

Avaliação Experimental da Acurácia e da Precisão de Tecnologias de Comunicação visando Auto-localização em Redes Veiculares

Marcia Pasin*, Ricardo Silveira Rodrigues*, Leonardo de Abreu Schmidt* e Renato Machado†

*Centro de Tecnologia (CT)

Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria - RS, Brasil

Email: {marcia, rrodrigues, lschmidt}@inf.ufsm.br

†Departamento de Telecomunicações

Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos - SP, Brasil

Email: rmachado@ita.br

Resumo—Sistemas de geoposicionamento comerciais não operam adequadamente em ambientes fechados e perdem eficiência em regiões com sombreamento. Como consequência, a precisão e acurácia desses sistemas não são suficientes para serem considerados em muitas aplicações de VANETs (*vehicular ad hoc networks*). Como solução alternativa, dispositivos de comunicação sem fio podem ser usados para apoiar métodos de auto-localização em VANETs, tanto em ambientes internos quanto externos. Neste artigo, dispositivos de comunicação sem fio disponíveis comercialmente são avaliados experimentalmente visando auto-localização de veículos. Verificou-se que, para um serviço de localização em ambientes internos, a tecnologia Bluetooth tem maior acurácia e maior precisão que o Wi-Fi. Em contrapartida, o sinal Wi-Fi tem maior alcance que o sinal Bluetooth. Em relação à tecnologia LoRa, um estudo mais aprofundado para sua aplicação em VANETs se faz necessário.

I. INTRODUÇÃO

VANETs (*vehicular ad hoc networks*) caracterizam-se pela comunicação entre veículos (V2V) e entre veículos e infraestrutura (V2I). Auto-localização é um serviço chave para muitas aplicações de VANETs. Apesar de ser tipicamente provido por GPS, este serviço não pode depender exclusivamente de sinais de satélites, uma vez que há ambientes onde o sinal não é recebido com intensidade suficiente para ser decodificado, como em estacionamentos subterrâneos e em túneis. Além disso, muitas vezes a acurácia e a precisão oferecidas pelos dispositivos que operam usando o serviço de satélites não é suficiente para aplicações em VANETs como, por exemplo, controle de interseções, conforme ilustra a Fig. 1.

Como alternativa ao uso de sinais de satélites, a localização de veículos pode ser feita usando apenas recursos locais [1]. Nesse caso, a localização é determinada por coordenadas de referência. De fato, para um veículo autônomo encontrar uma vaga em um estacionamento subterrâneo, como ilustra a Fig. 2, as coordenadas globais não são importantes, mas sim as coordenadas locais.

Uma possível solução, levando-se em conta apenas coordenadas locais, para determinar a posição relativa do veículo em ambientes internos (*indoor*) e externos (*outdoor*) é considerar as informações obtidas por uma rede de sensores. Um sensor é um dispositivo com a capacidade de medir o ambiente, calcular e se comunicar para observar ou reagir a um determinado evento [2].

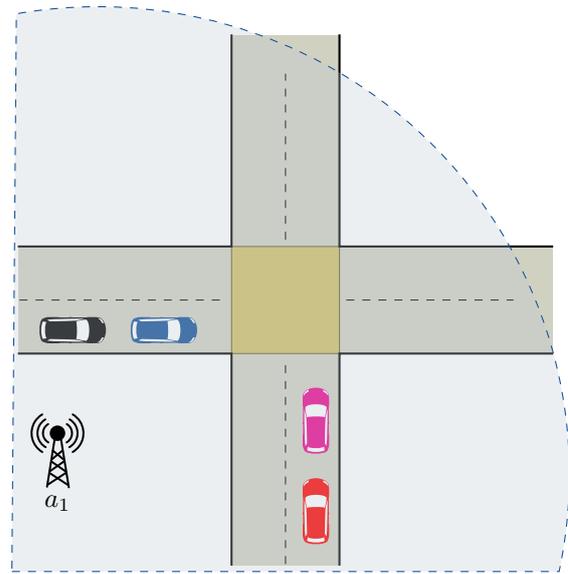


Figura 1. Ilustração de uma situação de interseção de trânsito onde os veículos realizam comunicação V2V para tomada de decisão sobre qual deve ser a ordem de passagem na interseção.

Sensores colaborativos dispersos em um ambiente podem ser usados para detectar e determinar a localização de veículos. Entretanto, sensores e dispositivos de comunicação disponíveis comercialmente ainda precisam ser melhor estudados, testados e possivelmente melhorados para que se tornem viáveis para aplicações em VANETs. Assim como sistemas baseados em satélites, sensores e demais módulos também possuem limitações que precisam ser consideradas na implementação de serviços de localização.

Este artigo investiga como diferentes tecnologias de comunicação sem fio podem ser usadas como alternativa a sistemas que usam sinal do satélite para auto-localização de veículos em ambientes internos e externos. O uso de tecnologias de comunicação para a auto-localização como alternativa a soluções baseadas em sinais de constelações de satélite não é uma ideia nova. Uma classificação de tecnologias de redes de sensores em relação ao serviço de localização foi apresentada em Liu et al. [3]. Mais recentemente, Zafari et al. [4] avaliaram métricas como uso de energia, disponibilidade, custo, alcance, latência,

