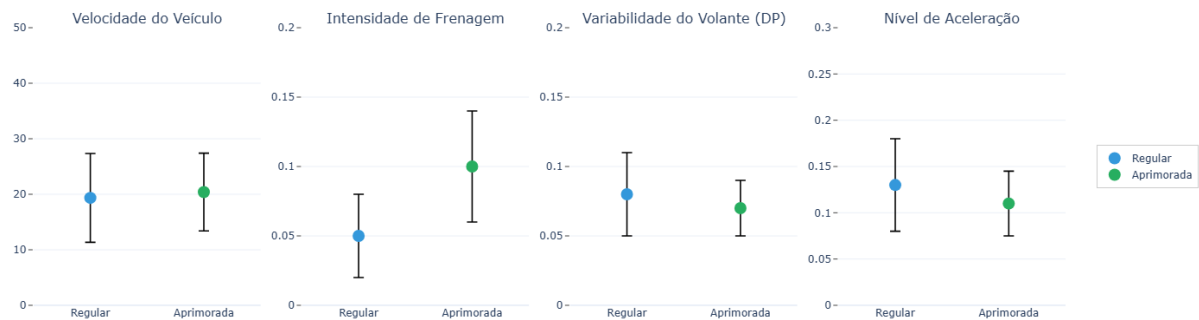


Figura 15 – Comportamento de direção em função do tipo de visualização (QP2). Médias dos intervalos interquartis (IQR) com intervalos de confiança de 95%, comparando as condições *Visualização Aprimorada* e *Visualização Regular* para: **(a)** velocidade, **(b)** intensidade de frenagem, **(c)** variabilidade do volante e **(d)** nível de aceleração.

4.3 ANÁLISE COMPLEMENTAR

Além das métricas principais previamente definidas, foi realizada uma análise complementar baseada na proporção de colisões registradas em cada condição experimental. Embora essa métrica não tenha sido prevista no planejamento inicial do experimento, sua inclusão surgiu após a coleta dos dados como uma forma de investigar, de maneira mais direta e objetiva, possíveis efeitos das visualizações situadas sobre a segurança da condução. Enquanto as medidas anteriores capturam aspectos mais sutis do desempenho do condutor, como o tempo para iniciar uma ação ou a variabilidade nos controles do veículo, a ocorrência de colisões representa um desfecho de relevância na prática. Assim, essa métrica oferece um complemento às análises anteriores, permitindo verificar se as visualizações foram capazes de evitar falhas críticas no processo de direção.

4.3.1 Colisões sob Diferentes Condições de Visualização

A Figura 16 compara a quantidade de colisões entre as condições *Com Visualização* e *Sem Visualização*. As taxas de colisão descritas consideram o número de eventos perigosos

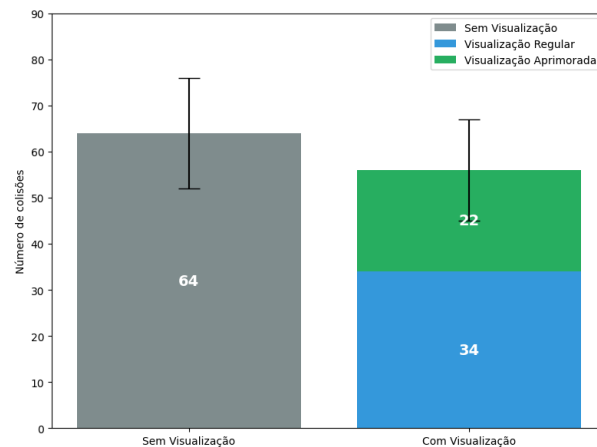


Figura 16 – Proporção de colisões para a QP1: Com Visualização vs. Sem Visualização.

apresentados em cada uma das condições. Na condição com visualização, foram registradas 56 colisões, correspondendo a 31,8% dos perigos apresentados [IC 95%: 24,9 – 38,7]. Já na condição sem visualização, ocorreram 64 colisões, o equivalente a 37,2% dos perigos [IC 95%: 29,9 – 44,4]. A proximidade entre as proporções e a sobreposição dos intervalos de confiança indicam que a presença da visualização, por si só, não exerceu efeito estatisticamente significativo sobre a frequência de colisões.

4.3.2 Colisões sob Diferentes Níveis de Detalhamento Visual

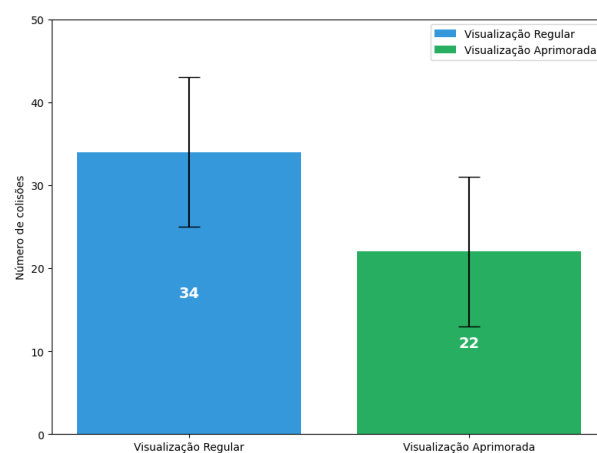


Figura 17 – Proporção de colisões para a QP2: Aprimorada vs. Regular.

A Figura 17 compara as colisões que aconteceram entre as condições de *Visualização Aprimorada* e *Visualização Regular*, ambas no contexto em que há suporte visual ao condutor. As taxas de colisão foram calculadas com base no número de perigos apresentados em cada con-

dição experimental. Na condição com visualização aprimorada, foram registradas 22 colisões, o que corresponde a 24,44% dos perigos apresentados [IC 95%: 15,56 – 33,32]. Já na condição com visualização regular, ocorreram 34 colisões, representando 35,05% dos perigos [IC 95%: 25,55 – 44,54]. Embora os intervalos de confiança se sobreponham, observa-se uma diferença percentual considerável entre as condições, sugerindo uma pequena evidência que a visualização aprimorada pode ter contribuído para reduzir a frequência de colisões, possivelmente ao oferecer informações mais claras ou antecipadas sobre os perigos.

4.4 FEEDBACK DOS PARTICIPANTES

Além das medidas quantitativas, foi aplicado um breve questionário ao final de cada sessão para captar a percepção dos participantes sobre as visualizações no para-brisa e sobre o nível de conforto durante o experimento. Esta seção resume os principais pontos levantados.

