

# PassouBem: Uso de Bluetooth para Avisos de Colisões entre Peões e Veículos

★



Diogo Dias<sup>1,2</sup>[0009-0009-8578-4345], Pedro Rosa<sup>1,2</sup>[0000-0002-6870-4181],  
Samih Eisa<sup>2</sup>[0000-0003-0972-4171], and Miguel L. Pardal<sup>1,2</sup>[0000-0003-2872-7300]

<sup>1</sup> Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal  
{diogo.g.dias,pmsrosa,miguel.pardal}@tecnico.ulisboa.pt

<sup>2</sup> INESC-ID, Lisbon, Portugal  
samih.eisa@inesc-id.pt

**Abstract.** No seu dia-a-dia, a maioria das pessoas já leva consigo um telemóvel, utilizando-o para tarefas como a navegação com GPS e a monitorização da atividade física. Simultaneamente, os automóveis têm incorporado mais tecnologia para receber informações da estrada e de outros veículos. E se fosse possível usar a tecnologia de comunicação que já existe nos telemóveis para avisar do perigo de colisão entre peão e veículo? Este trabalho partiu desta hipótese para criar uma nova aplicação de segurança pessoal usando a tecnologia BLE (*Bluetooth Low Energy*). Neste artigo, apresentamos o protótipo da aplicação móvel PassouBem para segurança rodoviária, que transmite periodicamente mensagens com a posição, velocidade e direção dos peões. Obtivemos dados experimentais que mostram que a tecnologia BLE pode fornecer avisos em tempo útil, mesmo sem linha de visão direta entre o condutor e o peão. Estes resultados são sobretudo importantes em áreas urbanas onde os peões estão expostos a perigo nas passadeiras e noutras situações junto a estradas.

**Keywords:** Bluetooth Low Energy · Segurança Rodoviária · Peões · Comunicação Veículo-para-Peão · Mensagens de Segurança Pessoal.

## 1 Introdução

Os sensores em automóveis tornaram-se comuns, fornecendo avisos de segurança sobre perigos imediatos. Além disso, há crescentes preocupações com a segurança rodoviária dos peões, particularmente nas cidades, devido à maior densidade de

---

\* O INESC-ID foi apoiado financeiramente por fundos nacionais através da FCT, Fundação para a Ciência e a Tecnologia, no âmbito do projeto UIDB/50021/2020. Este trabalho foi apoiado financeiramente pelo Projeto Blockchain.PT – Agenda Descentralizar Portugal com Blockchain, (Projeto n.º 51), WP 1: Agricultura e Agroalimentar, Aviso n.º 02/C05-I01.01/2022, financiado pelo Programa de Recuperação e Resiliência (PPR), pela República Portuguesa e pela União Europeia (UE) no âmbito do Programa Next Generation EU.

peões e tráfego. As cidades são também locais com menos visibilidade e mais distrações.

Os testes de segurança em carros têm reconhecido a importância dos sensores para a segurança dos peões. Por exemplo, o Euro Ncap [6], na Europa, testa os carros não só para questões de segurança dos veículos, mas também para a segurança dos peões e outros utilizadores da estrada que são mais vulneráveis (os VRU, do inglês *Vulnerable Road Users*). No entanto, existe um problema com o uso de sensores nos carros: eles estão restritos à sua linha de visão, tendo um alcance limitado. Para aplicações de segurança rodoviária, o tempo é crítico, e a comunicação entre carros e peões pode permitir um aviso atempado que possa evitar acidentes. Das tecnologias de comunicação amplamente disponíveis, testamos Bluetooth para este fim. A tecnologia é barata e tornou-se ubíqua em quase todos os tipos de dispositivos móveis nos últimos anos. Além disso, também está disponível num elevado número de carros.

Os veículos já são capazes de fundir informações dos múltiplos sensores que possuem [19]. O Bluetooth pode ser usado para estender a fusão de sensores com os telemóveis dos peões, fornecendo uma fonte adicional de informação para melhorar os sistemas de deteção de colisão mesmo em situações em que não existe linha de visão direta. O sistema proposto não substitui os sensores dos carros porque, em situações de aparecimento súbito de um VRU, esses sensores reagirão mais rapidamente do que a comunicação com um dispositivo externo.

Este artigo está organizado da seguinte forma. A Secção 2 descreve as experiências que fundamentam o desenvolvimento da aplicação. A Secção 3 descreve outras soluções que resolvem problemas semelhantes. A Secção 4 apresenta uma visão geral da solução proposta. A Secção 5 fornece os resultados da solução que são a seguir discutidos na Secção 6. A Secção 7 descreve como este trabalho pode ser estendido e melhorado. Finalmente, a Secção 8 conclui este artigo.

## 2 Enquadramento

Antes de desenvolver a nossa proposta, realizamos experiências preliminares para garantir que o Bluetooth Low Energy (BLE) seria eficaz tanto em termos de distância como de latência e que as Personal Safety Messages (PSMs) poderiam ser codificadas dentro do tamanho do payload disponível.

### 2.1 Cobertura Bluetooth

Para avaliar a eficácia do BLE, realizámos alguns testes iniciais para verificar se um dispositivo recetor poderia capturar pacotes de BLE a várias distâncias fixas e com que rapidez, mesmo com o recetor ou o transmissor em movimento.