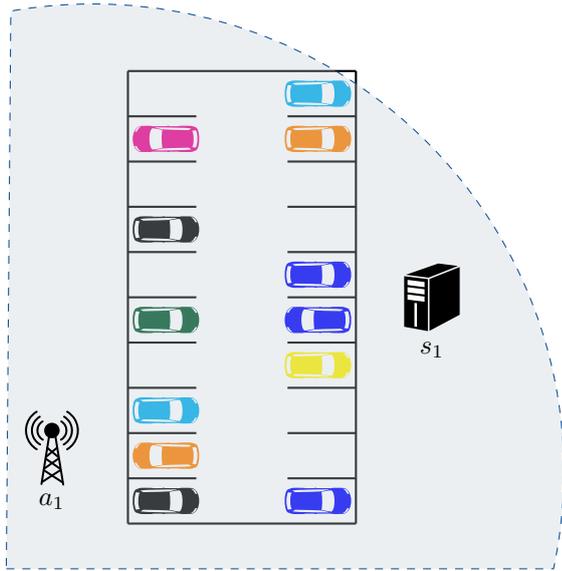


Figura 2. Ilustração de um estacionamento onde uma central s_1 aloca veículos a vagas com o suporte de comunicação V2I.

escalabilidade e acurácia quantitativa visando o uso de tecnologias de comunicação para a localização *indoor*. Em contraste, neste artigo dispositivos de comunicação são avaliados **experimentalmente** para a tarefa de localização, usando a plataforma Arduino¹. Acurácia e precisão na recepção do sinal foram computadas para diferentes tecnologias de comunicação (Bluetooth, Wi-Fi, LoRa) e para o sensor ultrassônico, usando a informação da intensidade do sinal como dado de entrada.

O artigo está organizado como segue. A Seção II apresenta conceitos básicos de auto-localização e métodos para localização. A Seção III discute tecnologias de comunicação sem fio visando localização em VANETs através de experimentos. A Seção IV apresenta as conclusões.

II. AUTO-LOCALIZAÇÃO: CONCEITO E MÉTODOS

A localização, ou a auto-localização quando é executada pelo próprio interessado, consiste na tarefa de calcular para um nodo v com localização desconhecida a posição $p_v(x, y)$ usando como entrada a posição de outros nodos com localização conhecida chamados de **nodos âncoras**.

Tipicamente, a localização de nodos em ambientes externos é efetuada com o apoio de sinais de sistemas de constelação de satélites, como o NAVSTAR *Global Positioning System* (GPS), o GLONASS, o Galileo e o Compass. Cada satélite transmite continuamente um sinal de rádio contendo sua posição atual. O receptor recebe os sinais de pelo menos quatro satélites e aplica um algoritmo de **multilateração** para determinar sua posição, que geralmente é convertida em medidas de latitude, longitude e altitude. Quanto maior for o número de satélites visíveis, maior é a acurácia da solução.

¹<https://www.arduino.cc/>

A. Multilateração

A técnica de multilateração é uma técnica que calcula a localização de um certo receptor RX através dos sinais enviados de diferentes âncoras. Nas Figs. 3–6, as âncoras são representadas pelas estações nomeadas de a_1 – a_3 . A localização de RX é calculada pela intersecção dos sinais recebidos das âncoras. Os valores d_1 – d_3 representam as distâncias entre RX e cada uma das respectivas âncoras.

As distâncias entre RX e cada âncora podem ser obtidas por intermédio de diversas tecnologias, a saber: comunicação por luz ou *Visible Light Communication* (VLC), Wi-Fi, sinal de satélites, Bluetooth, ZigBee, LoRa, etc. Se forem usadas n âncoras, o método recebe o nome de multilateração. Se forem usadas apenas três âncoras, o método recebe o nome de trilateração. A multilateração pode ser aplicada em diferentes algoritmos que usam o sinal recebido para calcular sua posição, a saber: *Angle of Arrival* (AoA), *Time of Arrival* (ToA), *Time Difference of Arrival* (TDoA) ou *Received Signal Strength* (RSS). Esses métodos são discutidos brevemente a seguir.

O método AoA permite a cada estação avaliar os ângulos relativos entre os sinais recebidos. Este método é ilustrado na Fig. 3. Um veículo RX, localizado entre duas *road side units* (RSUs) a_1 e a_2 , pode utilizar esta técnica para se localizar. A posição de RX é calculada pela intersecção dos sinais recebidos. Para tanto, as duas estações precisam estar sincronizadas.

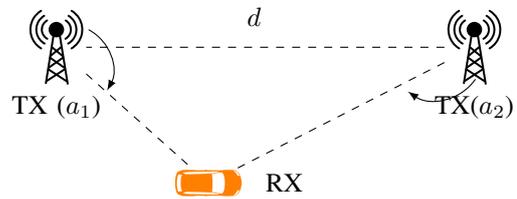


Figura 3. Método *Angle of Arrival* (AoA).

O método ToA, ilustrado na Fig. 4, usa o tempo de envio e de recepção das mensagens para inferir a distância TX–RX. Se todas as distâncias são conhecidas e também a localização de todas as âncoras, o valor da posição de RX pode ser calculado pela simples aplicação do cálculo da distância Euclidiana.

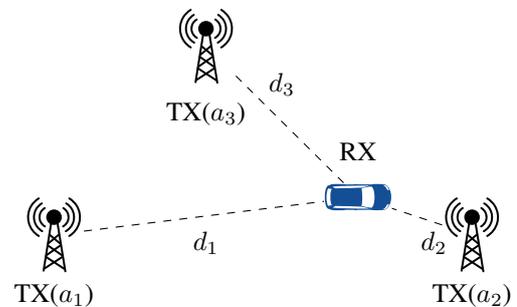


Figura 4. Método *Time of Arrival* (ToA).