4.4.1 Fatores que Motivariam a Retomada do Controle

As respostas dos participantes indicam que a decisão de assumir o controle do veículo, desativando o piloto automático, foi motivada principalmente pela percepção de risco iminente na pista. Entre os motivos mais recorrentes estavam a presença de animais, buracos profundos e lombadas mal sinalizadas. Um participante relatou: *“vi algum obstáculo na pista se aproximando”*, enquanto outro destacou: *“ao avistar animais e buracos na pista, eu precisava desviar”*, evidenciando a percepção dos obstáculos.

Em diversos relatos, a visualização projetada no para-brisa também foi mencionada como fator de apoio à tomada de decisão. Participantes indicaram que o alerta visual contribuiu para antecipar riscos ou reforçar a percepção de perigo, *“se não tivesse os avisos, o resultado seria outro”*. Por outro lado, também surgiram relatos de confusão na interpretação de certos elementos, como a falta de entendimento da visualização em certos contextos, *“não entendendo o que eram os sinais amarelos no para-brisa”*, sugerindo limitações na clareza semântica de alguns ícones ou cores utilizados.

Alguns casos também foram observados, como no caso: *“ao perder a visibilidade por ofuscamento, da luz do sol, algumas vezes, eu me adiantava ao fato de precisar frear”*, ou até situações de ambiguidade visuais também foram mencionadas *“as sombras me confundiram e achei que era perigoso”*, o que evidencia que alguns fatores ambientais do simulador influen-

ciaram o julgamento de risco, criando um alerta no participante em situações que não existia perigo.

De modo geral, os relatos revelam que a retomada do controle foi uma resposta multifatorial, guiada por uma combinação de percepção visual (com ou sem suporte da visualização), interpretação dos sinais do sistema, antecipação e estados subjetivos do ambiente do simulador. Essa diversidade de motivos reforça a complexidade da interação entre condutor e sistema, e destaca a importância de projetar visualizações que sejam claras, confiáveis e úteis mesmo em condições de visibilidade reduzida ou atenção dividida.

4.4.2 Comportamento de Condução após a Retomada do Controle

Após retomar o controle do veículo, os participantes adotaram estratégias diversas para lidar com os perigos identificados na pista. A alguns afirmaram que sua primeira reação foi reduzir a velocidade, buscando ganhar tempo para entender a situação. Como exemplificado por um dos participantes, “eu sempre buscava frear para não colidir com o obstáculo”. Essa atitude geralmente vinha acompanhada de um esforço para identificar a melhor rota de fuga: “reduzi a velocidade e tentei achar a melhor rota de fuga para a situação de risco”. Muitos também relataram a tentativa de desviar lateralmente, principalmente quando o obstáculo parecia exigir uma mudança de trajetória. “Desviei sempre que avistado, preferencialmente para o lado esquerdo”, comentou um dos voluntários. Outro mencionou que, após algumas tentativas, percebeu que nem sempre era necessário frear bruscamente: “logo descobri que nem precisava frear na maioria, bastava fazer esse desvio”. Alguns participantes destacaram que a presença de informações visuais no para-brisa ajudava a manter a calma durante a condução: “quando havia informação no para-brisa, eu me comportava de forma mais calma para evitar colisão”. Por outro lado, em situações sem visualização, alguns participantes comentaram que suas resposta e suas ações se tornavam mais impulsivas: “sem a informação, eu demorava a perceber que havia objetos de colisão, assim era mais difícil de desviar”.

Também foram relatadas dificuldades com os equipamentos por parte dos participantes, principalmente nas primeiras tentativas de assumir o volante. “Confundi algumas vezes o freio e o acelerador, porque os pedais estavam se deslocando um pouco e são próximos”, relatou um dos participantes. Outro comentou que “me assustei e tentei desligar o piloto automático e tomar o controle, e na maioria das vezes eu falhei”. Em alguns casos, a tensão era tanta que levava a reações exageradas, “sentia que se não apertasse com intensidade eu não ia ter êxito”.

As dificuldades não estavam apenas relacionadas à execução da ação com os equipamentos, mas também à interpretação da cena em alguns casos. Um dos voluntários disse que “às vezes eu não conseguia entender mais ou menos aonde os objetos realmente estavam. Os animais tinham posições confusas”. Em casos mais extremos, participantes relataram que a visualização no para-brisa chegou a atrapalhar: “jogava o carro para fora da pista para não colidir, pois não via se dava para passar na pista, a visualização atrapalhava a visão”.

Esses relatos ajudam a compreender como os participantes raciocinava durante o experimento, revelando não apenas aspectos de desempenho técnico, mas também fatores emocionais e cognitivos que influenciaram a condução em cenários de risco. Tanto quanto o tempo de aprendizagem da visualização, tendo uma difícil interpretação durante a fase inicial da simulação.

4.4.3 Influência das Visualizações nas Decisões de Condução

Os participantes relataram que as informações exibidas no para-brisa impactaram suas decisões de condução, principalmente a clareza dos avisos foram apontadas como fatores fundamentais para reagir. Muitos afirmaram que a visualização os ajudou a focar melhor na via e a se preparar para ações futuras: “*ficava mais alerta quando via a sinalização, e podia saber melhor **quando** tomar o controle do veículo*”, comentou um dos voluntários. Alguns relataram que a sinalização visual permitia desacelerar com antecedência e planejar desvios de maneira mais calma, o que era difícil nas situações em que a percepção do obstáculo era tardia, ou sem visualização. Como destacou um participante: “*me ajudou a ter preparo, já sabia que algo existia e que poderia colidir com o veículo*”. Outro reforçou o papel da visualização como fator de reorientação da atenção: “*muitas vezes eu perdia o foco, mas essas informações me faziam voltar a atenção para o que poderia acontecer à minha frente*”.

Apesar dos comentários majoritariamente positivos, algumas limitações foram levantadas. Houve relatos de confusão quanto ao significado do alerta amarelo, principalmente em relação a obstáculos como lombadas e buracos. Um participante observou que “*o reconhecimento de lombada pode confundir com um buraco*”, sugerindo o uso de diferentes cores para distinguir melhor os tipos de perigos. Outros apontaram que a visualização situada em certos casos obscurecia o próprio objeto físico que deveria ser evitado, especialmente buracos. A ausência de aviso sonoro também foi mencionada como um elemento que poderia melhorar a percepção do risco.

Esses relatos evidenciam que a visualização influenciou as decisões dos participantes, especialmente quando bem compreendida, ressaltando a necessidade de aprendizagem da visualização. No entanto, também apontam caminhos importantes para o aprimoramento da comunicação visual de perigos na via.

5 DISCUSSÕES

Este capítulo discute os principais resultados obtidos no experimento, buscando interpretá-los à luz das hipóteses formuladas e do referencial teórico. O foco está em compreender como diferentes abordagens de visualização no para-brisa influenciaram a segurança e o comportamento de direção dos participantes.