O recetor nestas experiências foi um portátil com Bluetooth v5 a correr no sistema operativo Ubuntu 22.04, com um CPU Intel i5-1135G7 e 12GB de RAM. O portátil estava a correr um script Python que utilizava o software Bleak [2] para procurar anúncios BLE e registá-los.

Utilizámos vários smartphones a atuar como transmissores e a aplicação nRF Connect for Mobile [10] da Nordic Semiconductor para enviar anúncios BLE no modo 1M PHY com uma potência de transmissão (Tx Power) e um intervalo de anúncios pré-definido. Os pacotes incluíam a potência de transmissão (Tx Power) e o nome do dispositivo para facilitar a distinção. O recetor detetava estes pacotes e também determinava a intensidade do sinal recebido (RSSI). Em todas as experiências, os transmissores utilizaram a frequência máxima de anúncios permitida e a potência máxima de transmissão permitida pela aplicação.

Para a primeira experiência, posicionámos os transmissores a várias distâncias e verificámos se o recetor conseguia detetar os pacotes com os anúncios, juntamente com o RSSI calculado.

A Tabela 1 mostra os diferentes modelos de smartphones utilizados, juntamente com a distância ao recetor e o valor de RSSI calculado no recetor.

**Table 1.** Leituras de RSSI a diferentes distâncias

Modelo de Smartphone	Distância ao recetor (m)	RSSI médio detetado (dBm)
iPhone 14	140	-97
Galaxy A23 5G	128	-92
Galaxy S20	84	-95
HUAWEI P smart 2019	99	-91

Foram recebidas comunicações de todos os transmissores, sendo o mais distante a 140m do recetor. Como esperado, o RSSI foi geralmente mais baixo quanto mais longe estavam do recetor.

Para a segunda experiência, os transmissores foram colocados numa passadeira enquanto o recetor estava no interior de um veículo. Neste caso, tratámos os smartphones como se fossem peões parados na passadeira. Acelerámos o veículo e mantivemos várias velocidades constantes para ver quanto tempo o recetor demorava a detetar os anúncios antes do veículo atravessar a passadeira. O recetor registou um timestamp do momento em que o veículo atravessou a passadeira e foi efetuada uma comparação entre esse valor e o timestamp dos primeiros anúncios recebidos de cada transmissor. A diferença entre os timestamps deu-nos o tempo que levaria para o veículo colidir com um peão parado desde o momento em que o veículo recebeu o primeiro anúncio do peão. Como o veículo estava a mover-se a uma velocidade constante, também é possível calcular a que distância o transmissor estava do recetor no momento em que o primeiro anúncio foi recebido.

A Tabela 2 mostra os resultados desta experiência, indicando o tempo até a colisão do veículo (TTC - Time to Collision) com um peão a diferentes velocidades. A Tabela 3 mostra os mesmos resultados, mas converte o tempo em distância para dar uma ideia melhor de quão longe o sinal Bluetooth foi detetado pela primeira vez. O teste com maior velocidade foi efetuado a 50 km/h para obter valores para situações ligeiramente acima do limite de velocidade do local.

**Table 2.** Tempo previsto de colisão do peão com o veículo a diferentes velocidades

Smartphone	TTC (s) 20 km/h	TTC (s) 40 km/h	TTC (s) 50 km/h
Galaxy A23 5G	29	9	7
Galaxy S20	17	16	5
HUAWEI P smart 2019	18	10	8

**Table 3.** Distância entre o peão e o veículo quando o primeiro anúncio é recebido pelo veículo

Smartphone	Dist. ao recetor (m)	Dist. ao recetor (m)	Dist. ao recetor (m)
	20 km/h	40 km/h	50 km/h
Galaxy A23 5G	159	103	104
Galaxy S20	99	175	67
HUAWEI P smart 2019	100	115	109

Para a terceira experiência, repetimos a segunda experiência com o recetor e os transmissores trocados: o recetor estava ao lado da passadeira a atuar como uma Roadside Unit (RSU) a receber anúncios de veículos, enquanto os transmissores estavam dentro do veículo a atuar como vários veículos a transmitir anúncios. Acelerámos novamente o veículo em direção à passadeira e mantivemos várias velocidades constantes, com o recetor a medir quanto tempo demorava a detetar os anúncios dos transmissores que estavam dentro do veículo. Desta vez não testámos a experiência com o veículo a uma velocidade constante de 50 km/h porque era uma velocidade demasiado rápida para aquela rua específica.

A Tabela 4 mostra os resultados desta experiência, indicando o tempo até o veículo passar pela RSU a diferentes velocidades. A Tabela 5 mostra os mesmos resultados, mas converte o tempo em distância para dar uma ideia melhor de quão longe o sinal Bluetooth foi detetado pela primeira vez.

**Table 4.** Tempo previsto para cada veículo atravessar a passadeira depois da RSU receber a primeira mensagem

Smartphone	TTC (s) 20 km/h	TTC (s) 40 km/h
Galaxy A23 5G	27	11
Galaxy S20	15	6
HUAWEI P smart 2019	23	13

Estes resultados deram-nos uma boa estimativa do tempo que tínhamos para notificar cada entidade. É de destacar que estas experiências foram realizadas numa estrada com uma curva ligeira e que o recetor detetou a maioria dos anúncios BLE antes de haver uma linha de visão entre o recetor e os transmissores na maioria dos casos.

