

Conectando usuários vulneráveis e veículos: um ecossistema para prevenção de acidentes de trânsito em cidades inteligentes

Thiago Toyota¹, Rafaela Nascimento¹, Renan Matulianes¹, Davi Siqueira¹
Tatiana Alencar¹, Vinicius Cavalcanti², Lucas Diniz²
Roberto Netto², Luciana Zaina¹

¹Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) – Sorocaba, SP – Brasil

²Centro Universitário Facens – Sorocaba, SP – Brasil

{thiago.toyota, rafaela.nascimento, renanmatulianes, davi.siqueira, tatiana.alencar}@estudante.ufscar.br, lucas.alediniz01@gmail.com, {vinicius.cavalcanti, roberto.netto}@facens.br, lzaina@ufscar.br

Abstract. *Urban mobility systems have fostered the development of solutions that integrate vehicles, infrastructure, and users. In this context, this paper presents a connected ecosystem to proactively identify collision risks between vehicles and vulnerable road users through multimodal notifications across in-vehicle systems and mobile devices. The proposed approach was evaluated in a laboratory setting simulating the complexity of the ecosystem, with participants acting as drivers and pedestrians. The results indicate that multimodal notifications within the ecosystem can support both drivers and pedestrians in perceiving risk in cooperative urban mobility scenarios.*

Resumo. *Os sistemas de mobilidade urbana têm impulsionado o desenvolvimento de soluções que integram veículos, infraestrutura e usuários. Nessa linha, este artigo apresenta um ecossistema conectado para identificar antecipadamente riscos de colisão entre veículos e usuários vulneráveis por meio de notificações multimodais entre sistemas embarcados e dispositivos móveis. A proposta foi avaliada em laboratório, simulando a complexidade do ecossistema, com participantes como motoristas e pedestres. Os resultados indicam que notificações multimodais no ecossistema podem apoiar motoristas e pedestres na percepção de risco em cenários cooperativos de mobilidade urbana.*

1. Introdução

O crescimento contínuo das áreas urbanas e o aumento da complexidade dos sistemas de mobilidade têm intensificado os desafios relacionados à segurança no trânsito, especialmente no que se refere aos *Vulnerable Road Users* (VRUs), como pedestres, ciclistas e motociclistas [Muslim and Antona-Makoshi 2022]. O aumento da circulação de veículos e da presença de múltiplos atores no espaço urbano torna a identificação precoce de riscos essencial para reduzir acidentes e promover cidades mais seguras [Silva et al. 2025].

Nesse contexto, ecossistemas cooperativos baseados em tecnologias *Vehicle-to-Everything* (V2X) têm sido investigados como estratégia para ampliar a consciência de motoristas e pedestres sobre a situação por meio da comunicação entre veículos, pedestres

e infraestrutura urbana [Hernandez-Jayo et al. 2015, Tahmasbi-Sarvestani et al. 2017]. Paralelamente, pesquisas em Interação Humano-Computador (IHC) têm evidenciado que a forma como os alertas de colisão são apresentados influencia diretamente a percepção de risco, a carga cognitiva e a tomada de decisão [Ma et al. 2022, Kim et al. 2018, Clérigo et al. 2024, Vinayaga-Sureshkanth et al. 2018].

Apesar desses avanços, observa-se que grande parte dos estudos aborda componentes de forma isolada, seja sob a perspectiva tecnológica, seja sob a perspectiva da interface. Motoristas e VRUs frequentemente são avaliados separadamente, e os dispositivos utilizados por cada ator são investigados de maneira independente. Assim, permanece uma lacuna na proposição e análise de ecossistemas conectados que integrem simultaneamente múltiplos atores e múltiplos dispositivos em um ambiente cooperativo unificado.

Este artigo apresenta um ecossistema conectado para identificação precoce de possíveis colisões entre veículos e VRUs, integrando infraestrutura inteligente, unidades embarcadas veiculares e dispositivos pessoais. A proposta foi avaliada em laboratório com motoristas e VRUs em um ambiente simulado de mobilidade inteligente. Simuladores de condução possibilitam experimentos seguros, controlados e repetíveis para validação de sistemas e estudos de usuários [Weir and Clark 1995, Lee et al. 1998], além de estarem alinhados ao modelo V, amplamente utilizado na indústria automotiva [Oka 2021]¹. Os resultados fornecem evidências iniciais sobre a percepção e compreensão dos alertas no ecossistema proposto. Embora diferentes modalidades de notificação possam influenciar a percepção e preferência dos usuários, investigar quais tipos de alerta são considerados mais adequados está fora do escopo deste trabalho. Como contribuições, destacam-se: (i) a proposição de um ecossistema conectado com alertas multimodais coordenados entre motoristas e VRUs; e (ii) a descrição de uma avaliação conduzida em um ambiente conectado e distribuído.

2. Trabalhos Relacionados

A literatura em mobilidade inteligente explora ecossistemas cooperativos baseados em tecnologias V2X, partindo da premissa de que a comunicação entre veículos, pedestres e infraestrutura pode ampliar a consciência situacional no trânsito urbano. Entretanto, observa-se uma dicotomia recorrente: pesquisas voltadas à infraestrutura conectada tendem a priorizar métricas de rede e latência, enquanto estudos centrados no usuário frequentemente analisam apenas um dos atores do sistema, seja o motorista ou o pedestre.

