

Localização *indoor* utilizando Bluetooth LE e processamento digital de sinais com baixo esforço computacional

Francisco J. A. de Aquino, Tomaz C. Soares Júnior, Elias T. da Silva Júnior e Anaxágoras M. Girão

Resumo— Sistemas de localização em interiores (*indoor*) têm diversas aplicações, como o auxílio a pessoas em edificações complexas ou para pessoas com algum tipo de limitação. A localização por GPS é uma tecnologia já amadurecida, mas não é eficiente dentro de construções ou ambientes fechados. Este trabalho propõe e avalia uma estratégia de localização em ambientes fechados usando a intensidade do sinal Bluetooth (RSSI) enviada por um conjunto de *beacons* e capturada por um *smartphone*. Neste trabalho propomos o uso de filtros digitais e um novo método de aproximações lineares para obter a distância *beacon-smartphone* com boa precisão e baixo custo computacional. Os resultados experimentais obtidos mostram que os erros na localização do *smartphone* são menores que um metro.

Palavras-Chave— Localização indoor, Filtro digital, Bluetooth, RSSI.

Abstract— Indoor location systems have several applications, such as assisting people in complex buildings or for people with some type of limitation. GPS location is a mature technology, but it is not efficient inside buildings or closed environments. This work proposes and evaluates a location strategy in indoor environments using the Bluetooth signal strength (RSSI) sent by a set of beacons and captured by a smartphone. In this work, we propose the use of digital filters and a new linear approximation method to obtain the beacon-smartphone distance with good accuracy and low computational cost. The experimental results obtained show that the errors in the location of the smartphone are smaller than one meter.

Keywords— Indoor localization, Digital filter, Bluetooth, RSSI.

I. INTRODUÇÃO

A localização *indoor* tem diversas aplicações, como o auxílio a pessoas em grandes edificações complexas, ou mesmo em edificações menores, para pessoas com algum tipo de deficiência ou, ainda, pode ser usada para suporte a robôs autônomos, rastreamento de equipamentos, entre outras aplicações. A localização por GPS (*Global Positioning System*) é uma tecnologia já bastante amadurecida e com boa precisão, mas não é eficiente dentro de construções ou ambientes fechados. Além disso, o GPS só fornece uma precisão máxima de até cinco metros [1]- [2]. Existem vários mecanismos propostos para localização *indoor*, entre eles: localização *wireless*, navegação baseada em sensores, navegação baseada em imagens

Departamento de Telemática - IFCE, Fortaleza, Brasil. textit@instituto Iracema de Pesquisa e Inovação, Fortaleza. Emails: fcoalves_aq@ifce.edu.br, tomazcosta@institutoiracema.org.br, {elias, anaxa}@ifce.edu.br. Os autores agradecem à Canon Medical Systems do Brasil (Departamento de Pesquisa e Informática Médica) pelo suporte financeiro e pelo apoio no desenvolvimento dessa pesquisa.

[3]. A localização sem fio tem sido amplamente utilizada entre essas tecnologias. Especialmente, a localização WiFi é uma das tecnologias de localização sem fios mais comuns [4].

Outro candidato importante para localização sem fio em dispositivos inteligentes é o Bluetooth. O Bluetooth tradicional tem um tempo de varredura significativamente longo (cerca de 10 s), o que limita seu valor para localização. No entanto, o protocolo BLE (*Bluetooth Low Energy*), suportado pela maioria dos dispositivos inteligentes (*smartphones*), superou as limitações do longo tempo de varredura. Os *beacons* BLE têm outras características interessantes: tamanho reduzido, baixo peso, baixo custo e economia de energia. Além disso, são amplamente suportados por dispositivos inteligentes. Portanto, o BLE tem o potencial de se tornar uma tecnologia de localização sem fio dominante [1].