**Table 5.** Distância entre a RSU e o veículo no momento em que o primeiro anúncio é recebido pela RSU

Smartphone	Distância ao recetor (m) 20 km/h	Distância ao recetor (m) km/h
Galaxy A23 5G	150	122
Galaxy S20	83	62
HUAWEI P smart 2019	127	145

## 2.2 Codificação de Mensagens

Um anúncio BLE pode conter uma estrutura de dados até 31 bytes [17]. No entanto, dependendo do tipo de estrutura, alguns bytes são reservados para o cabeçalho. O tipo de dados escolhido foi o *Manufacturer-Specific Data*, onde o primeiro byte indica o comprimento da estrutura, o segundo byte indica o tipo de anúncio e os dois bytes seguintes indicam o ID do fabricante. Isso deixa-nos com 27 bytes para dados úteis.

As PSMs, definidas no padrão SAE J2735 [14], são utilizadas para transmitir dados de segurança sobre VRUs, incluindo as posições dos peões. Dependendo da codificação das mensagens, podem ocupar apenas 26 bytes contendo apenas os campos exatamente necessários. Assim, é possível incorporar PSMs em pacotes de anúncios BLE.

A estrutura de dados PSM é definida usando a notação *Abstract Syntax Notation Revision One* e deve ser codificada com um dos conjuntos padrão de regras de codificação para objetos ASN.1.

No total, a codificação da PSM ocupa 204 bits que, após preencher o último octeto, ocupa 26 bytes. 26 bytes mais os 4 bytes necessários para os cabeçalhos do anúncio totalizam 30 bytes, que estão dentro do tamanho máximo da estrutura de dados de 31 bytes. Ainda é possível incluir informações opcionais na PSM, pois ainda temos 12 bits restantes antes de exceder o tamanho máximo dos anúncios.

## 3 Trabalho Relacionado

Wu et al. desenvolveram o BLE-Horn [18], uma aplicação Android que utiliza BLE para suportar a comunicação bidirecional entre veículos e peões em cruzamentos. Isto é conseguido ao incluir dados GPS comprimidos nos anúncios BLE. Tanto os peões quanto os veículos transmitem os seus dados GPS, e um algoritmo de prevenção de colisões prevê a probabilidade de colisão entre eles com base nos dados. Na nossa solução, incluímos uma PSM padrão nos anúncios e, ao ter apenas os peões a enviar estes pacotes, estamos a reduzir a probabilidade de perda de pacotes.

Ho e Chen [8] apresentam um sistema semelhante ao BLE-Horn, mas em vez de utilizar Bluetooth é utilizado o sistema Wi-Fi. Para transmitir informações GPS, o dispositivo do peão é configurado para o modo AP (Access Point) e o SSID (service set identifier) é substituído pelas informações GPS. O SSID é

transmitido em mensagens beacon a cada 100ms, como as Basic Safety Messages (BSM) em veículos, e estas mensagens podem ser recebidas por cartões Wi-Fi de baixo custo ou smartphones convencionais. Embora esta abordagem utilize Wi-Fi para comunicação com baixo consumo de energia, semelhante ao BLE, o Wi-Fi ainda consome geralmente mais energia do que o BLE [1].

Quack et al. [13] propõem um algoritmo para rastrear utilizadores da estrada, tanto veículos quanto peões, utilizando múltiplos sensores. A configuração dos sensores inclui Lidar, câmaras e sensores ultrassónicos na infraestrutura, GPS em smartphones e veículos. Os veículos enviam adicionalmente os seus próprios dados de sensores, como modelos Lidar e imagens de câmaras. Os utilizadores da estrada enviam os seus dados para um centro de processamento que utiliza um algoritmo que corrige explicitamente as medições com atraso temporal.

A partir destes trabalhos focados na fusão de sensores, vemos a possibilidade de integrar comunicações BLE entre smartphones e RSUs para fornecer informações adicionais sobre as posições dos peões, o que poderia melhorar a precisão dos algoritmos de posicionamento de peões.

Luomala et al. [9] investigam os efeitos da temperatura e humidade nos sinais de rádio, nomeadamente na banda dos 2.4GHz, a mesma que BLE utiliza. Os autores utilizam transmissores rádio para as emissões, sensores para receber esses sinais e sensores para detetar a temperatura e humidade. Concluem que a temperatura é o maior fator e que tem uma relação linearmente negativa com a intensidade do sinal, i.e. à medida que a temperatura sobe, a intensidade detetada desce. Contudo, existem outros estudos semelhantes e os autores reconhecem que não existe consenso nos efeitos da temperatura e humidade nos sinais. Alguns estudos concluem que as ondas rádio propagam melhor em condições de alta humidade [15], outros que condições como chuva, neve e alta humidade causam perdas na conectividade [4] e outros que o efeito de chuva no sinal captado não é significativo [3].