No campo dos ecossistemas conectados, diferentes propostas investigam a viabilidade da comunicação cooperativa. A evolução das tecnologias veiculares tem sido marcada pela transição do padrão *Dedicated Short-Range Communications* (DSRC) para o *Cellular Vehicle-to-Everything* (C-V2X)², impulsionada pelas atualizações do 3GPP³ [Khan et al. 2022]. Essa evolução ampliou a confiabilidade da troca de mensagens de baixa latência, aspecto essencial para aplicações críticas de segurança e aumento da consciência situacional no trânsito [Moradi-Pari et al. 2023]. Nesse contexto, a proteção de VRUs tornou-se prioridade nos ecossistemas de transporte inteligente

¹No lado esquerdo do "V", são definidos os requisitos e a arquitetura do sistema; no lado direito, os componentes são verificados e validados por meio de testes.

²<https://5gaa.org/c-v2x-explained/>

³O 3GPP é um consórcio global responsável pela padronização de redes móveis.

[Khan et al. 2022]. Para atender aos requisitos de processamento em tempo real sem comprometer dispositivos móveis, abordagens baseadas em *Multi-access Edge Computing* (MEC) transferem o processamento para servidores de borda, reduzindo a latência e aumentando a eficiência da comunicação [Zoghlami et al. 2023].

O sistema V-Alert [Hernandez-Jayo et al. 2015] utiliza comunicação heterogênea entre veículos e ciclistas para compartilhamento de posicionamento, sendo avaliado principalmente por métricas de rede. De forma semelhante, uma aplicação de segurança veículo–pedestre baseada em DSRC [Tahmasbi-Sarvestani et al. 2017] implementa algoritmos de detecção de colisão avaliados pelo tempo de resposta e pela precisão da comunicação. Embora demonstrem a viabilidade da detecção de riscos em ambientes conectados, esses trabalhos concentram-se sobretudo na arquitetura computacional e no desempenho da comunicação.

Em contraste, estudos na área de IHC investigam o design de interfaces de prevenção de colisão sob a perspectiva do motorista. Sistemas de aviso de colisão frontal com alertas multimodais [Ma et al. 2022], *Head-Up Displays* com realidade aumentada [Kim et al. 2018] e interfaces para tornar mais transparente o funcionamento de veículos autônomos [Morra et al. 2020] buscam melhorar a percepção de risco. Ambientes de simulação também têm sido utilizados para testar sistemas de frenagem e mecanismos de alerta [Zöllner et al. 2015]. Nessa linha, um sistema para identificação de motocicletas no ponto cego foi desenvolvido por meio de sessões de *co-design* com usuários finais [Lisboa et al. 2023]. Embora avancem no design de interfaces para o motorista, essas abordagens geralmente operam de forma unilateral, sem compartilhar o estado de risco com outros atores do ecossistema.

Por outro lado, alguns trabalhos investigam exclusivamente a perspectiva do pedestre. Dispositivos vestíveis têm sido utilizados para detectar distração durante a travessia [Vinayaga-Sureshkanth et al. 2018], enquanto ambientes imersivos analisam como pedestres distraídos respondem a alertas de tráfego [Rahimian et al. 2018]. Mais recentemente, sistemas de realidade aumentada com óculos inteligentes passaram a exibir avisos de colisão diretamente no campo de visão do pedestre [Clérigo et al. 2024]. Ainda assim, essas propostas concentram-se na experiência individual do pedestre, sem considerar a integração simultânea com veículos e infraestrutura conectada.

Em síntese, apesar dos avanços em infraestrutura de comunicação e interfaces para motoristas e pedestres, ainda faltam soluções que integrem esses atores em um ecossistema conectado unificado. Diferentemente de trabalhos focados apenas na rede ou em um único usuário, este artigo apresenta um ecossistema centrado simultaneamente em motoristas e pedestres (adultos e crianças) em um ambiente interativo compartilhado.

3. Proposta do ecossistema conectado

A proposta baseia-se na integração de um ecossistema conectado composto por um sistema inteligente centralizado e dispositivos distribuídos na infraestrutura urbana, nos veículos e nos próprios usuários (motoristas e VRUs). Esse ecossistema permite o monitoramento contínuo do tráfego por meio desses sensores e dispositivos conectados, possibilitando a detecção antecipada de situações de colisão e a disseminação coordenada de alertas em tempo real para os diferentes atores do ambiente viário.