No método TDoA, os tempos de chegada do sinal em receptores fisicamente separados (RX₁ e RX₂), com

referências de tempo precisamente sincronizadas, são calculados. Se a localização de um desses receptores é conhecida, por exemplo RX_2 , a posição de RX_1 é inferida usando a localização de RX_2 e os tempos de chegada do sinal nas estações. A Fig. 5 ilustra este esquema.

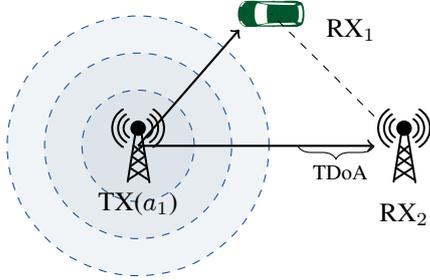


Figura 5. Método *Time Difference of Arrival* (TDoA).

Em contraste ao TDoA, o ToA usa o tempo absoluto de chegada em uma determinada estação base em vez da diferença entre duas estações. A distância é calculada diretamente a partir do momento da chegada porque os sinais viajam obedecendo uma velocidade conhecida. O tempo de chegada do sinal em duas estações com diferentes distâncias do TX não é o mesmo. Os dados de uma terceira estação base são necessários para determinar a posição precisa.

O método RSS, ilustrado na Fig. 6, usa a intensidade do sinal para estimar a distância TX-RX. Um sinal com baixa intensidade indica que os participantes estão distantes enquanto que um sinal com alta intensidade indica que os participantes estão próximos. Este método possui menor precisão que os demais, pois oferece apenas uma ideia de aproximação e não a coordenada onde RX se encontra.

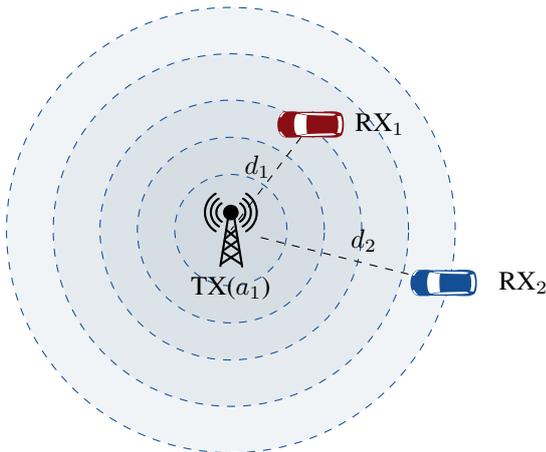


Figura 6. Método *Received Signal Strength* (RSS).

O modelo de perda de intensidade do sinal considerado depende das características do canal de comunicação, o qual leva em consideração aspectos físicos do meio de propagação, bem como parâmetros da onda propagante, i. e., comprimento da onda, tipo de antena utilizado pelo

transmissor, receptor, potência do sinal transmitido, etc. Portanto, para o RSS e demais técnicas é muito importante considerar um modelo de perda de sinal apropriado para a obtenção de bons resultados. Dada a distância de referência d_0 , em P_0 , é possível estimar a RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) $P(d)$ para a distância d , $d > d_0$, por:

$$P(d) = P_0 - 20\lambda \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + \eta \quad (1)$$

onde λ é o expoente de perda de intensidade do sinal e η é uma variável aleatória com distribuição Normal.

Para aplicações com nodos estáticos, as técnicas apresentadas anteriormente respondem relativamente bem. No entanto, para ambientes com nodos móveis pode-se haver dificuldades para se manter o sincronismo no processo de comunicação dificultando, portanto, o emprego dessas técnicas em VANETs. Dentro desse contexto, dois métodos alternativos são discutidos na sequência: *fingerprinting* e *dead reckoning*.

B. *Fingerprinting*

Fingerprinting é um dos métodos de posicionamento em ambientes *indoor* mais populares [6], [5]. O método opera em duas fases: mapeamento e processamento. Na fase de mapeamento, cada estação mede a intensidade do sinal enviado por estações com localização conhecida e guarda essas informações em um banco de dados. Na fase de processamento, um dispositivo móvel mede a intensidade dos sinais enviados pelas estações e compara com os valores armazenados no banco de dados. Um algoritmo estima a posição do dispositivo móvel no ambiente. Como desvantagem deste método, destaca-se a necessidade de manutenção do banco de dados.

O uso da técnica de *fingerprinting* para auto-localização *indoor*, não é novidade. Com apoio de Bluetooth, dependendo do algoritmo utilizado, a precisão oscila entre 1 e 6m [5]. Outra técnica mais recente [6], combinando *Fingerprinting* com Wi-Fi, obteve precisão ainda mais alta, de 1 a 3m.

C. *Dead Reckoning*

O método de *dead reckoning* consiste em, a partir de uma posição conhecida, estimar as próximas posições de um objeto móvel de acordo com sua movimentação. Velocidade, direção e tempo são utilizados para estimar a posição. Esse método funciona bem para objetos que se movem em velocidades baixas. Em altas velocidades, o somatório de pequenos erros gerados ao estimar o tempo percorrido comprometem o desempenho do método. Para implementar o *dead reckoning* são necessários sensores como hodômetros, acelerômetros e giroscópios.

D. Métricas: *precisão e acurácia*

De acordo com um estudo recente [7], duas métricas [8] são tidas como importantes na avaliação de desempenho de técnicas aplicadas no contexto de localização redes de comunicação, a saber, acurácia e precisão. A **precisão** é a quantificação de quão próximas as amostras replicadas estão umas das outras. Indica a distorção de diferentes

leituras na intensidade do sinal. A precisão é determinada estatisticamente pelo desvio padrão, que traz a informação sobre a diferença entre as medidas. Neste artigo, utiliza-se a definição de desvio padrão para variáveis aleatórias discretas equiprováveis. Supondo a variável aleatória X , pertencente ao conjunto $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, o desvio padrão é dado por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (2)$$

em que μ é a esperança da variável X , sendo $\mu = E[X] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$. Valores altos de σ indicam baixa precisão no serviço de localização, enquanto valores baixos indicam alta precisão.