Gelbal et. al [7] utilizam o modo LE Coded PHY do BLE em smartphones de peões em circulação para emitir PSMs. Estas PSMs são recebidas em smartphones dentro de veículos em NLOS (Non-Line-of-Sight) a correr um algoritmo de deteção de colisões. Dependendo de quão perto o veículo e o peão estão de colidir, o algoritmo devolve vários níveis de aviso. A implementação do nosso trabalho varia no modo Bluetooth utilizado, pois o nosso utiliza o modo 1M PHY sem extended advertisements, o que torna a nossa comunicação compatível com mais dispositivos. Num whitepaper da Tome Software [16], em que demonstram um trabalho parecido, também mostram testes de consumo de bateria dependendo do modo de rádio utilizado. Nestes testes, o modo 1M PHY sem extended advertisements é o que gasta menos bateria em todos os casos de teste.

## 4 Solução Proposta

A nossa solução proposta utiliza o modo de rádio 1M PHY que foi introduzido pelo BLE na versão do Bluetooth 4.0. Contudo, existem outros modos de rádio [11] que foram introduzidos na versão Bluetooth 5.0, nomeadamente o modo 2M PHY

e LE Coded PHY. O modo 1M PHY tem uma velocidade de transferência de 1 Mb/s, enquanto o modo 2M PHY transfere a 2 Mb/s mas não tem tanto alcance como o modo 1M PHY. O modo LE Coded é o modo com mais alcance, mas sacrifica velocidade de transferência. Bluetooth 5.0 também introduziu Extended Advertising que permite enviar payloads com uma capacidade de 255 bytes. Em comparação, Legacy Advertising (sem usar extensões) permite payloads de 31 bytes. Os payloads dos extended advertisements podem também ser enviados em cadeia, possibilitando enviar até um total de 1650 bytes.

As nossas experiências preliminares mostraram que podíamos usar Bluetooth com performance adequada e codificar dados seguindo as normas. O passo seguinte foi calcular a probabilidade de impacto com um VRU. Para este propósito, adaptámos um algoritmo de Qu et al. [12].

Primeiro, o algoritmo utiliza a posição relativa e a distância entre o veículo e o peão para calcular o ponto onde irão intersectar-se e possivelmente colidir. Em seguida, utiliza a velocidade do veículo e do peão para calcular quanto tempo cada um leva para entrar e sair do ponto de interseção. Dependendo da precisão das localizações GPS, o algoritmo emite um aviso de nível alto ou médio se for prevista uma colisão. Se não for prevista uma colisão às velocidades atuais do veículo e do peão, mas ainda assim houver proximidade, emite um aviso de baixo nível. Se não houver interseção, mas um peão estiver próximo, o algoritmo simplesmente notifica o veículo.

Os possíveis resultados do algoritmo são apresentados de seguida:

- NO\_COLLISION significa que o veículo e o peão nunca se irão intersectar.
- PEDESTRIAN\_NEARBY significa que não ocorrerá colisão, mas a distância entre o veículo e o peão  $X_{vp}$  é inferior a um certo valor.
- PEDESTRIAN\_LOS significa o veículo e o peão irão intersectar-se em algum ponto mas, às suas velocidades atuais, ou o veículo ou o peão já terão saído do ponto de interseção onde poderia ter ocorrido uma colisão.
- COLLISION\_PROBABLE significa que ocorrerá uma colisão e que a precisão das localizações do veículo e do peão são mais imprecisas do que o limite de precisão.
- COLLISION\_IMMINENT significa que ocorrerá uma colisão e que a precisão das localizações do veículo e do peão são mais precisas do que o limite de precisão.

Para calcular o *TTC* (Time to Collision), calculamos primeiro 4 tempos:  $T_{sv}$  e  $T_{sp}$  que representam o tempo até a frente do veículo e do peão começarem a entrar no ponto de colisão.  $T_{ev}$  e  $T_{ep}$  representam o tempo até a traseira do veículo e do peão saírem do ponto de colisão. Estes tempos são calculados sabendo o comprimento  $W$  e largura  $L$  do peão e veículo, as suas velocidades atuais e as suas distâncias até ao ponto de interseção. Se o intervalo  $[T_{sv}, T_{ev}]$  intersectar com o intervalo  $[T_{sp}, T_{ep}]$  então existe colisão e *TTC* toma o valor da primeira interseção dos intervalos.

Se *TTC* existir e os dados de posição forem exatos o suficiente, o algoritmo emite COLLISION\_IMMINENT. Caso não forem exatos o suficiente, emite

**COLLISION\_PROBABLE.** Se  $TTC$  não existir mas as trajetórias intersectarem nalgum ponto, o algoritmo emite **PEDESTRIAN\_LOS**. Caso as trajetórias nunca intersectem mas existir algum peão próximo o suficiente, emite **PEDESTRIAN\_NEARBY**. Caso contrário, emite **NO\_COLLISION**.

Os valores por omissão que escolhemos para teste foram os seguintes:  $W_v = 2$ ;  $L_v = 5$ ;  $W_p = 1$ ;  $L_p = 1$ ; limiar de  $X_{vp} = 5$ ; limiar de precisão = 4.5;

O algoritmo original é usado para detetar colisões entre dois veículos, enquanto o nosso algoritmo deteta colisões entre um veículo e um peão. Este algoritmo difere do original na forma como determina os tempos em  $T_{sv}$ ,  $T_{sp}$ ,  $T_{ev}$  e  $T_{ep}$ . O método para calcular o  $TTC$  também é simplificado: simplesmente toma o valor do momento em que os intervalos de tempo se intersectam pela primeira vez.