A arquitetura do ecossistema conectado é apresentada na **Figura 1**. Como ilus-

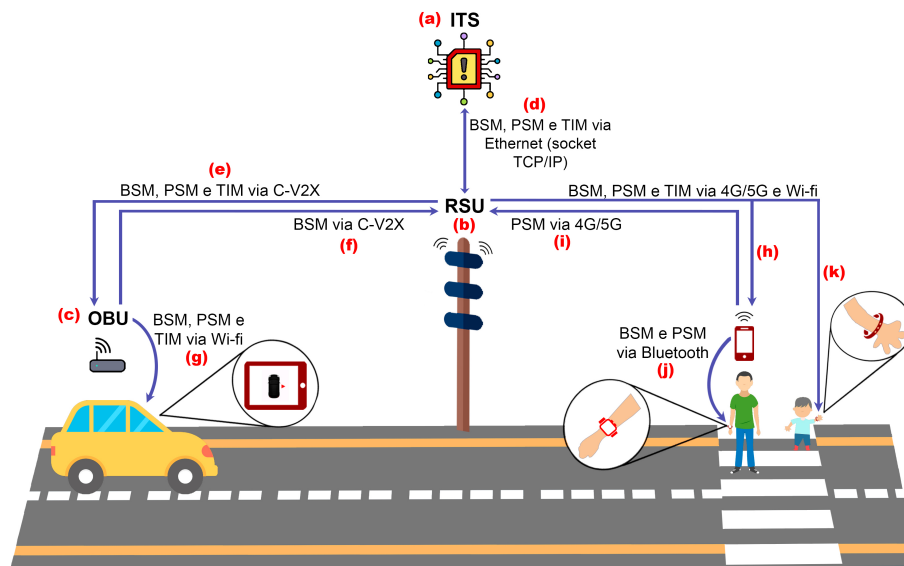


Figura 1. Ecossistema conectado: fluxo de informações e conexões.

trado na **Figura 1(a)**, o *Intelligent Transport System* (ITS)⁴ atua como núcleo central de processamento, recebendo dados de veículos e VRUs, analisando situações de risco e gerando alertas de colisão. O sistema orchestra informações provenientes da infraestrutura urbana, dos veículos conectados e dos dispositivos móveis, permitindo uma visão integrada do ambiente viário. O *Road-Side Unit* (RSU)⁵, instalado em postes e semáforos (**Figura 1(b)**), atua como intermediário entre o ITS e os diferentes modais do sistema de transporte, viabilizando a troca de dados. Já o *On-Board Unit* (OBU)⁶ (**Figura 1(c)**) permite a comunicação dos veículos com a infraestrutura inteligente via RSU ou rede celular. Do lado dos usuários, o ecossistema utiliza um sistema *Advanced Driver Assistance Systems* (ADAS) embarcado no veículo para apresentação de alertas ao motorista, enquanto os VRUs (representados por pedestres adultos e crianças) interagem por meio de *smartphone*, *smartwatch* e um vestível dedicado com feedback háptico simplificado.

A comunicação entre ITS e RSU ocorre via *socket* TCP/IP sobre *Ethernet* (**Figura 1(d)**). A RSU conecta-se à OBU e aos dispositivos do VRU, como *smartphone* e vestíveis. A OBU comunica-se com a RSU por C-V2X (**Figuras 1(e) e (f)**), tecnologia sem fio que possibilita a troca de informações entre veículos, infraestrutura e VRUs, e com o ADAS embarcado no veículo por Wi-Fi (**Figura 1(g)**). O *smartphone* conecta-se à RSU via 4G ou 5G (**Figuras 1(h) e (i)**) e ao *smartwatch* por Bluetooth (**Figura 1(j)**), enquanto o vestível dedicado se conecta diretamente à RSU por Wi-Fi (**Figura 1(k)**). O ecossistema adota o padrão SAE J2735⁷, que define formatos de mensagens e uma arquitetura baseada em *Wireless Access in Vehicular Environments* (WAVE), com encapsulamento das mensagens seguindo o formato *WAVE Short Message Protocol* (WSMP). Entre as mensagens utilizadas, o *Basic Safety Message* (BSM) transmite o estado dinâmico do veículo via OBU; o *Personal Safety Message* (PSM) informa ao ITS via *smartphone* a presença e o estado do VRU contendo dados como posição, velocidade e direção; e o *Traveler Information Message* (TIM) fornece sinalização viária a partir da RSU para

⁴<https://www.iso.org/transport/its-intelligent-transportation-systems>

⁵<https://www.v2x-priority.com/en/rsu/>

⁶<https://www.v2x-priority.com/en/obu-2/>

⁷<https://www.sae.org/standards>

veículos e VRUs. Quando há risco de colisão, esse três tipos de mensagens podem ser encaminhadas pelo ITS, via RSU, aos dispositivos.

O fluxo informacional inicia-se no tráfego urbano: veículos, por meio da OBU, enviam mensagens BSM ao ITS via RSU, enquanto VRUs enviam mensagens PSM por meio do *smartphone*, permitindo ao sistema manter consciência situacional atualizada. Ao detectar risco de colisão, o ITS gera um objeto *JavaScript Object Notation* (JSON) contendo dados de BSM, PSM e TIM e o envia à RSU. Para comunicação com a OBU, os pacotes são codificados em *Unaligned Packed Encoding Rules* (UPER)⁸, encapsulados em WSMP e transmitidos por rádio; após o recebimento, a OBU decodifica o conteúdo e o encaminha ao ADAS. Para os dispositivos dos VRUs, os objetos JSON são enviados diretamente ao *smartphone* e ao vestível dedicado via Wi-Fi ou 4G/5G, sendo retransmitidos ao *smartwatch* via Bluetooth. A adoção de JSON na comunicação entre os agentes e a RSU ocorreu devido a uma restrição da *stack* proprietária da Commsignia⁹, responsável pela conversão das mensagens ITS para ASN.1/UPER, cuja interface aceita apenas JSON ou XML.

4. Ambiente simulado do ecossistema

Para tornar concreta a proposta do ecossistema, foi necessário criar um ambiente simulado da cidade inteligente e também desenvolver aplicativos para o motorista e VRUs.