Comparando com a localização WiFi, a localização BLE tem as seguintes vantagens [5]:

- os sinais BLE RSS podem ter uma taxa de amostragem maior do que os sinais WiFi RSS (0,25 Hz vs 2 Hz);
- BLE usa menos energia que WiFi;
- os sinais RSS BLE podem ser obtidos da maioria dos dispositivos inteligentes; e
- os *beacons* BLE geralmente são alimentados por bateria, sendo mais flexíveis e fáceis de implantar do que o WiFi.

A intensidade de sinal de RF (RSSI) é muitas vezes usada para localização. O problema é que a RSSI é sujeita aos fenômenos de propagação de sinal, como reflexão, espalhamento e refração, o que dificulta estabelecer relação entre seu valor e a distância. Movimentações de pessoas ou objetos no ambiente também podem alterar a intensidade do sinal recebido. Neste artigo propomos investigar o uso da intensidade do sinal de RF no padrão BLE para localização em ambientes fechados usando o sinal recebido de apenas três *beacons*.

II. REVISÃO DA LITERATURA

A. Bluetooth

O rádio *Bluetooth Classic*, também conhecido como Bluetooth BR/EDR (*Basic Rate/Enhanced Data Rate*), é um rádio de baixa potência que transmite dados em 79 canais na banda de frequência de 2,4 GHz ISM (*Industrial, Scientific, and Medical*) não licenciada. Com suporte para comunicação de dispositivo ponto a ponto, o *Bluetooth Classic* é usado principalmente para permitir *streaming* de áudio sem fio e também permite transferência de dados [6].

Na definição do protocolo BLE, 40 canais (cada um com 2 MHz de largura em torno da banda de rádio de 2,4 GHz) são usados para transmitir mensagens. A duração da transmissão de mensagens é extremamente curta para economizar energia da bateria. As intensidades do sinal recebido (RSS) de três emissores (*beacons*) podem ser usadas por um dispositivo para estimar a sua localização. A taxa de publicidade BLE pode ser configurada para até 10 vezes por segundo.

A potência de transmissão para *beacons* BLE também é definida de 0 dBm a -40 dBm. Para reduzir o consumo de energia, a taxa de publicidade do BLE e a potência de transmissão são geralmente definidas para menos de 10 Hz e -16 dBm, respectivamente. O rádio Bluetooth LE (com essa denominação desde a versão 4.0) foi projetado para operação com energia muito baixa. O Bluetooth LE oferece suporte a várias topologias de comunicação, expandindo de ponto a ponto para broadcast e, mais recentemente, *mesh* (topologia malha). Aparelhos que utilizam o Bluetooth 4.0 não precisam estar pareados para recebimento de informações [7]. O uso de posicionamento baseado em RSSI normalmente fornece nível de precisão de alguns metros, permitindo, por exemplo, detectar se pessoas ou dispositivos estão localizados dentro de uma sala [8].

B. Potência RSSI

Na comunicação RT (*Radiotelephone*) se usa RX (Nível de Potência do Sinal Recebido) e RSSI para medir a força do sinal de rádio. Ambos RX e RSSI são indicações do nível de potência sendo recebido por uma antena. A diferença entre RX e RSSI é que RX é medido em miliWatts (mW) ou decibel-miliwatts (dBm), enquanto RSSI é uma porcentagem da intensidade do sinal - quanto maior o número RSSI, mais forte é o sinal. Ao contrário do RX, o RSSI é uma medida relativa definida principalmente por cada fabricante de *chip*; o RSSI é diferente para diferentes circuitos de rádio. Para algumas plataformas de *software*, apenas dados RSSI estão disponíveis na API de alto nível [9]. Este é o caso da plataforma Android, que retorna a intensidade do sinal (RSSI) [4].

Podemos notar a variação do valor RSSI mesmo para uma distância fixa. Além do ruído, um dos fatores que contribui para esta variação é a diversidade de plataformas de *hardware*/rádio. O mesmo valor RSSI em dois telefones Android diferentes com dois chipsets diferentes pode significar duas intensidades de sinal diferentes. No entanto, o valor RSSI ainda pode ser muito útil nas aplicações de proximidade se você usá-lo para obter a tendência da mudança do valor RSSI. Essa tendência pode fornecer dados significativos. Com base na flutuação dos sinais de rádio, podemos obter um resultado bastante preciso da tendência RSSI. Podemos saber facilmente se o sinal está ficando mais forte ou mais fraco. Melhor ainda, se entendermos o mapeamento específico entre o RSSI e a localização do dispositivo receptor específico, poderemos ter uma estimativa bastante precisa da posição [9].