A **acurácia** é a quantificação de quão próximas as amostras estão do alvo, que é o valor dito correto. Indica o erro de uma leitura. Para determinar se um valor tem acurácia, este precisa ser comparado com o valor dito correto. Como o valor correto é difícil de ser obtido sem a disponibilidade de um dispositivo de GPS de alta precisão, um conceito chamado **erro percentual** foi usado. O erro percentual é dado por:

$$e = \frac{(a - \hat{a})}{\hat{a}} \cdot 100 \quad (3)$$

e indica diferença percentual entre o valor correto *aceito* a e o valor *obtido* \hat{a} no experimento. Para o valor correto aceito foi usada a média dos valores obtidos.

E. Limitações do GPS

A precisão e a acurácia de um sistema podem variar de medição para medição. Existem dois fatores principais pelo qual isso ocorre: limitação dos receptores e interferência de sinais do receptor. A limitação dos receptores ocorre devido a limitações inerentes ao próprio *hardware*. Por exemplo, no caso do GPS, cada satélite que compõe o sistema possui um relógio atômico, que é a forma mais precisa que existe para medir o tempo. Receptores com relógios atômicos ou outros relógios de alta precisão podem alcançar milímetros de precisão na localização. Porém, os relógios encontrados na maioria dos receptores GPS não possuem essa precisão, principalmente nos receptores de uso civil. *Smartphones* com GPS embutido possuem uma precisão média de 4,9m quando o receptor está em ambiente com boa visada (céu aberto). Considerando um cenário mais amplo de dispositivos, a precisão média de dispositivos GPS para aplicações civis é de 12,8m.

Além da limitação dos receptores, existem fatores que degradam a precisão dos métodos de localização, como o sombreamento, que é o bloqueio do sinal por prédios, montanhas, grandes construções, árvores, túneis, paredes, etc. Outro fator que degrada o sinal é o efeito de multipercurso (*multipath*) devido à reflexão e à difração que o sinal sofre durante o seu percurso entre o transmissor e o receptor. Outros casos menos comuns que afetam a precisão são: interferências de outras fontes de rádio, grandes tempestades solares, manutenção dos satélites (e antenas) e falta de padronização: muitos dispositivos receptores

não seguem as especificações de interface definidas pelo sistema. De forma geral, no contexto de localização, independentemente do dispositivo que gera o sinal, quanto maior é a distorção do sinal recebido, pior são os valores obtidos para a acurácia e a precisão.

F. Melhorias no GPS

Existem soluções para melhorar os resultados do GPS. A técnica DGPS (*Differential GPS*) [9] melhora a resolução do GPS ao adicionar referências baseadas na Terra. A precisão típica é entre 1–5m, mas pode chegar a 1cm nas melhores implementações.

Mais recentemente, Chen et al. [10] desenvolveram uma técnica que maximiza a eficiência do GPS, considerando algoritmos de baixa complexidade computacional e incluindo um sensor de inércia acoplado ao dispositivo. Como resultado, o GPS de um dispositivo móvel pode calcular a posição de um objeto com precisão de até uma polegada. Porém, conforme já comentado, os dispositivos móveis comercialmente disponíveis tipicamente não permitem atingir estes valores.

III. DESCRIÇÃO E AVALIAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO

Na VANET, cada veículo e cada âncora possui um identificador único conhecido como *id*. Para veículos, o *id* pode ser o RENAVAN. Quando um veículo v deseja saber sua localização, transmite (*broadcast*) uma solicitação em intervalos constantes de tempo. Cada âncora a_i localizada dentro do alcance de transmissão de v , responde a solicitação incluindo na resposta a sua localização (x, y) e o seu *id*. Ao receber a mensagem de uma âncora a_i , v também mede a RSSI, ou o ângulo do recebimento do sinal, ou a distância entre v e a_i , conforme o método de localização aplicado. Logo após v coletar três mensagens-resposta de âncoras distintas, este pára de transmitir a solicitação e executa um algoritmo de auto-localização, conforme apresentado na seção II.

Devido às limitações dos sistemas baseados em satélites, para aplicações em VANETs é importante buscar métodos alternativos para a localização. Com o estabelecimento da Internet das Coisas, todos os dispositivos eletrônicos estarão conectados. Desta forma, tecnologias como Wi-Fi e Bluetooth passarão a ser muito atrativas para o uso em problemas de localização para aplicações em VANETs, por exemplo. Na sequência, são exploradas tecnologias de comunicação e as possibilidades de utilizá-las como suporte para a localização de veículos.

A. Bluetooth

Bluetooth é um padrão de redes para a troca de dados sem fio, projetado para curtas distâncias. O Bluetooth, assim como o Wi-Fi, está presente em diversos dispositivos de comunicação sem fio, principalmente em *smartphones*. Diferentemente do Wi-Fi que é a tecnologia mais utilizada para acessar a Internet, o Bluetooth é mais utilizado para a comunicação entre dispositivos.