O ambiente da cidade inteligente foi construído no campus do Centro Universitário Facens, que dispõe de sensores, conectividade 5G e um laboratório de simulação com tecnologias imersivas e gêmeos digitais para estudos de trânsito. Gêmeos digitais são representações virtuais capazes de simular o comportamento do mundo físico em tempo real [Batty 2018]. O laboratório conta com uma sala de projeção com tela de mais de 12m por 3,2m, campo visual superior a 210° e três projetores Optoma GT2100 HDR. Para ampliar a imersão, um Jeep Compass S foi integrado ao ambiente de simulação. A simulação foi desenvolvida no CARLA 0.9.15, um ambiente de código aberto voltado ao desenvolvimento de sistemas de direção autônoma¹⁰, baseado na Unreal Engine 4¹¹. O ambiente virtual foi construído a partir de um mapa digital do campus contendo vegetação, veículos e edifícios modelados com recursos do CARLA, Unreal Engine e Blender¹². Além disso, foi desenvolvida uma aplicação de Realidade Virtual integrada ao CARLA para simular, em tempo real, a travessia de pedestres.

Para notificar motorista e VRUs sobre potenciais colisões, foram desenvolvidas aplicações Android em: *tablet* (Lenovo Tab M8 Geração 4) para simular o painel do veículo com ADAS, em *smartphone* (Samsung Galaxy A35), e em *smartwatch* (Samsung Galaxy Watch 4) utilizando Kotlin, Jetpack Compose e Android Studio. Além disso, foi criado um dispositivo vestível para VRUs que não possuem acesso a dispositivos móveis convencionais, como crianças em zonas escolares. O vestível dedicado foi construído com microcontrolador ESP32-C3 Super Mini, bateria LiPo de 500 mAh, módulo TP4056 e módulo de vibração MV50, com programação em C++/Arduino. O *smartphone* conecta-

⁸Representação binária compacta baseada em *Abstract Syntax Notation One* (ASN.1).

⁹<https://commsignia.com/>

¹⁰<https://carla.org/2023/11/10/release-0.9.15>.

¹¹<https://www.unrealengine.com>.

¹²<https://www.blender.org>.

se à RSU, o *tablet* à OBU, o *smartwatch* comunica-se com o *smartphone* via Bluetooth, e o dispositivo vestível conecta-se diretamente à rede da RSU via Wi-Fi.

O processamento dos alertas ocorre localmente no *smartphone* e no *tablet*, a partir de dados de posição, velocidade e direção extraídos de mensagens BSM e PSM. Com essas informações, calcula-se o *Time to Collision* (TTC), usado para definir a criticidade do risco e a modalidade do alerta: $TTC = \frac{D}{V_{relativa}}$. O cálculo do TTC baseia-se na distância entre os VRUs e na velocidade relativa de aproximação. A distância é obtida por meio da fórmula de Haversine¹³, enquanto a velocidade relativa considera os vetores de direção. O *smartphone* também compartilha o valor calculado com o *smartwatch* via Bluetooth.

As aplicações adotam uma linguagem visual unificada, utilizando amarelo, laranja e vermelho para representar níveis baixo, médio e alto de risco. No *smartphone*, os alertas indicam direção da colisão, nível de risco e tempo estimado até o impacto (Figura 2 (a), (b) e (c)); no *smartwatch*, são apresentados em formato semelhante a um radar, com setor iluminado na cor e direção correspondentes ao risco (Figura 2 (d), (e) e (f)). No ADAS, implementado em *tablet*, o entorno do veículo é representado espacialmente, indicando o tipo de VRU e a direção do risco (Figura 3 (a)–(e)). A direção do risco é comunicada pela posição espacial do alerta e por uma seta intermitente, cuja frequência varia conforme o nível de risco. As aplicações também utilizam alertas sonoros e hápticos: o *tablet* emite notificações verbais; o *smartphone*, sinais sonoros e vibração; e o *smartwatch*, vibração e alerta verbal. O vestível dedicado vibra por 2,5 segundos ao receber um alerta.

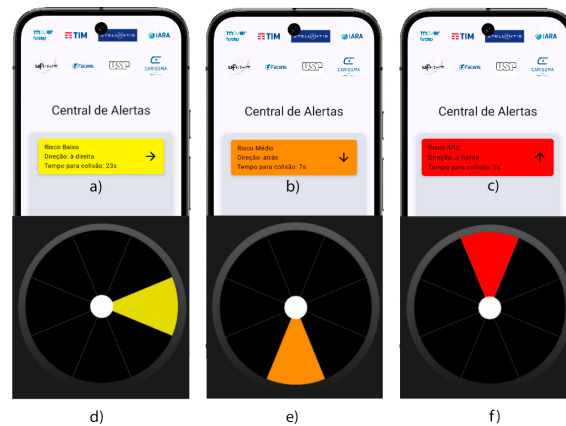


Figura 2. Aplicativos de *smartphone* (superior) e *smartwatch* (inferior).