Desenvolvemos uma aplicação Android com dois ecrãs principais: o ecrã *Pedestrian*, onde o utilizador pode iniciar ou parar a transmissão da posição do smartphone através de anúncios BLE; e o ecrã *Driver*, onde o utilizador pode iniciar ou parar a procura desses pacotes.

A aplicação atualiza frequentemente a posição GPS atual com o intervalo mais rápido permitido pelo Android e transmite os pacotes de anúncio a cada 100ms. Assim que a aplicação deteta uma mudança na posição GPS atual, gera uma nova PSM com a posição e atualiza o pacote de anúncio com esta PSM.

No ecrã *Driver*, cada vez que a aplicação recebe um anúncio BLE, descodifica a PSM e gera um objeto de Localização com base nas informações descodificadas. Em seguida, a aplicação executa o algoritmo de deteção de colisão com a localização do peão e a localização mais recente conhecida do condutor. Dependendo do resultado do algoritmo, o ecrã pisca uma certa cor e exibe texto no ecrã.

## 5 Resultados Experimentais

### 5.1 Testes iniciais

Primeiro, avaliámos a nossa aplicação em testes de campo em cenários da vida real. Verificou-se a que distância um condutor a usar a aplicação poderia capturar anúncios BLE de peões, e também a rapidez com que eram detetados se o veículo estivesse em movimento. Nestas experiências, a aplicação utilizou a frequência máxima de emissão de anúncios e a potência máxima de transmissão permitida pelo sistema operativo Android, um intervalo de anúncios de 100ms e uma potência de transmissão de 1 dBm.

A Tabela 6 mostra os diferentes modelos de smartphones utilizados juntamente com a versão Bluetooth e a distância à qual foram detetados pela primeira vez enquanto se aproximavam lentamente do veículo a correr a aplicação.

Para testar a rapidez com que a aplicação capturava os anúncios, primeiro colocámos 3 smartphones ao lado de uma passadeira de peões a executar a aplicação e começámos a transmitir. Em seguida, utilizámos um smartphone a executar a aplicação dentro de um veículo para procurar estes anúncios. Acelerámos o veículo e mantivemos várias velocidades constantes para ver quanto

**Table 6.** Distância máxima de leitura

Smartphone	Bluetooth Version	Distância ao recetor (m)
Galaxy A52 5G	5.0	205
Xperia X	4.2	88
Zenfone 7 PRO	5.0	53

tempo a aplicação demorava a detetar os anúncios antes do veículo atravessar a passadeira. No veículo registamos o momento em que o veículo atravessou a passadeira e comparámos com os timestamps dos primeiros anúncios recebidos de cada smartphone transmissor. Subtraindo esses timestamps, obtivemos o tempo que o veículo levaria para colidir com um peão parado desde o momento em que o veículo recebeu o primeiro anúncio do peão. O smartphone que fazia scan dos anúncios dentro do veículo era um Samsung Galaxy S20 a correr Android 13 com Bluetooth 5.0.

A Tabela 7 mostra os resultados desta experiência, indicando o tempo até o veículo colidir com um peão a diferentes velocidades. Estes testes foram realizados na mesma estrada ligeiramente curva usada nos testes iniciais de Bluetooth, sem linha de visão direta, mas desta vez sob chuva intensa.

**Table 7.** Tempo previsto para colisão com o veículo a velocidades variáveis

Smartphone	TTC (s) 20km/h	TTC (s) 40km/h	TTC (s) 50km/h
Galaxy A52 5G	24.7	10.2	3.4
Xperia X	3.8	5.2	4.2
Zenfone 7 PRO	3.6	1.1	0.6

## 5.2 Testes Iniciais do Algoritmo

Realizámos outro teste para verificar se o algoritmo estava a funcionar numa pequena escala. Neste teste, duas pessoas, uma ao lado da outra, estavam a correr a aplicação nos seus próprios smartphones. Um smartphone estava a atuar como o veículo e o outro como o peão. Para este teste, a pessoa com o smartphone a atuar como o veículo começa a fazer scan de anúncios, corre 100m em linha reta afastando-se do peão e depois corre de volta.

Esta é uma versão condensada do log onde cada entrada representa uma mudança no resultado da colisão. Nas entradas seguintes, V representa a velocidade do veículo em metros por segundo.