A tecnologia Bluetooth é classificada em quatro Classes, que diferem em relação à potência e ao alcance. Estas

Tabela I
CLASSIFICAÇÃO DOS DISPOSITIVOS BLUETOOTH

Classe	Potência (máxima)	Alcance (máximo)
1	100 mW (20dBm)	≈100 m
2	2.5 mW (4 dBm)	≈10 m
3	1 mW (0 dBm)	≈1 m
4	0.5 mW (-3 dBm)	≈0.5 m

Tabela II
COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES TECNOLOGIAS

Tecnologia	Erro	Alcance
GPS	média de 12,8m	Global (<i>outdoor</i>)
Wi-Fi Fing. [6]	1–3m	30m (<i>indoor</i>)
Bluetooth Fing. [5]	1–6m	10m (Classe 2)
SONAR [12]	menos que 1m	4m (sensor HC-SR04)
LoRa	N/A	3–12km

classes e seus respectivos valores oficiais estão elencadas na Tab. I. O alcance efetivo depende de aspectos como condições de propagação, qualidade dos componentes do dispositivo, configurações da antena e carga da bateria. A maioria dos dispositivos, como os *smartphones*, se encontra na Classe 2, com ≈10m de alcance.

Tipicamente, em uma conexão com dispositivos Bluetooth de diferentes classes, o dispositivo de mais baixa potência tende a definir o limite do alcance. Entretanto, o alcance efetivo da conexão entre os dois nodos pode ser estendido quando um dispositivo com menor alcance está conectado a um dispositivo com maior alcance. Mais especificamente, uma conexão de dois dispositivos de Classe 1 com alta sensibilidade e alta potência permite intervalos muito superiores aos 100m típicos, dependendo da taxa de transmissão da aplicação. Dispositivos Bluetooth de longo alcance chegam a ter uma cobertura efetiva (em campo aberto) de até 1km, se for usada uma combinação de dois dispositivos similares nas duas extremidades. A Tab. II sumariza valores extraídos na literatura, em contraste com diferentes tecnologias.

No contexto deste trabalho, foram avaliadas três implementações distintas da tecnologia Bluetooth para a plataforma Arduino: os módulos HC-05 e HC-06, e o módulo nRF8001 Bluefruit Low Energy (LE)². O módulo Bluetooth HC-06 é usado para comunicação *wireless* entre o Arduino e outro módulo com Bluetooth, como por exemplo um *smartphone*, um computador ou *tablet*. Diferentemente do modelo HC-06, o HC-05 suporta a comunicação bidirecional (opera como TX e como RX). Porém, um dos modos precisa ser selecionado no programa do usuário. Os módulos da família HC seguem o protocolo Bluetooth v2.0, com taxa máxima de transmissão de 2.1Mbps.

O módulo nRF8001 implementa o protocolo BLE 4.0, com taxa máxima de transmissão de 24Mbps (portanto, é muito mais rápido que os módulos HC), consumindo menos energia para o funcionamento. A desvantagem é que o módulo nRF8001 possui valor de aquisição elevado frente aos componentes da família HC. Além do baixo consumo de energia, o nRF8001 pode operar tanto no modo mestre

como no modo escravo, sem precisar selecionar um modo previamente. O nRF8001 e o HC-06 pertencem a Classe 2, portanto o alcance máximo esperado é 10m.

Os dispositivos nRF8001 (Fig. 7(a)) e HC-05 (Fig. 7(b)) foram avaliados quanto ao alcance e a intensidade do sinal. Para os experimentos, ambos dispositivos foram instalados em diferentes placas Arduino conectadas à rede elétrica para operar como TX. As medições foram realizadas usando como RX um *smartphone* convencional (Motorola Moto x Play, com Android 6.0). Os experimentos foram realizados em ambiente *indoor*, sendo que nenhum obstáculo foi colocado entre TX e RX. Foram obtidas 10 amostras para diferentes distâncias, no intervalo 2–20m. O limite do intervalo de 20m foi alcançado porque o protocolo Bluetooth 4.0 do *smartphone* ampliou o alcance de comunicação dos dispositivos HC-05 e nRF8001. Os valores obtidos nos experimentos são apresentados nas Figs. 8(b) e 8(a). Os valores de intensidade do sinal são dentro de uma escala de -113 a 0dBm. Note que o valor -60dBm indica sinal mais intenso que o valor -90dBm. Entretanto, a maioria dos dispositivos comerciais alcança como valor mínimo -92dBm.

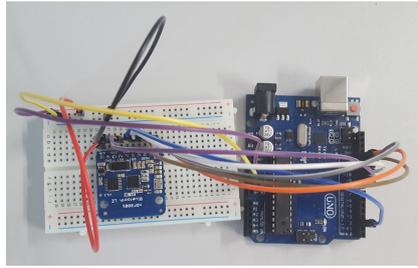
Conforme esperado, existe tendência de atenuação na intensidade do sinal quando a distância TX–TR aumenta. Ainda, devido às características dos dispositivos HC-05 e nRF8001, esta atenuação é apresentada com ruído, que pode ser comprovado pela irregularidade na variação do tamanho das barras expostas nos gráficos (ver Figs. 8 (a-c)). Comparando as duas tecnologias, de forma geral, o módulo HC-05 tem melhor acurácia que o módulo nRF8001. Em contrapartida, o módulo nRF8001 tem melhor precisão que o módulo HC-05.