5. Avaliação

A avaliação foi conduzida em um ambiente de simulação controlado com dois objetivos principais: validar a implementação completa do ecossistema, incluindo gêmeos digitais, sensores urbanos, protocolos de comunicação e aplicações para motoristas e VRUs; e analisar como os alertas influenciaram a percepção de risco e a interpretação das informações pelos participantes. Essa segunda perspectiva concentrou-se na consciência situacional dos usuários, considerada essencial em contextos de mobilidade assistida, nos quais perceber, compreender e antecipar eventos impacta diretamente a segurança [Endsley 2021]. O protocolo da avaliação foi aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa da Universi-

¹³A fórmula de Haversine calcula a distância entre dois pontos na Terra usando coordenadas geográficas.

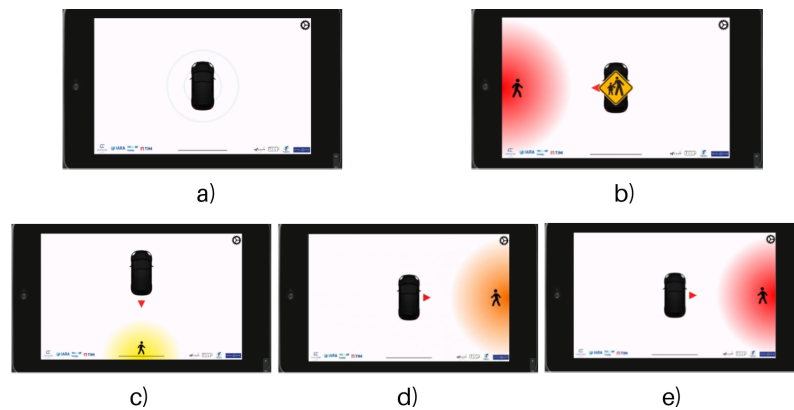


Figura 3. ADAS em diferentes estágios de notificação.

dade Federal de São Carlos (UFSCar) e pelo Comitê de Ética da instituição Newton Paiva (CAAE 83477124.0.0000.5504).

5.1. Coleta e Análise de Dados

A coleta de dados envolveu um cenário de simulação que reproduziu interações entre veículos e VRUs, com participantes atuando como motoristas, pedestres adultos e pedestres com perfil infantil (denominados, a partir daqui, pedestres crianças). No cenário, os pedestres adultos interagiam com o sistema por meio de *smartphone* e *smartwatch*, enquanto os participantes que representavam o pedestre criança utilizavam um vestível dedicado com feedback háptico simplificado. O instrumento de auto-relato *Situational Awareness Rating Technique* (SART)¹⁴ [Selcon and Taylor 1990] com escala Likert de 7 pontos foi adotado para avaliar a consciência situacional (*Situation Awareness* - SA) dos participantes em relação aos artefatos (i.e., aplicações ADAS e dispositivos) e à interação no ecossistema. O instrumento é amplamente utilizado na avaliação de sistemas complexos que demandam atenção contínua e decisões em tempo real. A aplicação do SART foi complementada por dados qualitativos obtidos por meio do protocolo *think aloud* [Courage and Baxter 2005], no qual o participante relata em voz alta suas percepções e decisões de interação.

Participaram do estudo 12 indivíduos convidados (sete do gênero masculino e cinco do feminino) a partir de listas de e-mails de contato dos autores do artigo (ver Tabela 1). Nenhum dos participantes teve contato prévio com a implementação do ecossistema, garantindo que as percepções refletissem as primeiras impressões de uso. Todos tinham no mínimo ensino médio. Inicialmente, os participantes assinaram o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE) e responderam a um questionário de perfil. Em seguida, receberam instruções sobre as atividades no cenário de simulação. Cada participante no papel de motorista percorreu o trajeto simulado realizando ao menos uma volta completa. Já os participantes nos papéis de pedestre adulto e pedestre criança permaneceram na faixa de pedestres aguardando o momento de travessia. Durante toda a atividade, os participantes utilizaram o protocolo *think aloud*, com registro de áudio das sessões.

A interação no ecossistema conectado ocorreu de forma síncrona entre dois participantes. Inicialmente, um participante atuava como motorista enquanto outro desempenhava o papel de pedestre adulto. Em seguida, mantendo o mesmo motorista, outro

¹⁴<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.31709764>

Tabela 1. Perfil dos Participantes.

ID	Idade	CNH (anos)	CNH (tipo)	Freq. Direção	Contexto de Direção	Sistemas ADAS Utilizados
P01	36	18	A	Diariamente	Área Urbana	AEB, FCW, LKA, LDW, ACC, BSD, DF, PA, SE
P02	33	13	B	Ocasionalmente	Área Urbana	BSD, SE
P03	48	28	B	Ocasionalmente	Não dirige com frequência	LDW, BSD
P04	31	13	A, B	Frequentemente	Área Urbana e Rodoviário	Não utiliza ADAS
P05	33	3	B	Raramente	Área Urbana e Área Rural	SE
P06	33	14	A, B	Diariamente	Área Urbana	SE
P07	23	3	B	Diariamente	Área Urbana	SE
P08	30	12	A, B	Diariamente	Área Urbana e Rodoviário	ACC, AVM, SE
P09	52	27	B	Frequentemente	Área Urbana	ACC, BSD, SE
P10	57	30	B	Diariamente	Área Urbana	ACC, BSD, SE, PA
P11	46	25	A, B	Diariamente	Área Urbana	AEB, SE
P12	42	20	B	Diariamente	Área Urbana	Não utiliza ADAS