C. Beacon

Beacon é um dispositivo emissor *broadcast* de sinal Bluetooth LE, que emite (a uma potência de transmissão padrão), em

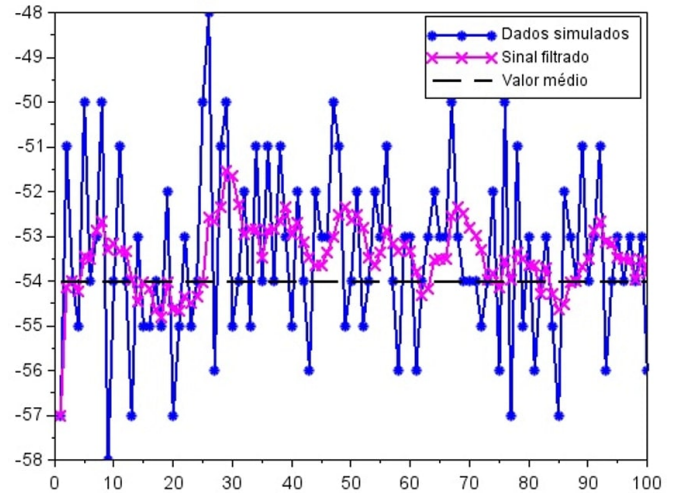


Fig. 1

EXEMPLO DE FILTRAGEM DE DADOS SIMULADOS. EIXO X: TEMPO. EIXO Y: POTÊNCIA EM DB.

intervalos de transmissão, parâmetros básicos, tais como, sua identificação, um MAC (*Media Access Control*). Fundamentalmente, um beacon é o conjunto formado por um *chipset*, uma antena e uma bateria [5], [10].

D. Filtragem do Sinal

O sinal de potência captado pelo *smartphone*, o RSSI, tem uma grande variação de potência instantânea (cerca de ± 5 dB). Para diminuir o impacto dessas variações na estimativa de distância esse trabalho propõe o uso de uma filtragem por média móvel e, posteriormente, uma filtragem recursiva tipo EMA (*Exponential Moving Average Filter*) [11]:

$$y[n] = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_{k=0}^{N-1} x[n-k] \quad (1)$$

onde $y[n]$ é o valor filtrado; N é o número de amostras; $x[n]$ é o valor instantâneo de potência (RSSI). Para melhorar o efeito de filtragem, porém mantendo-se a simplicidade de construção, pode-se adicionar um elo de recursão no algoritmo de média móvel. Com isso, obtém-se um filtro simples, mas cujo desempenho se mostrou satisfatório na aplicação em questão, conforme será visto na Seção III. Filtro utilizado:

$$P_m[n] = \alpha.P_m[n-1] + (1-\alpha).y[n] \quad (2)$$

onde α é valor próximo de 1 e $P_m[n]$ denota a potência média recebida, obtida pelo sistema de filtragem. A Fig. 1 mostra o efeito da filtragem proposta em dados simulados. OS valores no eixo Y são valores de RSSI (em dB) enquanto no eixo X temos a numeração das amostras. Foram usados dados simulados com valores próximos ao que se obtém tipicamente em amostras reais.