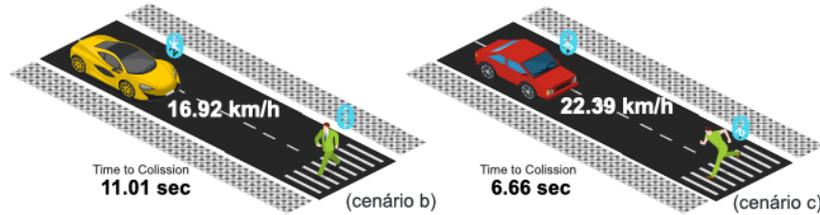
```
16:15:05.615 pedestrian_nearby V: 0.26 TTC: -1.00 Xvp: 2.88
%16:15:10.540 no_collision V: 1.29 TTC: -1.00 Xvp: 5.29
%16:15:23.693 collision_probable V: 0.79 TTC: 121.24 Xvp: 98.27
16:15:24.373 pedestrian_los V: 0.84 TTC: -1.00 Xvp: 97.50
16:15:28.057 collision_probable V: 5.07 TTC: 14.92 Xvp: 78.17
%16:15:29.677 pedestrian_los V: 5.70 TTC: -1.00 Xvp: 67.11
```

```

16:15:32.423 pedestrian_los V: 5.88 TTC: -1.00 Xvp: 54.98
16:15:33.374 collision_probable V: 4.59 TTC: 10.07 Xvp: 48.78
16:15:33.785 pedestrian_los V: 4.93 TTC: -1.00 Xvp: 43.50
16:15:43.164 pedestrian_nearby V: 3.05 TTC: -1.00 Xvp: 3.60

```

### 5.3 Resultados do algoritmo



**Fig. 1.** Cenários de teste (b) Peão atravessa a trajetória a andar e (c) a correr

Para o teste principal do algoritmo, utilizámos 7 cenários diferentes, 2 dos estão ilustrados na Figura 1:

- (a) peão parado na trajetória do veículo;
- (b) peão a andar para atravessar a trajetória do veículo;
- (c) peão a correr para atravessar a trajetória do veículo;
- (d) peão a andar ao longo da trajetória do veículo;
- (e) peão a correr ao longo da trajetória do veículo;
- (f) peão a andar diretamente em direção a um veículo em marcha-atrás;
- (g) peão a andar para atravessar a trajetória de um veículo em marcha-atrás.

Os cenários (b) e (c) são também cenários alvo nos testes Euro NCAP para *Autonomous Emergency Braking* (AEB) [6].

Resultados:

- (a) Colisão mais precoce detetada com TTC de 8.36s com o veículo a 5.48 m/s;
- (b) Colisão mais precoce detetada com TTC de 11.01s com o veículo a 4.70 m/s;
- (c) Colisão mais precoce detetada com TTC de 6.66s com o veículo a 6.22 m/s;
- (d) Nenhuma colisão foi detetada;
- (e) Nenhuma colisão foi detetada;
- (f) Colisão mais precoce detetada com TTC de 5.89s com o veículo a 2.0 m/s;
- (g) Nenhuma colisão foi detetada.

Nestes testes, o smartphone dentro do veículo era um Samsung Galaxy A23 5G a correr Android 14 com Bluetooth 5.1, enquanto o smartphone do peão era um Samsung Galaxy A52s 5G, a correr Android 14 com Bluetooth 5.0.

Os excertos de *logs* seguintes mostram apenas alguns cenários onde cada entrada representa uma mudança no resultado da colisão.

- (a) Peão parado no meio da estrada

```

18:50:16.793 no_collision V: 0.02 TTC: -1.00 Xvp: 110.53
18:50:27.957 pedestrian_los V: 5.68 TTC: -1.00 Xvp: 53.88
18:50:28.921 collision_imminent V: 5.48 TTC: 8.36 Xvp: 48.49
18:50:30.964 pedestrian_los V: 5.27 TTC: -1.00 Xvp: 38.43
18:50:32.037 collision_imminent V: 4.71 TTC: 6.22 Xvp: 33.51

```

(b) Peão a andar para atravessar a trajetória do veículo

```

18:52:16.827 no_collision V: 5.68 TTC: -1.00 Xvp: 76.26
18:52:18.049 pedestrian_los V: 5.17 TTC: -1.00 Xvp: 65.28
18:52:21.018 collision_probable V: 4.70 TTC: 11.01 Xvp: 51.69
18:52:21.554 pedestrian_los V: 4.60 TTC: -1.00 Xvp: 48.53
18:52:21.960 collision_probable V: 4.59 TTC: 9.01 Xvp: 46.30
18:52:27.959 collision_imminent V: 6.22 TTC: 1.37 Xvp: 11.59

```

(c) Peão a correr para atravessar a trajetória do veículo

```

18:54:58.984 pedestrian_los V: 6.19 TTC: -1.00 Xvp: 37.70
18:54:59.947 collision_imminent V: 7.06 TTC: 3.53 Xvp: 31.47
18:55:01.026 pedestrian_los V: 6.68 TTC: -1.00 Xvp: 24.92
18:55:03.061 collision_imminent V: 2.22 TTC: 3.97 Xvp: 15.96

```

(d) Peão a andar na mesma direção do veículo

```

18:56:49.782 no_collision V: 0.39 TTC: -1.00 Xvp: 27.72
18:56:53.043 pedestrian_los V: 3.26 TTC: -1.00 Xvp: 25.73

```

(e) Peão a correr na mesma direção do veículo

```

18:58:31.700 no_collision V: 6.94 TTC: -1.00 Xvp: 18.23
18:58:31.970 pedestrian_los V: 6.74 TTC: -1.00 Xvp: 12.30
18:58:36.611 pedestrian_nearby V: 6.81 TTC: -1.00 Xvp: 4.18

```

## 6 Discussão

Os resultados dos testes iniciais da aplicação não foram tão bons como os primeiros com a aplicação nRF e o scanner Bleak, especialmente a velocidades mais altas. No entanto, é importante ter em conta que os modelos de smartphones eram diferentes e que estava a chover intensamente.