Legenda ADAS: AEB: Frenagem Emergência; FCW: Alerta Colisão; LKA: Assist. Faixa; LDW: Saída Faixa; ACC: Piloto Adaptativo; BSD: Ponto Cego; AVM: Câmera 360°; SE: Sensores Estacionam.; DF: Alerta Fadiga; PA: Assist. Estacionam.

participante assumia o papel de pedestre criança¹⁵ (Figura 4). A ordem dos papéis foi contrabalanceada para reduzir vieses de aprendizagem, e todos os participantes desempenharam todos os papéis, totalizando 36 amostras. Durante as rodadas, o motorista recebia alertas visuais e sonoros em um *tablet* acoplado ao sistema de *infotainment* ao se aproximar de uma faixa de pedestres. Ao final de cada etapa, os participantes respondiam ao questionário SART referente ao papel desempenhado, sendo que o motorista respondia apenas após as duas rodadas.



Figura 4. Perfis de participantes considerados no estudo: motorista (a), pedestre criança (b) e pedestre adulto (c).

Na análise de dados foram consideradas 36 amostras do questionário SART coletadas para os três papéis de interação (i.e., motorista, pedestre adulto e pedestre criança). O cálculo do índice de consciência situacional foi feito a partir da fórmula do instrumento do SART: $SA = U - (D - S)$. O valor de SA representa o equilíbrio entre as exigências cognitivas impostas pela situação e os recursos atencionais disponíveis ao usuário. As questões sobre Demanda (D) coletam a percepção do participante sobre a instabilidade, complexidade e variabilidade demandadas no cenário de interação, enquanto Suprimento (S) reflete o quanto de carga cognitiva foi necessário empregar para atender a demanda (D) situacional, sendo que ambos impactam no Entendimento (U) da situação¹⁶. A análise qualitativa foi realizada com base na interpretação das falas dos participantes (coletadas via protocolo *think aloud*) e nas anotações feitas pelos pesquisadores no momento do estudo, sendo que essas informações foram diretamente relacionadas aos resultados do SART para complementar e aprofundar a compreensão da avaliação.

As ameaças à validade foram analisadas com base em [Wohlin et al. 2012]. Para

¹⁵Por questões éticas, crianças não participaram do estudo; o papel foi simulado por um adulto.

¹⁶Ver questões do SART no link: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.31709764>.

a validade de construto, a combinação do SART, do protocolo *think aloud* e dos questionários de perfil permitiu triangulação dos dados. Na validade interna, foram adotadas sessões padronizadas, condições equivalentes no ambiente simulado e contrabalanceamento dos papéis, reduzindo vieses de aprendizagem e de ordem. Em relação à validade de conclusão, utilizaram-se instrumentos estruturados e análise descritiva; embora o estudo tenha envolvido 12 participantes, a atuação em três papéis distintos resultou em 36 amostras. Quanto à validade externa, reconhece-se que o ambiente simulado e o número de participantes limitam a generalização dos resultados, apesar de a diversidade de perfis e papéis fornecer evidências iniciais relevantes sobre o ecossistema proposto.

5.2. Resultados

Os resultados de SA do SART indicam as medianas de 30, 33,5 e 30,5 para os papéis de motorista, pedestre adulto e pedestre criança, respectivamente. Considerando que o escore global de SA do SART pode variar de -14 a 46, as medianas apresentadas evidenciam que a consciência situacional dos participantes obteve bons resultados independentemente do papel exercido por eles.

A Figura 5 apresenta a distribuição das respostas às dimensões do SART. Os resultados indicam baixa demanda cognitiva e altos níveis de suprimento atencional e entendimento da situação, sugerindo boa consciência situacional no ecossistema avaliado. Na dimensão Demanda (D), predominam notas baixas, especialmente no componente S4, indicando reduzida sobrecarga cognitiva, sobretudo entre os pedestres. Já nas dimensões Suprimento (S1, S2 e S3) e Entendimento (U1, U2 e U3), prevaleceram notas altas, principalmente 6 e 7, sugerindo que os participantes perceberam recursos atencionais suficientes e compreenderam adequadamente as informações fornecidas pelo sistema. Esses resultados indicam que os alertas foram eficazes em comunicar a situação e apoiar a antecipação de ações.