III. MATERIAIS E MÉTODOS

A. Distância Beacon-Smartphone

A relação entre potência recebida e distância não é linear, mas quando a potência é medida em dB pelo *smartphone*

e a distância é medida em metros, essa relação se mostra aproximadamente linear. Assim, a relação entre a distância *beacon-smartphone* e potência filtrada pode ser aproximada por uma equação de reta:

$$s[k] \approx A \times P_m[k] + B \quad (3)$$

onde A é o coeficiente angular e B é o coeficiente linear e $s[k]$ a distância estimada no instante k . Os valores de A e B são obtidos por testes experimentais. Para que essa aproximação seja válida, são impostas as seguintes restrições: (1) o uso do mesmo modelo de *beacon*, configurados com os mesmos parâmetros de potência de transmissão. No experimento feito, os *beacons* são configurados para emitirem um sinal a cada 0,5 segundo em potência de +0dBm. (2) Para cada modelo de *smartphone*, um procedimento de calibração permite ajustar os parâmetros A e B .

Como potência (em dB) e distância são inversamente proporcionais (aproximadamente), tomou-se a equação da reta decrescente para descrever a relação entre essas variáveis. De posse de algumas coletas de RSSI em distâncias padronizadas, podemos calcular os parâmetros da equação da reta. Assim, dado um valor de potência RSSI média, estima-se a distância *beacon-smartphone*. Uma vez calculadas as distâncias *beacons-smartphone* para três *beacons*, e sabendo-se as posições espaciais desses emissores, a posição espacial do *smartphone* pode ser calculada como indicado pelas equações (4) e (5), seção III-B.

B. Posicionamento por Média Ponderada

Foi escolhido o uso da média ponderada para o cálculo da posição, considerando fatores tais como: simplicidade e a quantidade pequena de elementos *beacons*. De fato são usados apenas três *beacons* para o cálculo da posição do *smartphone*, os *beacons* mais próximos do *smartphone*. O sistema consegue ler quatro ou mais *beacons*, mas somente os três mais próximos são usados para realizar os cálculos. Essa posição calculada deverá estar dentro do triângulo formado pelos *beacons*, e como cada distância *beacon-smartphone* terá um fator de peso para o cálculo, o uso da média ponderada gera uma boa estimativa para essa posição.

Com o plano cartesiano como referência, os *beacons* estarão posicionados em pontos (x, y) no plano formado pelos eixos perpendiculares x e y . A posição do *smartphone*, também será um ponto nesse plano, onde a sua posição cartesiana referente aos eixos x e y podem ser calculadas aproximadamente por:

$$x \approx \frac{px_1/s_1 + px_2/s_2 + px_3/s_3}{1/s_1 + 1/s_2 + 1/s_3} \quad (4)$$

$$y \approx \frac{py_1/s_1 + py_2/s_2 + py_3/s_3}{1/s_1 + 1/s_2 + 1/s_3} \quad (5)$$

onde px_i é a posição do *beacon* no eixo x ; py_j é a posição do *beacon* no eixo y ; px_1 , px_2 e px_3 são as posições dos respectivos primeiro, segundo e terceiro *beacons* utilizados referente ao eixo x ; py_1 , py_2 e py_3 são as posições dos respectivos primeiro, segundo e terceiro *beacons* utilizados referentes ao eixo y ; s_1 , s_2 e s_3 são as distâncias *beacons-smartphone* dos respectivos primeiro, segundo e terceiro *beacons*. Assim,

$1/s_1$, $1/s_2$, $1/s_3$ são os pesos que ponderam cada posição do *beacon*, Eq. (3). Toma-se o inverso da distância, pois quanto menor a distância *beacon-smartphone*, maior deverá ser seu peso na média, e o inverso também é verdade, quanto maior a distância *beacon-smartphone* menor deverá ser seu peso. Essa forma de cálculo pode ser vista como uma variação da técnica proposta em [12].

C. Valores experimentais e filtragem

Os experimentos foram feitos utilizando *beacons* fabricados pela Minew, modelo E5. Suas características principais são: BLE 5.0, padrões iBeacon e Eddystone simultaneamente, alcance de 120 metros, bateria de lítio substituível de 2400 mAh, e temperatura de operação -30 a 60 °C. O nível de potência de transmissão neste estudo foi de 0 dBm, sendo que esse valor pode ser ajustado de -30 dBm a +4 dBm [13]. As medições e *software* de localização foram implementadas em um *smartphone* de baixo custo com Sistema operacional Android 11 e Bluetooth 5.0, da fabricante Samsung.