De modo geral, não foram observadas diferenças significativas entre as condições com e sem visualização quando se considera o tempo médio de reação e o estilo de condução (QP1). No entanto, ao analisar separadamente os tipos de visualização, verificou-se que existem evidências que a versão aprimorada, exibida antes do perigo se tornar visível, proporcionou maior tempo de resposta e redução de colisões (QP2).

Esses achados indicam que o impacto da visualização está menos relacionado à sua simples presença e mais à sua capacidade de antecipar eventos críticos. A seguir, discutimos em detalhes essas evidências, bem como suas implicações para o design de interfaces veiculares e futuras pesquisas na área.

5.1 PRESENÇA DE VISUALIZAÇÕES VS. AUSÊNCIA

A primeira questão de pesquisa investigou se a presença de uma visualização no para-brisa do veículo, independentemente de seu tipo, poderia influenciar a capacidade do condutor de reagir a perigos na via de forma mais segura. Os resultados mostraram que, na comparação direta entre as condições com e sem visualização, não houve diferença significativa no tempo de reação, no comportamento de direção ou na proporção de colisões.

Esse fenômeno pode ser interpretado como uma forma de diluição estatística, em que possíveis benefícios da visualização aprimorada são neutralizados por uma menor eficácia da visualização regular. Essa interpretação é consistente com o argumento de TÖNNIS; KLINKER; PLAVŠIC, que adverte que múltiplas influências simultâneas complicam a análise e podem ocultar efeitos específicos, sendo necessário isolar cuidadosamente cada dimensão experimental. Estudos como os de EYRAUD; ZIBETTI; BACCINO e OMEIZA et al. também mostram que o excesso de informação ou a generalização de destaques pode amenizar a eficácia perceptiva e dificultar a identificação de efeitos subjetivos claros. Assim, ao agrupar condições distintas sob um mesmo rótulo analítico, corre-se o risco de mascarar efeitos relevantes associados a cada

uma delas isoladamente.

Além disso, o tipo de visualização regular, por surgir tardiamente no ciclo perceptivo, pode não oferecer uma antecipação útil ao condutor. Em cenários de velocidade elevada e baixa visibilidade, como os simulados neste estudo, o tempo disponível para resposta após a visualização pode ser insuficiente para modificar de maneira significativa a decisão do motorista. Evidências mostram que, em situações que exigem uma reação longitudinal rápida, como uma frenagem súbita em interseções, interfaces de Realidade Aumentada no para-brisa podem, ao contrário do que se imagina, aumentar o tempo de reação do condutor, possivelmente por exigirem mais tempo de interpretação antes da execução da ação (LINDEMANN; MÜLLER; RIGOLL, 2019), principalmente quando existem agrupamentos de condições com visualização tão distintas.

Do ponto de vista metodológico, a decisão de agrupar as condições com visualização foi tomada para aumentar o poder estatístico da análise. No entanto, esse ganho técnico impôs uma limitação interpretativa, uma vez que os efeitos de duas estratégias visualmente distintas passaram a ser avaliados em conjunto. Essa escolha metodológica, ainda que justificada, se mostrou um fator importante para discussão, sugerindo que futuras investigações devam considerar a separação desses tipos de visualização desde o design experimental. Estudos anteriores já destacaram esse dilema: ao comparar diferentes interfaces visuais, como RA e HUD, (COLLEY et al., 2021b) observaram que, apesar de os participantes demonstrarem preferência subjetiva por certas abordagens, as métricas utilizadas não foram sensíveis o suficiente para distinguir seus efeitos. Isso levou a resultados estatisticamente semelhantes entre conceitos distintos, dificultando interpretações mais granulares e reduzindo o valor explicativo dos achados.

Em síntese, os achados da QP1 indicam que a simples presença de uma visualização no para-brisa não garante, por si só, melhorias na segurança da condução. O impacto parece depender diretamente do momento em que a informação é apresentada e da capacidade da visualização de antecipar eventos críticos. Essa distinção será aprofundada na próxima seção, dedicada à análise comparativa entre visualizações regulares e aprimoradas.

5.2 EFEITOS DA ANTECIPAÇÃO DE PERIGOS NÃO VISÍVEIS

A segunda questão de pesquisa buscou avaliar o impacto da visualização aprimorada, projetada para antecipar perigos ainda não visíveis, em comparação com a visualização regular, que apenas destaca elementos já perceptíveis ao condutor. Os resultados revelaram diferenças

entre essas abordagens, indicando que o tipo de visualização tem influência direta sobre a forma como os participantes reagem e conduzem diante de situações de risco.

Inicialmente, observou-se que os participantes na condição de visualização aprimorada apresentaram, em média, um tempo de reação para retomar o controle do veículo maior do que aqueles expostos à visualização regular. Esse tempo adicional pode refletir o fato de que a visualização foi apresentada mais cedo no ciclo de percepção, oferecendo uma janela de tempo ampliada para análise e planejamento da resposta. Evidências mostram que, com mais tempo disponível, condutores tendem a tomar decisões mais racionais e alinhadas com seus objetivos percebidos, enquanto intervalos curtos favorecem respostas intuitivas ou conservadoras que nem sempre correspondem à melhor escolha possível (ZHANG et al., 2025).

Essa interpretação é reforçada pelas diferenças no comportamento de condução. Embora não tenha havido variações expressivas em direção, velocidade ou aceleração, participantes da condição aprimorada tiveram uma variação maior de frenagem e apresentaram menos colisões. Isso indica que a antecipação visual permitiu a detecção precoce dos perigos, ampliando a janela entre percepção e ação. Tal antecipação favorece o engajamento do condutor no terceiro nível da consciência situacional, projeção, que refere-se à capacidade de prever estados futuros do ambiente (ENDSLEY, 1995). Nesse nível, o condutor não apenas percebe e compreende o cenário atual, mas também consegue antecipar seus desdobramentos com maior precisão, o que possibilita respostas mais planejadas e menos impulsivas. Isso resultou em uma condução mais segura e se alinha a evidências de que janelas cognitivas mais amplas favorecem decisões mais racionais e adaptadas ao contexto (ZHANG et al., 2025).