B. Wi-Fi

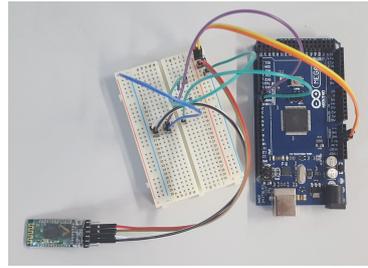
A tecnologia Wi-Fi, por ser utilizada em vários contextos e possuir uma área de cobertura ampla, é uma alternativa interessante para a localização em ambientes *indoor*, por exemplo, em estacionamentos subterrâneos. Redes Wi-Fi são redes sem fio que seguem o protocolo IEEE 802.11. O padrão IEEE 802.11 é um conjunto de especificações para a camada física e *Media Access Control* (MAC) para implementação da comunicação entre computadores em WLANs. O padrão 802.11 distingue cinco faixas de frequência: 2,4GHz, 3,6GHz, 4,9GHz, 5GHz e 5,9GHz. Cada intervalo é dividido em vários canais. Os países aplicam regulamentos próprios aos canais permitidos, usuários permitidos e níveis máximos de energia dentro dessas faixas de frequência.

Visando o desenvolvimento de projetos com redes veiculares de forma prática, o Laboratório de Sistemas de Computação (LSC) da UFSM adquiriu quatro veículos-robôs Arduino em 2015. Cada veículo é controlado por uma placa Arduino Mega 2560 e é alimentado por uma bateria LiPo de 1000mAh com duas células. Atualmente, os veículos contam com diferentes módulos de comunicação: Bluetooth, LoRa e Wi-Fi (ESP8266). A intensidade do sinal do módulo Wi-Fi ESP8266 (Fig. 7(c)) foi avaliada experimentalmente, em um ambiente interno e livre de

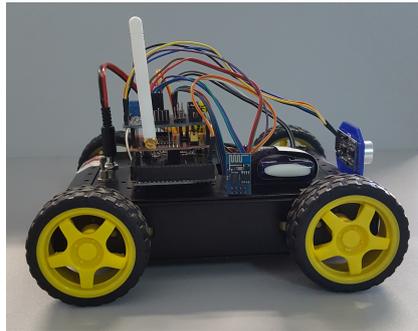
²<https://www.adafruit.com/product/1697>



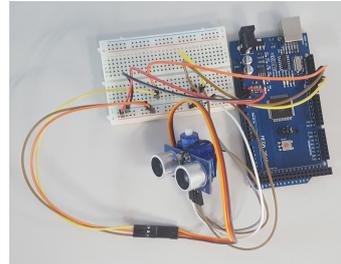
(a) Placa Arduino UNO e módulo Bluetooth usados nos experimentos.



(b) Placa Arduino MEGA e módulo Bluetooth usados nos experimentos.

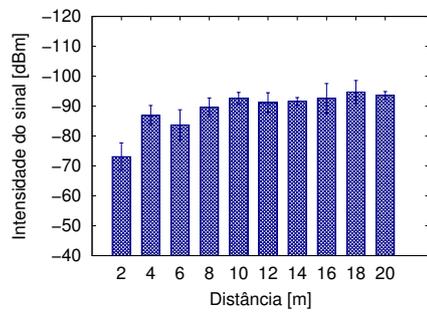


(c) Carro-robô Arduino MEGA com módulo Wi-Fi.

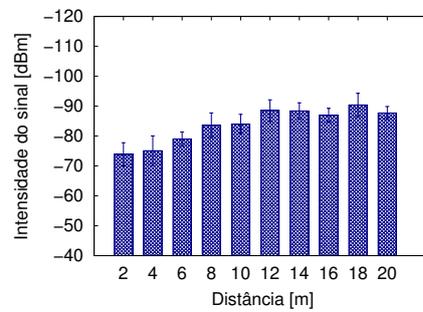


(d) Kit usado no experimento e sensor ultrassônico e Arduino MEGA.

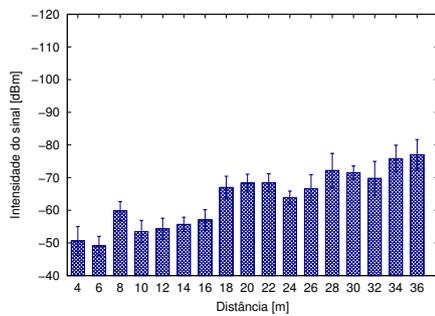
Figura 7. Hardware usado nos experimentos.



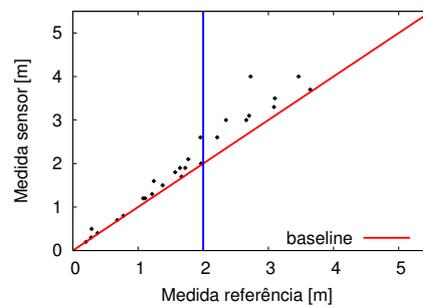
(a) Bluetooth AdaFruit nRF8001.



(b) Bluetooth HC-05.



(c) Wi-Fi ESP8266.



(d) Sensor ultrassônico HC-SR04.

Figura 8. Avaliação experimental da intensidade do sinal para diferentes distâncias.

Tabela III
VALORES OBTIDOS NOS EXPERIMENTOS (EM MÉDIA) PARA
AVALIAÇÃO *indoor*

Dispositivos	Desvio Padrão σ	Erro Percentual e
Bluetooth (HC-05)	3,38	3,51
Bluetooth LE (Adafruit)	3,28	3,64
Wi-Fi (ESP8266)	3,73	5,24

obstáculos. No experimentos, o veículo opera como TX enquanto um computador convencional opera como RX. A distância máxima alcançada entre TX-RX foi de 36m para o sinal Wi-Fi, mantendo-se a comunicação estável. A Tab. III sumariza os valores obtidos com os experimentos do módulo Wi-Fi, em contraste com os módulos Bluetooth anteriormente avaliados.