Os anúncios não foram detetados tão rapidamente, mas com os resultados da Tabela 6, podemos ver o potencial de alcance do BLE, com um dos smartphones a ser detetado a mais de 200m de distância.

Os valores pré-definidos para a largura e comprimento de veículos e peões foram definidos acima da média, para aumentar a probabilidade de deteção. Apesar do risco de incrementar os falsos positivos, demos prioridade à segurança.

Nos cenários (a), (b), (c) e (f), onde era de esperar uma colisão, o algoritmo funcionou corretamente ao retornar `COLLISION_PROBABLE` ou `COLLISION_IMMINENT`. Nos cenários (d) e (e), o peão a andar e a correr ao longo do caminho do veículo, nenhuma colisão foi detetada, portanto, não houve falsos positivos.

Apenas no cenário (g), onde era de esperar uma colisão, o algoritmo nunca retornou um aviso de colisão, retornando apenas `NO_COLLISION`, `PEDESTRIAN_LOS`

e PEDESTRIAN\_NEARBY. Este falso negativo foi causado por imprecisões na direção reportada pelo smartphone do peão. Enquanto a direção do peão deveria ter sido idêntica à direção do veículo mais  $90^\circ$ , tal como nos cenários (b) e (c), neste caso, os valores de direção variaram muito.

Observámos que a precisão da direção tende a aumentar com a velocidade, portanto, o problema pode dever-se ao facto da baixa velocidade do peão.

Na maioria dos testes, COLLISION\_PROBABLE ocorreu mais frequentemente do que COLLISION\_IMMINENT, o que significa que o valor de precisão da posição dos smartphones era superior a 4,5m na maioria das vezes, uma vez que esse era o limiar de precisão que escolhemos para os testes. O maior obstáculo para obter melhores resultados com o algoritmo atual é a precisão do GPS, pois já temos bons resultados com a rapidez com que os primeiros pacotes de anúncios BLE podem ser detetados.

## 7 Trabalho Futuro

A PSM também possui muitos campos opcionais que a nossa aplicação poderia aproveitar, visto que ainda há 12 bits de espaço livre na estrutura de dados. Alguns campos interessantes podem incluir `crossRequest` ou `crossState`, que representam a intenção ou estado de atravessar a estrada, `assistType`, que indica necessidades especiais dos peões (e.g. visão, audição e movimento), entre outros campos. É de particular interesse saber se o peão tem um movimento mais lento, como um idoso, ou um movimento mais errático, como uma criança a brincar na rua, pois isso afeta significativamente a precisão da direção.

Estamos a usar PSMs, que são um standard da SAE, mas o nosso sistema é agnóstico ao tipo de mensagens utilizadas. Isso significa que também poderíamos usar mensagens VAM do padrão ETSI [5]. As VAM poderiam ser úteis porque os campos de direção e velocidade também contêm intervalos de confiança que poderíamos adaptar para tornar o algoritmo mais preciso.

O BLE tem diferentes camadas físicas para escolher. Embora tenhamos escolhido 1M PHY por ser mais compatível com smartphones mais antigos e ter maior alcance do que 2M PHY, pode ser útil experimentar com o mais recente Coded PHY, que deve ter um maior alcance de comunicação [11].

O nosso trabalho permite o desenvolvimento de funcionalidades importantes de segurança nas interfaces de utilizador. Um exemplo útil seria avisar os corredores equipados com auriculares, que podem estar distraídos enquanto correm. O corredor poderia ser avisado por áudio de que um veículo está a aproximar-se. Há também o benefício adicional de os corredores geralmente se moverem a velocidades mais altas do que outros peões, portanto, os dados do sensor de direção tendem a ser mais precisos.

## 8 Conclusão

Dado que hoje em dia a grande maioria das pessoas leva consigo um smartphone ou dispositivos semelhante, abre-se uma oportunidade para trocar informações

entre peões e veículos para aumentar a segurança rodoviária. Avaliámos a eficácia do BLE para comunicação entre veículos e peões, com smartphones a transmitirem a sua posição e trajetória para veículos próximos através de uma aplicação que envia mensagens PSM usando BLE. Demonstrámos que esta informação pode melhorar os sistemas de deteção de colisão e fornecer avisos antecipados aos peões. Os testes apresentaram resultados promissores, com o algoritmo a emitir consistentemente avisos corretos.

Isto leva-nos a antecipar que esta tecnologia poderia levar a melhorias significativas na segurança rodoviária.

