

Cloud Based Hybrid Location System For Indoor And Outdoor Environments

R. Q. Mendes and R. V. Aroca, IEEE Senior Member

Abstract— With the emergence of global positioning systems (GPS), several applications could be designed based on location services, logistics chains, games, agriculture, business, security, among other applications. In this way, GPS allows obtaining locations in an external environment with some accuracy and about one centimeter of accuracy using the GPS with real-time kinematics (RTK). RTK GPS systems, however, are still expensive and rely on individual base stations and have their performance degraded indoors, or even outdoors in the presence of trees or clouds. Also, there is a growing need to locate mobile devices, such as tablets and smartphones, or even indoor mobile robots, where GPS does not work well. Thus, this work proposes a hybrid location system capable of using different technologies to provide indoor and outdoor location of mobile robots or other devices. For outdoor location, the GPS technology was used. For indoor location, Animaltag Chiip 01 Bluetooth Beacons trilateration and Wifi Node MCU (ESP8266) trilateration were used. Moreover, a cloud system was developed for the hybrid location system to process, store and visualize data.

Keywords— GPS, hybrid location system, Bluetooth Beacons, Wifi Node MCU, cloud system.

I. INTRODUÇÃO

Sistemas de localização para ambientes externos

DEVIDO ao seu baixo custo e facilidade de uso, o GPS é um sistema de localização amplamente presente em dispositivos móveis como tablets, telefones celulares, robôs, veículos aéreos não tripulados, e outros tipos de veículos. Contudo, mesmo em ambientes externos o GPS pode não funcionar adequadamente em certas situações e informações adicionais para localização podem ser necessárias. Um exemplo do funcionamento inadequado do GPS em ambientes externos está vinculado a um sistema robótico que emprega um receptor GPS integrado com sensores inerciais para navegação na floresta amazônica [20]. A alta densidade da vegetação da floresta atenua os sinais enviados pelos satélites, podendo até impedir que o receptor GPS colete tais sinais. Sendo assim, o sistema inercial foi integrado através de uma técnica denominada de filtro de Kalman, a fim de se solucionar os problemas do sistema de localização [20].

Adicionalmente, uma limitação do sistema GPS está relacionada a sua precisão de posicionamento, cujo erro chega a ser da ordem de metros. Assim, surgiu o GPS RTK (em português: Posicionamento Cinemático em Tempo Real), que é uma técnica que utiliza uma estação de referência que fornece correções em tempo real para estações móveis, fazendo com que a precisão final obtida seja da ordem de centímetros [9]. Esta técnica está, aos poucos, ocupando espaço em diversas áreas como em: Obras Viárias, Cadastros, Mineração,

Agricultura de Precisão, Topografia, Loteamento, Locação (Construção Civil), Batimetria e Prospecção de Petróleo [18].

Para a robótica, o emprego da técnica de RTK pode ser observado em uma pesquisa desenvolvida por Mirisola et al. [15], em que foi validado, experimentalmente, um veículo robótico específico para ambientes externos. Tal validação experimental foi realizada por meio do método de seguimento de trajetória. No veículo robótico em questão, estavam sendo implantados um GPS RTK Trimble e uma estação AgGPS-332 para aumentar a precisão de localização do robô [15].

Sistemas de localização para ambientes internos

Em geral, a localização por GPS não é adequada para ambientes internos, já que o sinal proveniente dos satélites pode ser atenuado ou extinguido até atingir o receptor em um local fechado. Sabendo-se disso, os *Beacons Bluetooth* estão preenchendo esta lacuna em sistemas de localização para ambientes internos [11]. *Beacons* são dispositivos de dimensões reduzidas que transmitem sinais periódicos de rádio que são captados por receptores/módulos *Bluetooth* que estão próximos a tais dispositivos [11].

Como o alcance do sinal *Bluetooth* emitido pelos *Beacons* é limitado, e uma vez que o preço destes dispositivos é relativamente baixo, a disposição de vários *Beacons* no interior de certos locais pode ser utilizada como uma ferramenta para a localização *indoor* de aparelhos móveis. Chawathe [6] desenvolveu um sistema que emprega o sinal *Bluetooth* de *Beacons*, juntamente com o método *cell-based*, para a determinação da localização de aparelhos móveis. Através do método *cell-based*, é possível encontrar a interseção dos alcances limitados dos sinais de *Beacons* visíveis, sem incluir medidas de distância ou de ângulo, a fim de se determinar a localização do aparelho móvel em ambientes internos [6].

Uma desvantagem na aplicação de sinais *Bluetooth* para a localização *indoor* de aparelhos móveis está relacionada a latência, que pode chegar a aproximadamente 20 segundos na fase de descoberta do protocolo (fase de detecção dos *Beacons*) [6]. Deste modo, em uma outra pesquisa, Chawathe [7] introduz o método de localização *probe-based*, cujo conceito está vinculado ao uso de um mapa de *Beacons* e do último local conhecido para determinar possíveis *Beacons* visíveis na vizinhança do local atual e, a partir disso, determinar sua visibilidade por meio de sondas diretas [7].

Em um artigo publicado por Raghavan et al. [17], foi descrito um método de trilateração de sinais *Bluetooth* para a determinação da localização de um robô móvel em ambientes internos. Tal método consiste em determinar a posição de um objeto por meio de medidas simultâneas de distância de 3 locais

R. Q. Mendes, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, São Paulo, Brasil, rauldequeirozmendes@gmail.com.

R. V. Aroca, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, São Paulo,

Brasil, aroca@ufscar.br.