Por outro lado, os relatos qualitativos também apontaram efeitos colaterais relevantes. Em alguns casos, os participantes relataram ter aguardado até que o perigo se tornasse visível para então tomar uma decisão, mesmo já tendo recebido a sinalização visual antecipada, um caso que ressalta o aumento no tempo de reação para retomar o controle do veículo. Esse comportamento pode sugerir um indício de complacência automatizada, em que o condutor confia excessivamente na tecnologia e posterga sua reação até receber uma confirmação visual direta da ameaça. Por exemplo, uma das falas indicava: *"Eu vi o alerta, mas esperei aparecer algo na pista antes de fazer qualquer coisa"*. Esse tipo de resposta pode ser interpretado como um deslocamento da vigilância ativa para uma postura de espera mediada pela interface. A literatura descreve esse fenômeno como um possível efeito do *cognitive tunneling* ou do *Look But Fail To See*, em que o condutor percebe a informação visual, mas não a integra imediatamente ao processo decisório (GOODGE; POLLICK; BREWSTER, 2024). Embora a visualização

não tenha comprometido a percepção global da cena, ela alterou a dinâmica da condução ao interromper o fluxo natural da tarefa, indicando a necessidade de atenção cuidadosa ao design de alertas visuais em sistemas de antecipação.

Tal fenômeno evidencia um paradoxo: embora a antecipação amplie a capacidade de resposta, ela também pode reduzir o senso de urgência caso não seja acompanhada de mecanismos que reforcem a necessidade de vigilância contínua. Esse efeito tem sido descrito na literatura como uma consequência do excesso de confiança em sistemas automatizados, que pode levar à complacência, desatenção e monitoramento insuficiente (COLLEY et al., 2021a). Embora os dados indiquem uma melhoria geral na resposta dos condutores, alguns relatos qualitativos sugerem que o tempo adicional fornecido pela visualização antecipada pode ter sido interpretado como uma margem confortável, levando certos participantes a postergar sua ação até a confirmação visual do perigo, um comportamento que, em cenários de falha na localização do perigo, pode se tornar crítico. Esse tipo de comportamento reforça a importância de projetar interfaces que não apenas comuniquem antecipação, mas também reforcem a necessidade de vigilância contínua do condutor, mantendo ativo o senso de urgência.

Por fim, os achados desta seção dialogam diretamente com o conceito de *Empowerment* em visualizações situadas, ao evidenciar que fornecer informações sobre eventos ainda não visíveis pode ampliar a percepção e a capacidade de ação do usuário no ambiente físico, comentado na Seção 2.2. No entanto, tais benefícios exigem um equilíbrio delicado entre antecipação, clareza semântica e estímulos de alerta que mantenham o condutor engajado na tarefa de condução.

5.3 LIÇÕES APRENDIDAS E LIMITAÇÕES

Durante a condução deste estudo, foram identificadas diversas lições que contribuem para o amadurecimento do campo, bem como limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados e no planejamento de pesquisas futuras.

Um dos aspectos observados foi o impacto da forma visual dos elementos representados na interface. Embora a visualização antecipada tenha se mostrado eficaz em muitos cenários, o uso de áreas luminosas (ou auréolas) ao redor dos objetos apresentou efeitos ambíguos. Em particular, quando o condutor se aproximava do obstáculo, essas marcações se tornavam visualmente intrusivas, dificultando a visualização do ambiente ou do perigo na via. Isso indica a necessidade de um refinamento no design visual, sobretudo em termos de adaptação à

distância e ao contexto de uso. Quando a distancia do perigo estava alta, as aréolas eram interessantes para abordar espacialmente a localização do possível perigo na pista, porem, ao se aproximar, essas áreas luminosas estavam atrapalhando, criando confusões cognitivas ao condutor.

A composição da amostra também representa uma limitação importante. A maioria dos participantes era jovem e com grau de familiaridade com tecnologia, o que possivelmente facilitou a compreensão do ambiente simulado e a adaptação à interface de visualização. Esse perfil homogêneo tende a reduzir a variabilidade comportamental observada e limita a generalização dos resultados para populações com outras características, como condutores mais idosos ou com baixa exposição a sistemas digitais. Essa limitação é recorrente na literatura da área veicular, conforme destacado por KETTLE; LEE, que aponta a predominância de amostras compostas por adultos jovens, em sua maioria homens, nos estudos sobre realidade aumentada aplicada à condução.

Vale destacar também a limitação metodológica relacionada à padronização da distância em que a visualização era exibida ao condutor. Embora essa escolha tenha assegurado consistência experimental, ela impediu a análise do impacto que diferentes distâncias podem ter sobre a percepção, o tempo de reação e a tomada de decisão. Estudos futuros poderiam investigar como a variação no momento da exibição, especialmente em função da velocidade do veículo, do tipo de perigo e do contexto viário, influencia a eficácia da visualização. Compreender esse ajuste dinâmico pode ser fundamental para desenvolver sistemas mais adaptativos e responsivos às demandas da condução real.

Outro aspecto que merece atenção diz respeito às estratégias de design gráfico adotadas para representar perigos não visíveis. Este estudo testou uma proposta específica de codificação visual, com base em princípios situados e no uso de elementos posicionais e simbólicos para antecipar a presença de perigos não visíveis. Embora os resultados tenham indicado efeitos positivos sobre a percepção e a tomada de decisão, ainda há poucas diretrizes consolidadas na literatura que orientem o design desse tipo de visualização. Isso reforça a necessidade de pesquisas comparativas que avaliem sistematicamente diferentes abordagens, como estilos de ícone, camadas de abstração, transparência ou animação, a fim de compreender quais soluções maximizam a clareza, a confiança e o engajamento do condutor em contextos diversos.

Por fim, o experimento foi conduzido em um ambiente simulado com controle rígido das variáveis de tráfego, o que não contempla a complexidade dinâmica de contextos reais, como rodovias com alto fluxo de veículos, áreas urbanas densas ou situações de tráfego imprevisível.

Nessas condições, múltiplos estímulos visuais e decisões concorrentes podem interferir na forma como a visualização é percebida, interpretada e incorporada à ação. Portanto, a aplicabilidade dos resultados deve ser interpretada com cautela, e investigações futuras devem considerar cenários mais complexos e realistas para avaliar a robustez e a eficácia das visualizações em contextos de alta demanda cognitiva e multitarefa.

5.4 IMPLICAÇÕES PARA O DESIGN DE VISUALIZAÇÕES

Os resultados obtidos neste estudo também fornecem diretrizes importantes para o design de sistemas de visualização em veículos semiautônomos. Ao integrar informações críticas ao campo visual do condutor por meio de WSDs, é essencial considerar não apenas o conteúdo da informação, mas também sua forma, tempo de apresentação e impacto cognitivo.

Em primeiro lugar, a semântica visual das representações deve ser cuidadosamente projetada para garantir compreensão imediata, inclusive por motoristas inexperientes ou com baixa familiaridade com ícones gráficos. A dificuldade relatada por alguns participantes em distinguir entre símbolos de buracos e lombadas indica que o uso de metáforas visuais inspiradas na sinalização de trânsito pode ser insuficiente se não forem combinadas com reforços textuais ou contextuais (SHINAR; VOGELZANG, 2013; DEWAR; PRONIN, 2023).