## References

1. Abedi, A., Abari, O., Brecht, T.: Wi-LE: Can WiFi Replace Bluetooth? In: Proceedings of the 18th ACM Workshop on Hot Topics in Networks. pp. 117–124. HotNets '19, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA (Nov 2019). <https://doi.org/10.1145/3365609.3365853>, <https://doi.org/10.1145/3365609.3365853>
2. Blihd, H.: Bleak (Oct 2023), <https://github.com/hbldh/bleak>, original-date: 2018-04-26T21:15:45Z
3. Boano, C.A., Brown, J., He, Z., Roedig, U., Voigt, T.: Low-Power Radio Communication in Industrial Outdoor Deployments: The Impact of Weather Conditions and ATEX-Compliance. In: Komninos, N. (ed.) Sensor Applications, Experimentation, and Logistics. pp. 159–176. Springer, Berlin, Heidelberg (2010). [https://doi.org/10.1007/978-3-642-11870-8\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-642-11870-8_11)
4. Capsuto, B., Frolik, J.: A System to Monitor Signal Fade Due to Weather Phenomena for Outdoor Sensor Systems. In: Fifth International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN 2006) (2006)
5. ETSI: TS 103 300-3 - V2.2.1 - Intelligent Transport Systems (ITS); Vulnerable Road Users (VRU) awareness; Part 3: Specification of VRU awareness basic service; Release 2 (Feb 2023)
6. Euro NCAP: Euro NCAP AEB LSS VRU Test Protocol - v4.5.1 (Feb 2024), <https://www.euroncap.com/media/80156/euro-ncap-aeb-lss-vru-test-protocol-v451.pdf>
7. Gelbal, S.Y., Cantas, M.R., Guvenc, B.A., Guvenc, L., Surnilla, G., Zhang, H.: Mobile Safety Application for Pedestrians Utilizing P2V Communication over Bluetooth. SAE Technical Paper 2022-01-0155, SAE International, Warrendale, PA (Mar 2022). <https://doi.org/10.4271/2022-01-0155>, <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2022-01-0155/>, iISSN: 0148-7191, 2688-3627
8. Ho, P.F., Chen, J.C.: WiSafe: Wi-Fi Pedestrian Collision Avoidance System. IEEE Transactions on Vehicular Technology **66**(6), 4564–4578 (Jun 2017). <https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2598786>, <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7539332>, conference Name: IEEE Transactions on Vehicular Technology
9. Luomala, J., Hakala, I.: Effects of temperature and humidity on radio signal strength in outdoor wireless sensor networks. In: 2015 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS). pp. 1247–1255 (Sep 2015). <https://doi.org/10.15439/2015F241>, <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7321587>

10. Nordic Semiconductor ASA: nRF Connect for Mobile, <https://play.google.com/store/apps/details?id=no.nordicsemi.android.mcp>
11. Ortiz, J.C.G., Silvestre-Blanes, J., Sempere-Payá, V.M., Frau, D.C.: Evaluation of improvements in BLE Mesh through CODED PHY. In: 2021 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA ). pp. 1–4 (Sep 2021). <https://doi.org/10.1109/ETFA45728.2021.9613315>, <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9613315>
12. Qu, C., Qi, W.Y., Wu, P.: A High Precision and Efficient Time-to-Collision Algorithm for Collision Warning Based V2X Applications. In: 2018 2nd International Conference on Robotics and Automation Sciences (ICRAS). pp. 1–5 (Jun 2018). <https://doi.org/10.1109/ICRAS.2018.8443265>, <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8443265>
13. Quack, T., Hekeler, F.J., Abel, D.: Infrastructure-Based Tracking of Road Users in Urban Intersections for Partially Available, Variable-Delay Sensor Data. In: 2018 26th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED). pp. 1–7 (Jun 2018). <https://doi.org/10.1109/MED.2018.8442691>, <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8442691>, iISSN: 2473-3504
14. SAE International: V2X Communications Message Set Dictionary (Sep 2023)
15. Thelen, J., Thelen, J., Goense, D., Goense, D., Langendoen, K.: Radio Wave Propagation in Potato Fields. In: 1st Workshop on Wireless Network Measurements (WiNmee 2005). Riva del Garda, Trentino, Italy (Apr 2005)
16. Tome Software: Updating the Basic Safety Message to communicate Vulnerable Road User (VRU) information using Bluetooth 5. White Paper, Tome Software (Oct 2019), <https://www.tomesoftware.com/wp-content/uploads/2019/10/B2V-Whitepaper-VRU-BSMs-over-BT5-October-28-2019.pdf>
17. Tosi, J., Taffoni, F., Santacatterina, M., Sannino, R., Formica, D.: Performance Evaluation of Bluetooth Low Energy: A Systematic Review. *Sensors* **17**(12), 2898 (Dec 2017). <https://doi.org/10.3390/s17122898>, <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/12/2898>, number: 12 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute
18. Wu, M., Ma, B., Liu, Z., Xiu, L., Zhang, L.: BLE-horn: A smartphone-based bluetooth low energy vehicle-to-pedestrian safety system. In: 2017 9th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). pp. 1–6 (Oct 2017). <https://doi.org/10.1109/WCSP.2017.8171180>, <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8171180>, iISSN: 2472-7628
19. Xu, Z., Deng, H., Zhang, R., Yang, L.: An Efficient Multi-Sensor Fusion Protocol in a Vehicle-Road Collaborative System. In: 2021 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). pp. 1161–1165 (Jul 2021). <https://doi.org/10.1109/ICCC52777.2021.9580364>, iISSN: 2377-8644