Um experimento preliminar foi feito com um *beacon* e um *software* no *smartphone* para coleta de medições de RSSI. O *beacon* foi configurado com os seguintes parâmetros: período de transmissão de 500 milissegundos e potência de transmissão de -4 dBm. As coletas tiveram uma duração de aproximadamente 30 segundos.

A Fig. 2 mostra os resultados da coleta preliminar de dados. Foram utilizados os valores de 1, 2, 3 e 4 metros como distância *beacon-smartphone*, visada direta (sem obstáculos) e um ambiente fechado, ambos imóveis, com o *smartphone* na posição horizontal com a tela para cima, com os dispositivos no mesmo nível em relação ao solo, buscando minimizar o efeito da diferença de altura entre os dispositivos na distância calculada. Na Fig. 2 é apresentada a potência instantânea medida pelo *smartphone* (valores brutos) para as quatro diferentes distâncias *beacon-smartphone*, sobreposta ao valor médio no intervalo, como referência.

Para diminuir ainda mais as variações da RSSI, foi implementada uma filtragem adicional recursiva do tipo média móvel exponencial que tem como entrada o valor obtido pela média móvel, $P_m[k]$, usando-se o coeficiente α igual a 0,95. Dessa forma se pode obter um valor de potência média menos volátil para ser aplicado na equação da distância Eq. (3).

Para as medidas de posicionamento se considerou um plano cartesiano, com os eixos x (horizontal) e y (vertical), e os *beacons* foram posicionados nesse plano, dispostos a formarem triângulos entre eles. O *smartphone* deve estar dentro do triângulo para que o cálculo pela média ponderada seja efetivo. O processo final de determinar a localização do *smartphone* no plano segue a sequência:

- 1) A aplicação recebe uma mensagem de um *beacon* do escaneamento do *smartphone*, identificando aquele dispositivo pelo seu MAC, e lendo o valor de potência RSSI.
- 2) A cada iteração, uma lista dos três *beacons* utilizados para o cálculo de posicionamento é preenchida e, posteriormente a isso, uma lista de *beacons* reserva também será preenchida até que todos os *beacons* do local sejam identificados.

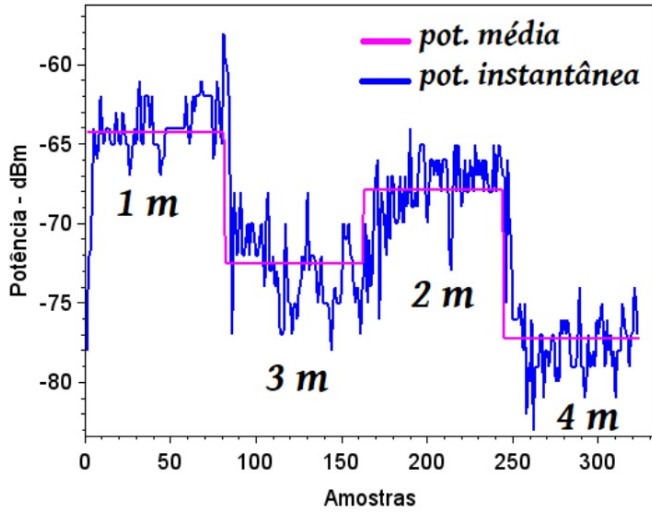


Fig. 2

POTÊNCIA INSTANTÂNEA PARA VÁRIAS DISTÂNCIAS - NOTAR A GRANDE VARIAÇÃO DE POTÊNCIA.

- 3) São guardados os seis últimos valores instantâneos de RSSI de cada beacon, utilizando-os para realizar a filtragem por média móvel (eq. (1)), seguida da filtragem recursiva tipo EMA (eq. (2)), encontrando assim um valor (filtrado) de potência. Faz-se isso para cada beacon.
- 4) Usa-se esse valor de potência filtrada na equação da distância beacon-smartphone (Eq. (3)). Além disso, periodicamente, uma função compara o valor da potência (após filtragem) do beacon reserva com maior valor desse parâmetro, com o beacon da lista utilizada com o menor valor desse parâmetro. Se a diferença entre eles for maior ou igual a 3 dBm, esses beacons são trocados de lista.
- 5) Por último, tomam-se as três distâncias dos três beacons utilizados e calcula-se a posição do smartphone, equações (4) e (5).