Outro aspecto crucial é o equilíbrio entre visibilidade e não obstrução. Em determinadas situações, os elementos gráficos posicionados diretamente sobre o perigo acabaram dificultando a percepção do próprio obstáculo físico. Isso reforça a necessidade de evitar sobreposição excessiva, considerar ajustes dinâmicos de opacidade ou transparência e manter a cena física sempre parcialmente acessível.

Por fim, a precisão e o sincronismo entre a visualização e o ambiente real são fatores fundamentais para a eficácia da interface. Pequenos erros de registro espacial ou atrasos na apresentação da informação podem comprometer a confiança do usuário ou até gerar interpretações equivocadas. Isso é especialmente relevante no caso de perigos não visíveis, cuja representação depende de dados oriundos de sensores externos ou redes V2X.

Essas implicações apontam para um caminho de desenvolvimento onde a visualização veicular não seja apenas uma camada gráfica adicional, mas um componente inteligente, interpretável e adaptado ao estado do usuário e ao contexto da direção. Projetar visualizações eficazes exige, portanto, uma abordagem centrada no ser humano, sensível às limitações cognitivas, perceptivas e situacionais do condutor.

6 CONCLUSÕES

O objetivo desta dissertação foi investigar como as **visualizações situadas podem ajudar os motoristas a perceber perigos que ainda não estão visíveis** enquanto dirigem. Essas visualizações são projetadas diretamente no para-brisa do veículo, conhecidas como Windshield Displays (WSD), e têm o potencial de melhorar a segurança ao antecipar situações arriscadas na estrada. Para testar essa ideia, criamos um ambiente virtual detalhado e realista, onde 30 participantes realizaram um experimento controlado, em que foram expostos a três tipos de condições: nenhuma visualização, visualização regular (alertas sobre perigos já visíveis na pista) e visualização aprimorada (alertas sobre perigos ainda ocultos).

Os resultados relacionados à QP1 mostraram que simplesmente incluir uma **visualização situada**, sem levar em conta detalhes específicos ou o momento exato em que o alerta é exibido, não melhorou significativamente o desempenho dos motoristas. A diferença no tempo de reação entre os participantes que tinham e não tinham acesso à visualização foi pequena e outras medidas como aceleração, velocidade, frenagem e comportamento ao dirigir também foram muito semelhantes. Isso sugere que colocar informações visuais genéricas na estrada não garante automaticamente melhorias na segurança. Uma explicação provável é o efeito de diluição estatística, resultado do agrupamento de visualizações diferentes em uma mesma categoria. Assim, ficou claro que o momento preciso em que a visualização aparece é fundamental para a eficácia desses sistemas.

Por outro lado, os resultados relacionados à QP2 mostraram diferenças promissoras. Quando a **visualização situada foi utilizada especificamente para alertar sobre perigos que ainda não estavam visíveis**, os participantes reagiram de maneira mais eficaz. Houve um aumento significativo no tempo médio de reação, variabilidade na frenagem e menos colisões. Esses resultados demonstram que antecipar visualmente os perigos pode ter dado mais tempo para os motoristas perceberem, interpretar e planejar suas ações, resultando em decisões mais seguras. Essa melhoria reflete o terceiro nível da consciência situacional descrito por Endsley (1995), que envolve prever eventos futuros com base nas informações atuais.

Além disso, as entrevistas e relatos qualitativos dos participantes apoiaram esses resultados. Muitos disseram que os alertas antecipados fizeram com que se sentissem mais preparados e tranquilos, permitindo melhores decisões durante as manobras. O tempo extra oferecido pelos alertas antecipados reduziu a ansiedade e aumentou a sensação de controle. Contudo, algumas

limitações foram observadas: certos participantes preferiram esperar até ver claramente os perigos na estrada antes de tomar qualquer ação, mesmo recebendo alertas antecipados. Esse comportamento pode indicar uma dependência excessiva da visualização no para-brisa, gerando uma pequena dependência, fenômeno conhecido como *cognitive tunneling* ou *Look But Fail To See* (GOODGE; POLLICK; BREWSTER, 2024).

Este estudo traz contribuições importantes para a área. Primeiro, existe evidência que as **visualizações situadas para antecipar perigos ainda não visíveis** podem ser mais eficientes que as visualizações tradicionais que apenas destacam o que já é visível na pista. Esse resultado sugere que futuras interfaces podem priorizar a antecipação de perigos para oferecer aos motoristas uma vantagem crítica de tempo. O estudo ressalta a importância do design visual das interfaces situadas, destacando que as informações devem ser claras, intuitivas e adaptadas à experiência e ao conhecimento prévio dos motoristas sobre símbolos e sinalização de trânsito, tanto quanto a distância da visualização em relação ao referente.

Apesar desses avanços, existem algumas limitações a considerar. Como a relação entre os participantes do estudo que eram majoritariamente adultos jovens com bastante familiaridade com tecnologia, o que limita a generalização dos resultados. Outro ponto a destacar é a padronização rígida das distâncias e da apresentação visual dos alertas, que impediu uma análise mais profunda de fatores como variação de opacidade, animação dos alertas ou ajustes dinâmicos de acordo com o contexto.

Para estudos futuros, sugerimos: (i) explorar ambientes urbanos mais complexos e realistas; (ii) incluir participantes mais diversificados, como motoristas idosos ou menos acostumados a tecnologias digitais; (iii) utilizar outras formas de alerta além da visual, como sons ou vibrações, para reforçar as mensagens; e (iv) investigar técnicas mais avançadas e preditivas, como transparências dinâmicas ou visualizações baseadas em inteligência artificial que prevejam comportamentos futuros.

Em resumo, esta pesquisa reforça o potencial das **visualizações situadas para mostrar perigos ainda não visíveis** como uma importante ferramenta para aumentar a segurança na condução automotiva. Mais do que simplesmente oferecer informação adicional, essas visualizações têm o potencial de melhorar a percepção dos motoristas, ajudando-os a antecipar e reagir aos riscos na estrada. Quando bem desenvolvidas, essas tecnologias podem transformar o para-brisa do veículo em uma interface dinâmica capaz de prever e prevenir situações perigosas, aumentando assim a segurança e o conforto dos motoristas.