Nos experimentos, foi verificado conforme esperado, que o sinal Bluetooth (Figs. 8(b) e 8(a)) degrada mais que o sinal Wi-Fi (Fig. 8(c)). Foi observado que o alcance máximo do Wi-Fi (36m) é maior que o Bluetooth (20m), também conforme o esperado. Por outro lado, o desvio padrão do Wi-Fi (3,73) foi maior do que o desvio padrão para o Bluetooth, indicando que localização *indoor* apresentará valores menos precisos quando o Wi-Fi for usado. Verificou-se ainda que a acurácia para o Wi-Fi ($e = 5,24$) é inferior à acurácia dos dispositivos Bluetooth.

Localização baseada em RSSI e Wi-Fi foi implementada experimentalmente em da Silva e Pasin [11] para um ambiente interno. De fato, foi necessário um ajuste para controlar a distorção do sinal gerada por obstáculos.

C. SONAR

SONAR (*Sound Navigation And Ranging*) é um dispositivo que usa a propagação do som para navegação, comunicação e detecção de objetos. O SONAR TX emite uma onda sonora que é refletida quando colide em um obstáculo (RX), e é uma alternativa para a localização de veículos. A distância RX-TX é calculada considerando-se o tempo gasto para a onda transmitida retornar ao TX.

Em Rodrigues et al. [12] foi realizada uma implementação que combina as técnicas AoA e ToA para localizar um veículo-robô Arduino em movimento sobre uma pista circular *indoor*. A combinação das duas técnicas é aplicada com o auxílio do SONAR, que rotaciona um sensor ultrassônico HC-SR04. Esta combinação possibilita o uso de apenas um SONAR para localizar o veículo. Portanto, multilateração não é usada. Experimentos resultaram em erro médio de ≈ 8 cm em relação ao centro geométrico do veículo, para uma pista em um espaço de 200cm \times 200cm.

Ainda, neste cenário, a precisão do sensor ultrassônico foi avaliada. Resultados são apresentados na Fig. 8(d). Foi observado discrepância entre valores medidos manualmente e valores obtidos pelo sensor. A discrepância aumenta para distâncias maiores que 2m.

De fato, a precisão de resultados também depende da qualidade dos componentes. O sensor ultrassônico HC-SR04 é de baixo custo e limita a implementação: o alcance máximo é 4m (segundo o fabricante). Na prática, o uso do SONAR para localização em sistemas reais torna-se

inviável. Qualquer anteparo entre objeto alvo e SONAR impede estimar a distância de forma adequada.

D. LoRa

LoRa³ (*Long Range*) é uma tecnologia de padrão aberto de radiofrequência que permite comunicação a longas distâncias com baixo consumo de energia. A LoRa Alliance, formado por um conjunto de empresas, mantém o padrão LoRa e promove as redes baseadas em LoRa denominadas LoRaWAN. O LoRa opera em diferentes faixas de frequência. Nos EUA e em outros países da América, como o Brasil, a faixa de frequência usada é 902–928MHz.

O LoRa baseia-se em uma rede com topologia estrela, similar a uma rede de telefonia celular. Módulos enviam e recebem dados de *gateways* específicos (similares as redes Wi-Fi, mas com alcance muito maior), que os encaminham via conexão IP para servidores locais ou remotos. O alcance do LoRa é de 3–4km em áreas urbanas e pode chegar a 12km em áreas rurais.

LoRaWAN é o protocolo que define a arquitetura do sistema e os parâmetros de comunicação para a tecnologia LoRa. Mais precisamente, este protocolo define os detalhes de funcionamento, segurança, qualidade do serviço, ajustes de potência visando maximizar a duração da bateria, além dos tipos de aplicações cliente-servidor.

O protocolo LoRaWAN especifica quatro partes: *end-devices*, *gateways*, servidores de rede e servidores de aplicações. *End-devices* são sensores com capacidade de comunicação instalados em diversos locais. *Gateways* são receptores dos sinais enviados pelos *end-devices*. Um único *gateway* pode receber dados de vários dispositivos e encaminhá-los para o servidor de rede. Dependendo das condições de topologia, um único *gateway* pode cobrir um raio de até 15km. Servidores de rede gerenciam informações enviadas pelos *gateways* e eliminam pacotes duplicados. Servidores de aplicações são programas específicos que recebem os pacotes dos servidores de rede e executam ações específicas.

Para verificar a viabilidade da aplicação com eficiência de algum método de localização usando LoRa, um módulo Dragino LoRa *shield* (915 MHz) foi avaliado em um ambiente externo no campus da UFSM. Diferentemente de Cattani et al. [13] e Kartakis et al. [14], o enfoque deste artigo está na avaliação da intensidade do sinal recebido. O LoRa *shield* foi conectado diretamente à uma placa Arduino Mega 2560, alimentada por bateria LIPo de 1000 mAh com duas células e funciona como TX. O módulo LoRa envia mensagens de controle (3 chars) para um computador convencional, que opera como RX. Não há obstáculos entre TX e RX, e o *gateway* não foi usado. Foram tomadas 10 medidas para cada uma das diferentes distâncias, em um percurso de 100m. Conforme valores apresentados na Fig. 9, o desvio padrão obtido nos experimentos foi relativamente baixo (quase não se percebe o desenho no topo das barras). Houve pouca

³<https://www.lora-alliance.org/technology>

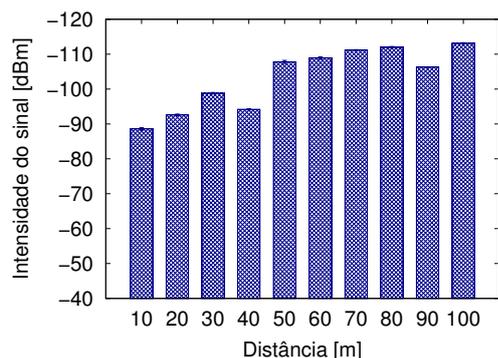


Figura 9. Intensidade do sinal LoRa para ambiente *outdoor*.

variação de valores entre leituras consecutivas, indicando que o dispositivo tem alta precisão.