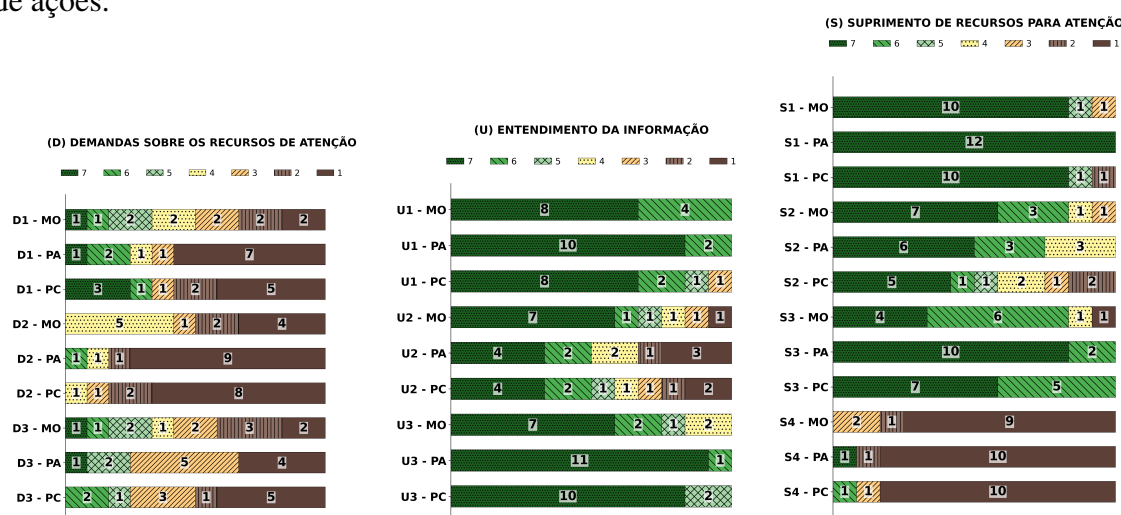


Figura 5. Resultados do SART por dimensão - Motorista (MO), Pedestre Adulto (PA) e Pedestre Criança (PC).

A análise qualitativa baseada no protocolo *think aloud* reforça esses achados ao indicar que os participantes perceberam os alertas como apoio efetivo à consciência situacional (SA). P01 afirmou que “O alerta ajudou bastante, [pois] não tinha visto o pedestre” e considerou o alerta “fundamental” no papel de pedestre. Participantes com maior fami-

liaridade tecnológica, como P08, P09 e P10, demonstraram rápida adaptação ao sistema. P08 relatou: “Como é um aviso, eu sempre penso em parar” e “Recebi um alerta e não visualizei o carro ainda, mas me deixou em alerta”, enquanto P09 destacou: “Vibrou a pulseira, o carro está se aproximando”. Mesmo participantes sem experiência prévia com ADAS, como P04 e P12, reagiram positivamente aos alertas. P04 afirmou: “Vi um pedestre, freiei porque fiquei com medo dele atravessar”, e P12 relatou: “O [dispositivo com alerta háptico] deu uma tremidinha [e logo] chegou um carro branco”. De modo geral, os relatos sugerem que o ecossistema conectado foi eficaz em antecipar riscos e comunicar informações de forma compreensível para diferentes perfis de usuários.

6. Discussão e Considerações Finais

Neste artigo foi apresentada a proposta de um ecossistema conectado para detecção de riscos de colisão entre pedestres e veículos no trânsito urbano. O ecossistema é constituído pela ação coordenada de diferentes dispositivos e protocolos de comunicação em rede, evidenciando a complexidade de integrar tecnologia, pessoas e veículos em um ambiente de mobilidade inteligente.

A avaliação foi conduzida em um laboratório de gêmeos digitais, permitindo a simulação conectada do envio de alertas de risco de colisão para motoristas e pedestres. Os resultados indicam que o ecossistema proposto é viável e tem potencial para apoiar diferentes atores do trânsito em cenários de travessia urbana. As pontuações de SA sugerem que notificações multimodais distribuídas em múltiplos dispositivos contribuem para a compreensão do ambiente e a antecipação de riscos. Além disso, a baixa percepção de demanda cognitiva e os altos níveis de entendimento indicam que as informações foram interpretadas de forma clara, sem sobrecarga significativa, mesmo em um ambiente complexo de trânsito urbano (ver Figura 5).

Um aspecto relevante da avaliação é a natureza cooperativa do ecossistema, que integra simultaneamente motorista e diferentes perfis de VRUs em um ambiente compartilhado, favorecendo a construção de consciência situacional distribuída. Outro elemento central é a multimodalidade das notificações: a combinação de alertas visuais, sonoros e hápticos em *smartphone*, *smartwatch*, vestível dedicado e sistema ADAS em *tablet* mostrou-se adequada a diferentes contextos e perfis de usuário. Os relatos qualitativos sugerem que a redundância sensorial e a consistência visual e semântica entre dispositivos favoreceram a rápida identificação dos riscos e a interpretação dos alertas.

Os resultados reforçam a importância de tratar ecossistemas conectados como ambientes interativos distribuídos. Em vez de sistemas isolados de assistência ao motorista ou ao pedestre [Ma et al. 2022, Kim et al. 2018, Vinayaga-Sureshkanth et al. 2018, Rahimian et al. 2018], a proposta explora a coordenação entre infraestrutura, veículos e dispositivos pessoais como suporte à percepção e à tomada de decisão em tempo real. Como limitações, a avaliação foi conduzida em ambiente de simulação baseado em gêmeo digital, que não reproduz integralmente as condições do tráfego real, contou com número reduzido de participantes e concentrou-se na percepção dos usuários e na consciência situacional, sem incluir métricas objetivas de desempenho ou testes de campo com infraestrutura urbana real.

Como trabalhos futuros, pretende-se ampliar a avaliação do ecossistema com novos cenários de simulação representando diferentes configurações de risco no trânsito

urbano. Estudos futuros poderão incorporar métricas mais objetivas, combinando relatos qualitativos com medidas comportamentais e fisiológicas para analisar com maior precisão a percepção de risco e a consciência situacional dos participantes. Além disso, este trabalho integra um projeto em andamento sobre ecossistemas cooperativos de mobilidade inteligente, no qual novas funcionalidades vêm sendo incorporadas ao sistema, como o compartilhamento de informações contextuais entre os atores do ecossistema (e.g., estado de movimento dos pedestres), visando ampliar a compreensão situacional dos motoristas e apoiar decisões mais seguras em ambientes urbanos.