REFERÊNCIAS

- ASHQAR, H. I.; OBAID, M.; JABER, A.; ASHQAR, R.; KHANFAR, N. O.; ELHENAWY, M. Incorporating driving behavior into vehicle fuel consumption prediction: methodology development and testing. *Discover Sustainability*, Springer, v. 5, n. 1, p. 344, 2024.
- ASSOR, A.; PROUZEAU, A.; HACHET, M.; DRAGICEVIC, P. Handling non-visible referents in situated visualizations. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, IEEE, v. 30, n. 1, p. 1336–1346, 2023.
- AYAS, S.; DONMEZ, B.; TANG, X. Drowsiness mitigation through driver state monitoring systems: a scoping review. *Human factors*, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, v. 66, n. 9, p. 2218–2243, 2024.
- BEUKEL, A. P. van den; VOORT, M. C. van der. How to assess driver's interaction with partially automated driving systems—a framework for early concept assessment. *Applied ergonomics*, Elsevier, v. 59, p. 302–312, 2017.
- BRESSA, N.; KORSGAARD, H.; TABARD, A.; HOUBEN, S.; VERMEULEN, J. What's the situation with situated visualization? a survey and perspectives on situatedness. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, IEEE, v. 28, n. 1, p. 107–117, 2021.
- CHENG, Y.-n.; ZHONG, X.; TIAN, L.-w. Does the ar-hud system affect driving behaviour? an eye-tracking experiment study. *Transportation research interdisciplinary perspectives*, Elsevier, v. 18, p. 100767, 2023.
- COLLEY, M.; BRÄUNER, C.; LANZER, M.; WALCH, M.; BAUMANN, M.; RUKZIO, E. Effect of visualization of pedestrian intention recognition on trust and cognitive load. In: *12th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 181–191.
- COLLEY, M.; EDER, B.; RIXEN, J. O.; RUKZIO, E. Effects of semantic segmentation visualization on trust, situation awareness, and cognitive load in highly automated vehicles. In: *Proceedings of the 2021 CHI conference on human factors in computing systems*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–11.
- COLLEY, M.; KRAUSS, S.; LANZER, M.; RUKZIO, E. How should automated vehicles communicate critical situations? a comparative analysis of visualization concepts. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, ACM New York, NY, USA, v. 5, n. 3, p. 1–23, 2021.
- COLLEY, M.; RÄDLER, M.; GLIMMANN, J.; RUKZIO, E. Effects of scene detection, scene prediction, and maneuver planning visualizations on trust, situation awareness, and cognitive load in highly automated vehicles. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, ACM New York, NY, USA, v. 6, n. 2, p. 1–21, 2022.
- CUMMING, G.; FINCH, S. Inference by eye: confidence intervals and how to read pictures of data. *American psychologist*, American Psychological Association, v. 60, n. 2, p. 170, 2005.
- CURRANO, R.; PARK, S. Y.; MOORE, D. J.; LYONS, K.; SIRKIN, D. Little road driving hud: Heads-up display complexity influences drivers' perceptions of automated vehicles. In: *Proceedings of the 2021 CHI conference on human factors in computing systems*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–15.

- DETJEN, H.; SALINI, M.; KRONENBERGER, J.; GEISLER, S.; SCHNEEGASS, S. Towards transparent behavior of automated vehicles: Design and evaluation of hud concepts to support system predictability through motion intent communication. In: *Proceedings of the 23rd International Conference on Mobile Human-Computer Interaction*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–12.
- DEWAR, R.; PRONIN, M. Designing road sign symbols. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, Elsevier, v. 94, p. 466–491, 2023.
- DOSOVITSKIY, A.; ROS, G.; CODEVILLA, F.; LOPEZ, A.; KOLTUN, V. CARLA: An open urban driving simulator. In: *Proceedings of the 1st Annual Conference on Robot Learning*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–16.
- DRAGICEVIC, P. Fair statistical communication in hci. In: *Modern statistical methods for HCI*. [S.l.]: Springer, 2016. p. 291–330.
- ENDSLEY, M. R. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human factors*, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, v. 37, n. 1, p. 32–64, 1995.
- ENS, B.; BACH, B.; CORDEIL, M.; ENGELKE, U.; SERRANO, M.; WILLETT, W.; PROUZEAU, A.; ANTHES, C.; BÜSCHEL, W.; DUNNE, C. et al. Grand challenges in immersive analytics. In: *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–17.
- EREN, M. T.; BALCISOY, S. Evaluation of x-ray visualization techniques for vertical depth judgments in underground exploration. *The Visual Computer*, Springer, v. 34, n. 3, p. 405–416, 2018.
- EYRAUD, R.; ZIBETTI, E.; BACCINO, T. Allocation of visual attention while driving with simulated augmented reality. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, Elsevier, v. 32, p. 46–55, 2015.
- FEI, M.; ZHOU, W.; ZHAO, H.; PAN, C.; SHI, D.; AN, X. Enhancing driving safety evaluation through correlation analysis of driver behavior. *Sustainability*, MDPI, v. 17, n. 9, p. 4067, 2025.
- FEIERLE, A.; BELLER, D.; BENGLER, K. Head-up displays in urban partially automated driving: Effects of using augmented reality. In: IEEE. *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*. [S.l.], 2019. p. 1877–1882.
- FERREIRA, M.; GOMES, P.; SILVÉRIA, M. K.; VIEIRA, F. Augmented reality driving supported by vehicular ad hoc networking. In: IEEE. *2013 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*. [S.l.], 2013. p. 253–254.
- GOODGE, T. A.; POLLICK, F.; BREWSTER, S. A. Can you hazard a guess?: Evaluating the effect of augmented reality cues on driver hazard prediction. In: *Proceedings of the 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. [S.l.: s.n.], 2024. p. 1–28.
- HAEUSLSCHMID, R.; PFLEGING, B.; ALT, F. A design space to support the development of windshield applications for the car. In: *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 5076–5091.