Também foi conduzido outro experimento preliminar com um veículo real em movimento, onde a comunicação infraestrutura para veículo foi mantida com o veículo desenvolvendo velocidade de 40 km/h. Entretanto, experimentos com o veículo desenvolvendo maior velocidade ainda precisam ser realizados.

IV. CONCLUSÕES

Neste artigo foi avaliada, experimentalmente, a possibilidade do uso de tecnologias de comunicação visando auto-localização *indoor* e *outdoor* em VANETs. Cada tecnologia apresenta limitações relacionadas à propagação do sinal no ambiente e a características de *hardware*. Nos experimentos, verificou-se que, para um serviço de localização *indoor*, Bluetooth tem maior acurácia e maior precisão que Wi-Fi. Porém, o alcance do Wi-Fi é maior que o alcance do Bluetooth. Em ambientes externos sem demanda extrema de precisão e acurácia, Wi-Fi pode ser uma solução adequada.

Em relação à tecnologia LoRa, se faz necessário um estudo mais aprofundado de sua aplicação em VANETs. Porém, de acordo com estudos preliminares desta pesquisa, é possível conjecturar problemas relacionados ao longo alcance de comunicação, dado que esta característica pode ocasionar atrasos e impactar negativamente na qualidade dos resultados. Outras tecnologias que também têm potencial para auto-localização incluem *beacons*, LiDar (*Light Detection And Ranging*) e VLC.

Finalmente, para uma comparação mais efetiva de métodos de localização, seria adequado avaliar todos os métodos, frente a diferentes tecnologias de comunicação destacadas neste artigo, acrescidas do SONAR. Até o presente momento, este grupo de pesquisa realizou apenas duas destas implementações. Além disso, outras métricas precisam ser consideradas [4], [14], [15], dado que redes veiculares serão compostas por múltiplos veículos, o que se traduz em cenários dinâmicos e complexos.

APOIO

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Aglimazanov, O. Gurcan, A. Belbachir, K. S. Yildirim, "Robust and efficient self-adaptive position tracking in wireless embedded systems", in *8th IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC 2015)*, pp. 152–159, 2015.
- [2] K. Sohtaby, D. Minoli, T. Znati, *Wireless Sensor Networks: technology, protocols, and apps.*, Wiley-Interscience, 2007.
- [3] Y. Liu, Z. Yang, X. Wang, L. Jian, "Location, localization, and localizability", in *Journal of Computer Science and Technology*, v. 25, n. 2, pp. 274–297, 2010.
- [4] F. Zafari, A. Gkelias, K. Leung, "A survey of indoor localization systems and technologies", in eprint arXiv:1709.01015, Setembro 2017. Disponível em: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2017arXiv170901015Z>.
- [5] L. Zhang, X. Liu, J. Song, C. Gurrin, Z. Zhu, "A comprehensive study of bluetooth fingerprinting-based algorithms for localization", in *27th Int. Conf. on Advanced Information Networking and Applications Workshops*, pp. 300–305, 2013.
- [6] S. He, S. H. G. Chan, "Wi-Fi fingerprint-based indoor positioning: recent advances and comparisons", in *IEEE Com. Surveys Tutorials*, v. 18, n. 1, pp. 466-490, 2016.
- [7] L. Lee et al., "Comparison of accuracy and precision of GPS-enabled mobile devices", in *2016 IEEE Int. Conf. on Computer and Inf. Technology (CIT)*, 2016, pp. 73-82.
- [8] J. R. Taylor. *An introduction to Error Analysis: the study of Uncertainties in Physical Measurements*, 2nd ed., University Science Books, 1997.
- [9] G. J. Morgan-Owen, G. T. Johnston, "Differential GPS positioning", in *Electronics & Communication Engineering Journal*. pp. 11–21, 1995.
- [10] Y Chen, S. Zhao, J. A. Farrell, "Computationally efficient carrier integer ambiguity resolution in multiepoch GPS/INS: a common-position-shift approach", in *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, v. 24, n. 5, 2016.
- [11] J. F. da Silva, M. Pasin, "Uso da intensidade do sinal para implementar um serviço de aviso de aproximação de veículo", in *VII Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering (SBESC 2017)*, Curitiba - PR, 2017.
- [12] R. S. Rodrigues, M. Pasin, R. Machado, "Indoor position tracking: an application using the Arduino mobile platform", in *10th IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC 2017)*, Valencia, Espanha, 2017.
- [13] M. Cattani, C. A. Boano, K. Römer, "An experimental evaluation of the reliability of LoRa long-range low-power wireless communication", in *Journal of Sensor and Actuator Networks*, v. 6, n. 2, Junho 2017.
- [14] S. Kartakis et al., "Demystifying low-power wide-area communications for city IoT applications", in *10th ACM International Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation, and Characterization (WiNTECH '16)*, New York, NY, USA, pp. 2-8, 2016.
- [15] C. A. Boano et al., "oTBench: towards a benchmark for low-power wireless networking", in *Workshop on Benchmarking Cyber-Physical Networks and Systems (CPSBench)*, in conjunction with CPSWeek, Porto, Portugal, Abril 2018.