D. Comparação com outro método

A triangulação e a trilateração são dois dos métodos de posicionamento interno mais comuns, usando características geométricas entre dispositivos e pontos de posicionamento. Porém, na prática, as estimativas usadas por esses métodos costumam gerar erros [3]. O método de trilateração apresentado em [14] foi usado e testado experimentalmente. Entretanto, os erros de medição de distância entre o beacon e o smartphone favorecem o método de aproximação proposto (equações 3, 4 e 5) neste artigo. Na Fig. 3. é apresentada uma simulação mostrando o método proposto neste artigo e o indicado por Norrdine (método matricial) [14].

Na Fig. 3 é apresentada uma simulação comparando o método proposto neste trabalho com o método matricial. Nessa simulação são usados 3 beacons, que estão nas posições (0,0), (0,6) e (7,0) do plano cartesiano. A posição 'exata' do smartphone é (2,2). O método matricial apresenta um

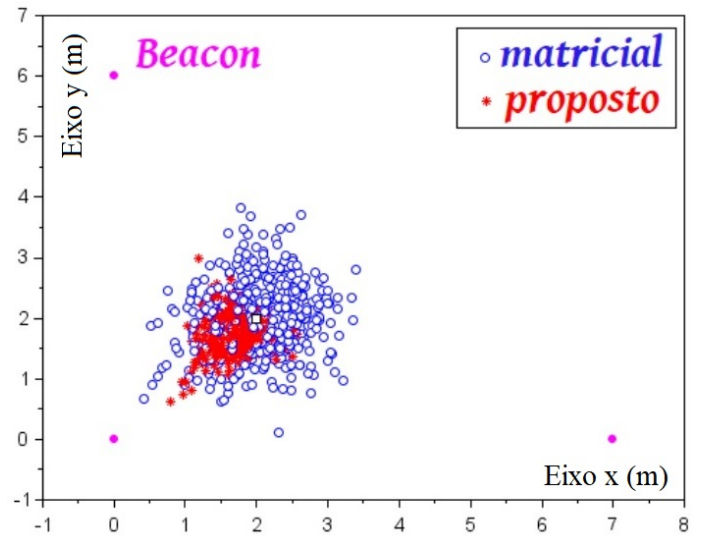


Fig. 3

SIMULAÇÃO MOSTRANDO O DESEMPENHO DO MÉTODO PROPOSTO E DO MÉTODO MATRICIAL [14].

desempenho inferior, pois os erros de medição de distância fazem com que a posição estimada tenha, em média, um erro maior que o do método proposto neste trabalho. Além disso, o custo computacional do método proposto neste artigo é menor do que o indicado em [14].

Nessa simulação foi introduzido um erro aleatório na medida de distância beacon-smartphone. No total são 500 medições para cada método. A Tabela I apresenta todos erros calculados, relativos ao valor exato da posição do smartphone. Destaca-se que o método proposto apresentou erro quadrático médio (MSE) de 0,4831 metros e variância de 0,0548. Para o método matricial o erro quadrático médio foi de 0,7029 metros, com variância de 0,1390.