- HOSSEINI, A.; BACARA, D.; LIENKAMP, M. A system design for automotive augmented reality using stereo night vision. In: IEEE. *2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings*. [S.l.], 2014. p. 127–133.
- JOSE, R.; LEE, G. A.; BILLINGHURST, M. A comparative study of simulated augmented reality displays for vehicle navigation. In: *Proceedings of the 28th Australian conference on computer-human interaction*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 40–48.
- KETTLE, L.; LEE, Y.-C. Augmented reality for vehicle-driver communication: a systematic review. *Safety*, MDPI, v. 8, n. 4, p. 84, 2022.
- KIM, H.; KIM, W.; KIM, J.; LEE, S.-J.; YOON, D. A study on the effects of providing situation awareness information for the control authority transition of automated vehicle. In: IEEE. *2019 international conference on information and communication technology convergence (ICTC)*. [S.l.], 2019. p. 1394–1396.
- KIM, H.; WU, X.; GABBARD, J. L.; POLYS, N. F. Exploring head-up augmented reality interfaces for crash warning systems. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 224–227.
- KIM, N.; JEONG, K.; YANG, M.; OH, Y.; KIM, J. "are you ready to take-over?" an exploratory study on visual assistance to enhance driver vigilance. In: *Proceedings of the 2017 CHI conference extended abstracts on human factors in computing systems*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1771–1778.
- KNOBEL, M.; HASSENZAHN, M.; MÄNNLEIN, S.; LAMARA, M.; SCHUMANN, J.; ECKOLDT, K.; LASCHKE, M.; BUTZ, A. Become a member of the last gentlemen: designing for prosocial driving. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Designing Pleasurable Products and Interfaces*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 60–66.
- KOESDWIADY, A.; SOUA, R.; KARRAY, F.; KAMEL, M. S. Recent trends in driver safety monitoring systems: State of the art and challenges. *IEEE transactions on vehicular technology*, IEEE, v. 66, n. 6, p. 4550–4563, 2016.
- KÖHN, T.; GOTTLIEB, M.; SCHERMANN, M.; KRUMHOLTZ, H. Improving take-over quality in automated driving by interrupting non-driving tasks. In: *Proceedings of the 24th international conference on intelligent user interfaces*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 510–517.
- KUNZE, A.; SUMMERSKILL, S. J.; MARSHALL, R.; FILTNESS, A. J. Conveying uncertainties using peripheral awareness displays in the context of automated driving. In: *Proceedings of the 11th international conference on automotive user interfaces and interactive vehicular applications*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 329–341.
- KURZHALS, K.; BECHER, M.; PATHMANATHAN, N.; REINA, G. Evaluating situated visualization in ar with eye tracking. In: IEEE. *2022 IEEE Evaluation and Beyond-Methodological Approaches for Visualization (BELIV)*. [S.l.], 2022. p. 77–84.
- LABOISSIÈRE, P. *Pesquisa da CNT mostra que 67% das rodovias brasileiras têm problemas*. 2023. <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2023-11/pesquisa-da-cnt-mostra-que-67-das-rodovias-brasileiras-tem-problemas>>. Agência Brasil (EBC). Acesso em: 2025-08-21.

- LARGE, D. R.; BURNETT, G.; SALANITRI, D.; LAWSON, A.; BOX, E. A longitudinal simulator study to explore drivers' behaviour in level 3 automated vehicles. In: *Proceedings of the 11th international conference on automotive user interfaces and interactive vehicular applications*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 222–232.
- LEE, B.; SEDLMAIR, M.; SCHMALSTIEG, D. Design patterns for situated visualization in augmented reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, IEEE, v. 30, n. 1, p. 1324–1335, 2023.
- LI, J.; SHARLIN, E.; GREENBERG, S.; ROUNDING, M. Designing the car iwindow: exploring interaction through vehicle side windows. In: *CHI'13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1665–1670.
- LIANG, Y.; ZHENG, P.; XIA, L. A visual reasoning-based approach for driving experience improvement in the ar-assisted head-up displays. *Advanced Engineering Informatics*, Elsevier, v. 55, p. 101888, 2023.
- LINDEMANN, P.; MÜLLER, N.; RIGOLLL, G. Exploring the use of augmented reality interfaces for driver assistance in short-notice takeovers. In: IEEE. *2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. [S.l.], 2019. p. 804–809.
- LINDEMANN, P.; RIGOLL, G. A diminished reality simulation for driver-car interaction with transparent cockpits. In: IEEE. *2017 IEEE Virtual Reality (VR)*. [S.l.], 2017. p. 305–306.
- MARTINS, N. C.; MARQUES, B.; ALVES, J.; ARAÚJO, T.; DIAS, P.; SANTOS, B. S. Augmented reality situated visualization in decision-making. *Multimedia Tools and Applications*, Springer, v. 81, n. 11, p. 14749–14772, 2022.
- MÜLLER, T.; COLLEY, M.; DOGRU, G.; RUKZIO, E. Ar4cad: Creation and exploration of a taxonomy of augmented reality visualization for connected automated driving. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, ACM New York, NY, USA, v. 6, n. MHCI, p. 1–27, 2022.
- MUTHALIF, M. Z. A.; SHOJAEI, D.; KHOSHELHAM, K. Interactive mixed reality methods for visualization of underground utilities. *PFG–Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, Springer, v. 92, n. 6, p. 741–760, 2024.
- Nissan Motor Corporation. *Invisible-to-Visible (I2V)*. 2025. <<https://www.nissan-global.com/EN/INNOVATION/TECHNOLOGY/ARCHIVE/I2V/>>. Accessed: 2025-06-17.
- OHTA, Y.; KITAHARA, I.; KAMEDA, Y.; MIYAMOTO, T. Floating virtual mirrors: Visualization of the scene behind a vehicle. (*No Title*), Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- OLAVERRI-MONREAL, C.; GOMES, P.; FERNANDES, R.; VIEIRA, F.; FERREIRA, M. The see-through system: A vanet-enabled assistant for overtaking maneuvers. In: IEEE. *2010 IEEE intelligent vehicles symposium*. [S.l.], 2010. p. 123–128.
- OMEIZA, D.; BHATTACHARYYA, R.; JIOTKA, M.; HAWES, N.; KUNZE, L. A transparency paradox? investigating the impact of explanation specificity and autonomous vehicle perceptual inaccuracies on passengers. *arXiv preprint arXiv:2408.08785*, 2024.
- PAWAR, N. M.; VELAGA, N. R. Modelling the influence of time pressure on reaction time of drivers. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, Elsevier, v. 72, p. 1–22, 2020.