Agradecimentos

Agradecemos o apoio financeiro do projeto CONECTA (29271.02.01/2022.04-00 - Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa - FUNDEP). Este trabalho também é parcialmente apoiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código Financeiro 001, pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (309497/2022-1) e pelo Centro de Ciências em Gestão e Tecnologia (CCGT) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), campus Sorocaba.

Referências

- Batty, M. (2018). Digital twins. *Environment and planning B: Urban analytics and City Science*, 45(5):817–820.
- Clérigo, A., Schrapel, M., Teixeira, P., Rito, P., Sargento, S., and Vinel, A. (2024). Safe-arcross: Augmented reality collision warnings and virtual traffic lights for pedestrian safety. In *Proceedings of the 16th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, pages 63–73.
- Courage, C. and Baxter, K. (2005). *Understanding your users: a practical guide to user requirements methods, tools, and techniques*. Gulf Professional Publishing.
- Endsley, M. R. (2021). Situation awareness. *Handbook of human factors and ergonomics*, pages 434–455.
- Hernandez-Jayo, U., De-la Iglesia, I., and Perez, J. (2015). V-alert: Description and validation of a vulnerable road user alert system in the framework of a smart city. *Sensors*, 15(8):18480–18505.
- Khan, M. J., Khan, M. A., Beg, A., Malik, S., and El-Sayed, H. (2022). An overview of the 3gpp identified use cases for v2x services. *Procedia Computer Science*, 198:750–756.
- Kim, H., Gabbard, J. L., Anon, A. M., and Misu, T. (2018). Driver behavior and performance with augmented reality pedestrian collision warning: An outdoor user study. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 25(5):1948–1958.
- Lee, W.-S., Kim, J.-H., and Cho, J.-H. (1998). A driving simulator as a virtual reality tool. In *Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 98CH36146)*, volume 1, pages 71–76. IEEE.
- Lisboa, P., Dos Santos, F., Ribeiro, H., Campos, P., and Zaina, L. (2023). Making roads safer: a vehicle blind spot alert system co-designed with end-users. In *Proceedings of the XXII Brazilian Symposium on Human Factors in Computing Systems*, pages 1–11.

- Ma, J., Li, J., and Huang, H. (2022). Evaluation of multimodal and multi-staged alerting strategies for forward collision warning systems. *Sensors*, 22(3):1189.
- Moradi-Pari, E., Tian, D., Bahramgiri, M., Rajab, S., and Bai, S. (2023). Dsrc versus lte-v2x: Empirical performance analysis of direct vehicular communication technologies. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 24(5):4889–4903.
- Morra, L., Lamberti, F., Praticó, F. G., La Rosa, S., and Montuschi, P. (2020). Building trust in autonomous vehicles: Role of virtual reality driving simulators in hmi design. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(9):9396–9409.
- Muslim, H. and Antona-Makoshi, J. (2022). A review of vehicle-to-vulnerable road user collisions on limited-access highways to support the development of automated vehicle safety assessments. *Safety*, 8(2):26.
- Oka, D. K. (2021). *Building secure cars: assuring the automotive software development lifecycle*. John Wiley & Sons.
- Rahimian, P., O’Neal, E. E., Zhou, S., Plumert, J. M., and Kearney, J. K. (2018). Harnessing vehicle-to-pedestrian (v2p) communication technology: Sending traffic warnings to texting pedestrians. *Human Factors*, 60(7):946–959.
- Selcon, S. J. and Taylor, R. M. (1990). Evaluation of the situational awareness rating technique(sart) as a tool for aircrew systems design. *AGARD, Situational Awareness in Aerospace Operations 8 p(SEE N 90-28972 23-53)*.
- Silva, R. M., Azevedo, G. F., Berto, M. V., Rocha, J. R., Fidelis, E. C., Nogueira, M. V., Lisboa, P. H., and Almeida, T. A. (2025). Vulnerable road user detection and safety enhancement: A comprehensive survey. *Expert Systems with Applications*, 292:128529.
- Tahmasbi-Sarvestani, A., Mahjoub, H. N., Fallah, Y. P., Moradi-Pari, E., and Abuchaar, O. (2017). Implementation and evaluation of a cooperative vehicle-to-pedestrian safety application. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 9(4):62–75.
- Vinayaga-Sureshkanth, N., Maiti, A., Jadliwala, M., Crager, K., He, J., and Rathore, H. (2018). A practical framework for preventing distracted pedestrian-related incidents using wrist wearables. *IEEE Access*, 6:78016–78031.
- Weir, D. H. and Clark, A. J. (1995). A survey of mid-level driving simulators. *SAE transactions*, pages 86–106.
- Wohlin, C., Runeson, P., Höst, M., Ohlsson, M. C., Regnell, B., Wesslén, A., et al. (2012). *Experimentation in software engineering*, volume 236. Springer.
- Zoghlami, C., Kacimi, R., and Dhaou, R. (2023). 5g-enabled v2x communications for vulnerable road users safety applications: A review. *Wireless Networks*, 29(3):1237–1267.
- Zöller, I., Betz, A., Mautes, N., Scholz, L., Abendroth, B., Bruder, R., and Winner, H. (2015). Valid representation of a highly dynamic collision avoidance scenario in a driving simulator. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 31:54–66.