TABELA I

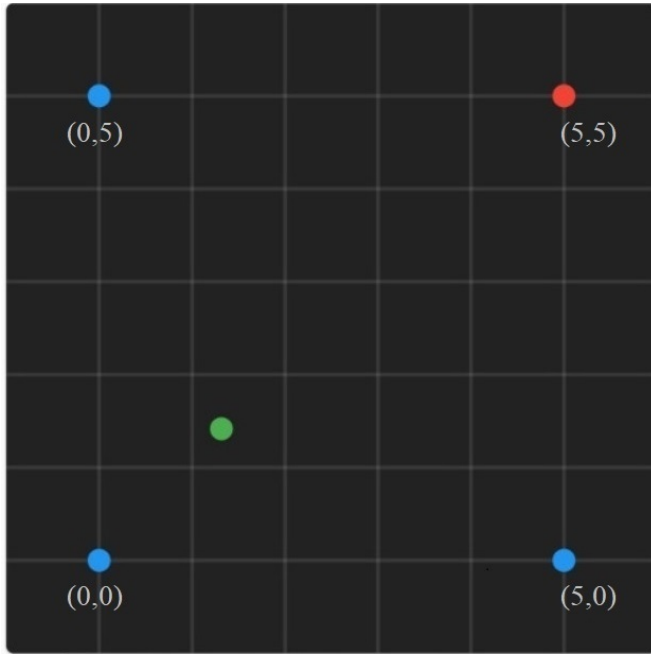
ERROS OBTIDOS COMPARANDO O MÉTODO PROPOSTO COM MÉTODO MATRICIAL [14].

Método	MSE	Erro-min	Erro-max	Variância
Matricial	0,70293	0,01830	2,06322	0,13901
Proposto	0,48309	0,03295	1,66169	0,05485

Os erros de medição de distância fazem com que a posição estimada pelo método matricial tenha, em média, um erro maior que o método proposto.

IV. AVALIAÇÃO EM APLICATIVO NO smartphone

O algoritmo de posicionamento foi inicialmente desenvolvido e validado usando o software Scilab. Depois que os beacons são instalados nos pontos escolhidos, a próxima atividade a ser feita é a obtenção dos coeficientes da reta que aproxima a relação da potência com distância beacon-smartphone. Foram feitas 60 medições para as distâncias de 2m e 4m entre o beacon e o smartphone e calculada a RSSI média. Para a distância de 2m os valores foram (em dB): -79 (mínimo), -62,49 (médio), -53 (máximo) e 4,01 (desvio



Posição estimada (ponto verde): $x=1,32\text{m}$; $y=1,42\text{m}$

Fig. 4

EXEMPLO DE CÁLCULO DA POSIÇÃO DO SMARTPHONE: SMARTPHONE NA POSIÇÃO EXATA (1,5; 1,5); AZUL: BEACON USADO; VERMELHO: BEACON NÃO USADO NOS CÁLCULOS; VERDE: POSIÇÃO CALCULADA DO *smartphone*.

padrão). Para a distância de 4m os valores foram (em dB): -86 (mínimo), -69,61 (médio), -63 (máximo) e 3,50 (desvio padrão). Usando-se esses valores calculamos as constantes A e B da eq. (3), chegou-se nos valores de $A = -0,28$ e $B = -15,532$.

O *software* no *smartphone* pode calcular esses coeficientes facilmente, desde que o dispositivo seja colocado em um local pré-definido para calibração, onde as distâncias para os *beacons* próximos seja conhecida. Com isso a equação da distância *beacon-smartphone*, em metros, dado um valor de potência filtrada, é expressa por:

$$s[k] \approx -0,28 \times P_m[k] - 15,532. \quad (6)$$

Eventualmente, quando o *smartphone* está muito próximo ao *beacon*, o valor de $s[k]$ pode ser negativo, nesses casos a posição do *smartphone* é feita igual à própria posição do *beacon*.

Foi implementado um aplicativo para o *smartphone* que realiza a leitura da RSSI e calcula a posição do dispositivo, mostrando o resultado em sua própria tela. A Fig. 4. mostra uma das capturas de tela que mostra os *beacons* nas suas posições e a posição estimada pelo *smartphone*.

V. CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentado um método de baixo custo computacional, para o cálculo da localização de um *smartphone* em um ambiente fechado usando-se *beacons* bluetooth. Os sinais recebidos dos *beacons* sofrem significativa variação

de intensidade, mesmo sem alteração da posição emissor-receptor ou presença de obstáculos móveis. Para plataformas de desenvolvimento de *software* de alto nível somente dados de RSSI estão disponíveis. A fim de contornar a grande variação do RSSI foram implementados os filtros digitais de média móvel e EMA usados em cascata. Para o cálculo da posição relativa do *smartphone* foi proposto e implementado um método de média ponderada, pois o cálculo usando a inversão de matrizes só funciona bem quando os erros das distâncias estimadas estão na faixa de centímetros. O cálculo da posição do *smartphone* pela média ponderada se mostrou mais tolerante aos erros provocados pela variação de RSSI dos *beacons*. Como trabalho futuro propomos: (a) avaliar a escalabilidade do método para localização do dispositivo quando em um ambiente mais complexo, envolvendo corredores e salas; (b) tratar, via *software*, as situações onde não há 3 *beacons* visíveis pelo dispositivo; (c) incluir, na versão final do aplicativo no *smartphone*, a informação do acelerômetro para auxiliar no cálculo da posição.

REFERÊNCIAS

- [1] ZHUANG, Y., YANG, J., Li, Y., Qi, L., & EL-SHEIMY, N. (2016). Smartphone-based indoor localization with bluetooth low energy *beacons*. *Sensors*, 16(5), 596.
- [2] S. Sadowski and P. Spachos, RSSI-Based Indoor Localization With the Internet of Things, in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 30149-30161, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2843325.
- [3] Ramirez R, Huang CY, Liao CA, Lin PT, Lin HW, Liang SH. A Practice of BLE RSSI Measurement for Indoor Positioning. *Sensors (Basel)*. 2021 Jul 30;21(15):5181. doi: 10.3390/s21155181. PMID: 34372415; PMCID: PMC8347277.
- [4] Bai, L., Ciravegna, F., Bond, R., & Mulvenna, M. (2020). A low cost indoor positioning system using bluetooth low energy. *Ieee Access*, 8, 136858-136871.
- [5] LINDH, J. (2015). Application Report: Bluetooth low energy *beacons*. Texas Instruments.
- [6] BLUETOOTH. (2021). Bluetooth Technology Overview. Disponível em: <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/tech-overview/>. Acesso: 18 de julho de 2023.
- [7] MENEGOTTO, José Luís. Sensoriamento da edificação: um sistema de localização baseado em *beacons* BLE. *Blucher Engineering Proceedings*, 2015, v. 2, n. 2, p. 264-274.
- [8] GAO, Vincent. Proximity and RSSI. 2015. Disponível em <https://www.bluetooth.com/blog/proximity-and-rssi/>. Acesso: 18 de julho de 2023.
- [9] ANDROID. 2021. Disponível em [https://developer.android.com/reference/android/bluetooth/le/ScanResult#getRssi\(\)](https://developer.android.com/reference/android/bluetooth/le/ScanResult#getRssi()). Acesso: 18 de julho de 2023.
- [10] S. A. Cheraghi, V. Namboodiri and L. Walker, GuideBeacon: Beacon-based indoor wayfinding for the blind, visually impaired, and disoriented, 2017 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom), Kona, HI, USA, 2017, pp. 121-130, doi: 10.1109/PERCOM.2017.7917858.
- [11] DINIZ, P. S. R., SILVA, E. A. B. da, & LIMA NETTO, S. (2014). *Processamento digital de sinais: projeto e análise de sistemas* (2. ed.). Porto Alegre: Bookman.
- [12] Beomju, Shin & Lee, jung ho & Lee, Taikjin & Kim, Hyung Seok. (2012). Enhanced weighted K-nearest neighbor algorithm for indoor Wi-Fi positioning systems. *International Journal of Networked Computing and Advanced Information Management*. 2. 574-577. 10.4156/ijnm.vol2.issue2.2.
- [13] MINEW. 2021. Disponível em: <https://www.minew.com/product/e5-location-beacon-2/>. Acesso: 18 de julho de 2023.
- [14] NORRDINE, A. (2012, November). An algebraic solution to the multilateration problem. In *Proceedings of the 15th international conference on indoor positioning and indoor navigation*, Sydney, Australia.