- PEČEČNIK, K. S.; TOMAŽIČ, S.; SODNIK, J. Design of head-up display interfaces for automated vehicles. *International Journal of Human-Computer Studies*, Elsevier, v. 177, p. 103060, 2023.
- PEEREBOOM, J.; TABONE, W.; DODOU, D.; WINTER, J. de. Head-locked, world-locked, or conformal diminished-reality? an examination of different ar solutions for pedestrian safety in occluded scenarios. *Virtual Reality*, Springer, v. 28, n. 2, p. 119, 2024.
- SALEHAHMADI, F.; HAJIALIASGARI, F. Grand adventure of augmented reality in landscape of surgery. *World Journal of Plastic Surgery*, v. 8, n. 2, p. 135, 2019.
- SAWITZKY, T. V.; WINTERSBERGER, P.; RIENER, A.; GABBARD, J. L. Increasing trust in fully automated driving: Route indication on an augmented reality head-up display. In: *Proceedings of the 8th ACM International Symposium on Pervasive Displays*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–7.
- SCHMIDT, G. J.; RITTGER, L. Guiding driver visual attention with leds. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 279–286.
- SCHRAMM, R. C.; FEDRIZZI, G.; SASALOVICI, M.; FREIWALD, J. P.; SCHWANECKE, U. Augmented journeys: Interactive points of interest for in-car augmented reality. In: *Proceedings of the 2025 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. [S.l.: s.n.], 2025. p. 1–19.
- SCHRAMM, R. C.; SASALOVICI, M.; FREIWALD, J. P.; OTTO, M. M.; REINELT, M.; SCHWANECKE, U. Blending the worlds: An evaluation of world-fixed visual appearances in automotive augmented reality. In: *Proceedings of the 2025 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. [S.l.: s.n.], 2025. p. 1–23.
- SHINAR, D.; VOGELZANG, M. Comprehension of traffic signs with symbolic versus text displays. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, Elsevier, v. 18, p. 72–82, 2013.
- SRIDHAR, S.; NG-THOW-HING, V. Generation of virtual display surfaces for in-vehicle contextual augmented reality. In: IEEE. *2012 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*. [S.l.], 2012. p. 317–318.
- TELPAZ, A.; RHINDRESS, B.; ZELMAN, I.; TSIMHONI, O. Haptic seat for automated driving: preparing the driver to take control effectively. In: *Proceedings of the 7th international conference on automotive user interfaces and interactive vehicular applications*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 23–30.
- THAPA, A.; ALSADOON, A.; PRASAD, P.; DAWOUD, A.; ALRUBAIE, A. A novel augmented reality for hidden organs visualisation in surgery: enhanced super-pixel with sub sampling and variance adaptive algorithm. *Multimedia Tools and Applications*, Springer, v. 80, p. 25411–25432, 2021.
- TIJERINA, L.; BLOMMER, M.; CURRY, R.; SWAMINATHAN, R.; KOCHHAR, D. S.; TALAMONTI, W. An exploratory study of driver response to reduced system confidence notifications in automated driving. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, IEEE, v. 1, n. 4, p. 325–334, 2016.

TÖNNIS, M.; KLINKER, G.; PLAČIĆ, M. Survey and classification of head-up display presentation principles. *Proceedings of the International Ergonomics Association (IEA)*, Citeseer, 2009.

University of Sydney. *New technology gives smart cars 'X-ray' like vision*. 2021. <<https://www.sydney.edu.au/news-opinion/news/2021/11/02/new-technology-gives-smart-cars--x-ray--like-vision.html>>. Accessed: 2025-06-17.

WANG, M.; LYCKVI, S. L.; CHEN, C.; DAHLSTEDT, P.; CHEN, F. Using advisory 3d sound cues to improve drivers' performance and situation awareness. In: *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 2814–2825.

WIEGAND, G.; MAI, C.; LIU, Y.; HUSSMANN, H. Early take-over preparation in stereoscopic 3d. In: *Adjunct proceedings of the 10th international conference on automotive user interfaces and interactive vehicular applications*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 142–146.

WILLETT, W.; ASENIERO, B. A.; CARPENDALE, S.; DRAGICEVIC, P.; JANSEN, Y.; OEHLBERG, L.; ISENBERG, P. Perception! immersion! empowerment! superpowers as inspiration for visualization. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, IEEE, v. 28, n. 1, p. 22–32, 2021.

WILLETT, W.; JANSEN, Y.; DRAGICEVIC, P. Embedded data representations. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, IEEE, v. 23, n. 1, p. 461–470, 2016.

WINKLER, M.; SOLEIMANI, M. A review of augmented reality heads up display in vehicles: Effectiveness, application, and safety. *International Journal of Human–Computer Interaction*, Taylor & Francis, p. 1–16, 2025.

World Health Organization. *Road traffic injuries: fact sheet*. 2023. <<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>>. Acesso em: 2025-08-21.

YADAV, A. K.; VELAGA, N. R. Modelling the relationship between different blood alcohol concentrations and reaction time of young and mature drivers. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, Elsevier, v. 64, p. 227–245, 2019.

YANG, Y.; KARAKAYA, B.; DOMINIONI, G. C.; KAWABE, K.; BENGLER, K. An hmi concept to improve driver's visual behavior and situation awareness in automated vehicle. In: IEEE. *2018 21st international conference on intelligent transportation systems (ITSC)*. [S.l.], 2018. p. 650–655.

YAO, L. Situated visualization in motion. *IEEE Computer Graphics and Applications*, IEEE, v. 44, n. 6, p. 142–150, 2025.

YASUDA, H.; OHAMA, Y. Toward a practical wall see-through system for drivers: How simple can it be? In: IEEE. *2012 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*. [S.l.], 2012. p. 333–334.

ZHANG, S.; YI, X.; LI, S.; HONG, C.; CHEN, G.; LIU, J.; WANG, X.; HU, Y.; WANG, Y.; LI, H. Actual achieved gain and optimal perceived gain: Modeling human take-over decisions towards automated vehicles' suggestions. In: *Proceedings of the 2025 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. [S.l.: s.n.], 2025. p. 1–18.

ZHOU, C.; QIAO, W.; HUA, J.; CHEN, L. Automotive augmented reality head-up displays. *Micromachines*, MDPI, v. 15, n. 4, p. 442, 2024.

Apêndices

APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO PÓS-EXPERIMENTO

Apêndice A – Questionário

Pós-Experimento

Instruções ao participante

As perguntas abaixo foram aplicadas após a conclusão do experimento, com o objetivo de compreender melhor as decisões e percepções dos participantes durante a condução no simulador. As respostas foram utilizadas para complementar a análise quantitativa, oferecendo uma perspectiva qualitativa sobre o comportamento de direção e a influência das visualizações projetadas no para-brisa.

Questionário

1. Descreva as situações e os motivos que te levaram a tomar o controle do carro apertando o botão no volante
 - *(Exemplo: percepção de risco, obstáculos na pista, perda de confiança no piloto automático, etc.)*
2. Comente como você se comportou em termos de condução do veículo após identificar os perigos na pista e tomar o controle do carro.
 - *(Exemplo: reduziu a velocidade, desviou lateralmente, manteve a trajetória, etc.)*
3. Como as informações sobre os perigos na via apresentadas no para-brisa influenciaram suas decisões de condução?
 - *(Exemplo: ajudaram na antecipação da ação, causaram confusão, aumentaram a confiança, etc.)*

O que se desejava capturar com o questionário

1. *Momento de retomada do controle: identificar em que situações e sob quais estímulos os participantes decidiram assumir o controle do veículo.*
2. *Padrões de comportamento de condução: compreender como os condutores reagiram após perceber o perigo, analisando estratégias de frenagem, desvio e retomada da estabilidade.*
3. *Influência das visualizações situadas: avaliar de que forma as informações projetadas no para-brisa impactaram as decisões, percepções de risco e confiança no sistema.*