Corresponding author: Raul de Queiroz Mendes

conhecidos. Além disso, este método de trilateração visa determinar uma solução que minimiza o erro relativo total e não o erro absoluto [17].

Além da tecnologia *Bluetooth*, a tecnologia de rede sem fio *Wifi* pode ser utilizada como base para localização de objetos em ambientes internos [4]. Seguindo a mesma linha de pesquisa para localização de robôs em ambientes internos, Biswas e Veloso [4] descreveram um sistema de localização e navegação para um robô autônomo. Como foi relatado nesta pesquisa, tal robô é capaz de operar em ambientes internos através de um mapa de assinaturas *Wifi* com restrições geométricas, de um modelo de percepção do ambiente por meio da amostragem da força do sinal *Wifi* e de dados de odometria [4].

Uma outra tecnologia que vem ganhando interesse da comunidade científica para sistemas de localização em geral é a de identificação por radiofrequência (*RFID*). Essa tecnologia é uma forma de comunicação sem fio que utiliza ondas de rádio para identificar e rastrear objetos com *tags* (etiquetas de baixo custo capazes de armazenar e trocar informações), por meio de leitores [21]. Em um trabalho realizado por Azzouzi et al. [1], foi determinada uma nova abordagem para medida de ângulo de chegada para localizar *tags* de *RFID UHF*. Nesta pesquisa, obteve-se um erro de posição de 0,21 metros em uma área de teste de 3x3 metros, considerando-se 25 pontos de teste [1].

Sistemas de localização híbridos

Sistemas de localização híbridos são aqueles que integram múltiplas tecnologias para a localização de objetos em ambientes internos e externos. A utilização de múltiplas tecnologias de localização, simultaneamente, pode ser uma técnica benéfica aos sistemas de localização internos e externos, uma vez que é possível aumentar a disponibilidade e a exatidão de tais sistemas [19]. No entanto, há a necessidade de se estudar as melhores formas de unir as informações de vários tipos de tecnologia de localização e evitar que esta união cause prejuízos para a integridade da posição encontrada [19].

Em um artigo publicado por ZHU et al. [25], foi descrito um sistema de localização para ambientes internos utilizando *Wifi* e *Beacons Bluetooth*. O sistema em questão opera da seguinte maneira: depois de solicitar a entrada ao usuário, o dispositivo móvel envia assinaturas *Wifi* para um servidor de mapas e também permite que os *Beacons* compartilhem suas posições e informações de assinaturas para preencher o mapa. Deste modo, os próximos dispositivos móveis que entrarem no local podem visualizar os *Beacons* e receber informações de localização no cômodo sem a necessidade de solicitações ao usuário [25].

DiGiampaolo e Francesco [8] desenvolveram um sistema que combina dados de odometria de um robô e leituras *RFID* para criar um sistema de localização global. Nesta pesquisa, *tags* de *RFID* de alta frequência (*UHF*) foram dispostas no teto de ambientes para serem detectadas por um robô móvel, até que este se encontrasse abaixo das *tags*. Tal método apresentou um erro de posição de 0,1 metros [8].

Existem ainda diversas outras técnicas de localização e uma vasta literatura sobre sistemas de localização usando visão de máquina e técnicas chamadas de localização e mapeamento simultâneo (*SLAM*). O foco deste trabalho está na integração de tecnologias de radiofrequência, como *Wifi* e *Bluetooth*, e a tecnologia *GPS* para implementar um sistema híbrido de

localização que funcione tanto em ambiente interno quanto externo.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Ambiente de desenvolvimento

Inicialmente, propôs-se para este projeto, o estudo teórico e experimental de diversas tecnologias que poderiam ser aplicadas para localização de robôs e dispositivos móveis, e após este estudo, buscou-se desenvolver um sistema híbrido de localização, que integra *GPS* (localização *outdoor*) e outras tecnologias para localização *indoor* simultaneamente.

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram utilizados os seguintes dispositivos e equipamentos: 3 *Animaltag Chiip 01 Beacons Bluetooth*, 3 módulos *Wifi Node MCU* (ESP8266), um *smartphone* com sistema operacional *Android 7.0* e que suporta *Bluetooth 4.0* e um *PC* com sistema operacional *Windows 10*. A Fig. 1 ilustra a estrutura completa do sistema de localização híbrido, juntamente com o sistema em nuvem.

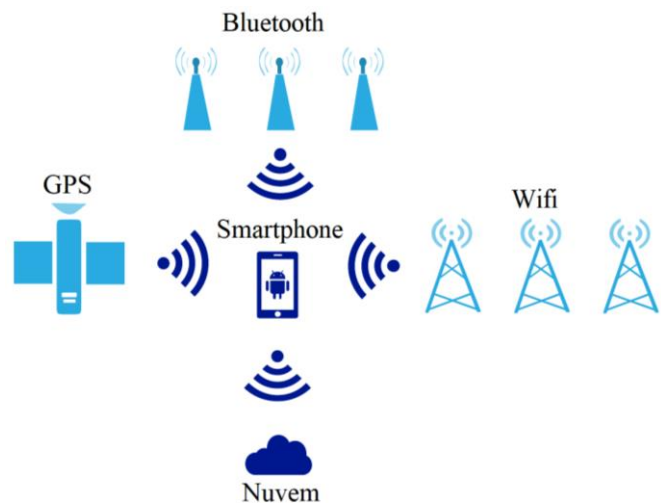


Figura 1. Esquemático que ilustra a composição do sistema de localização híbrido, juntamente com o sistema em nuvem.

Na estrutura da Fig. 1, é possível notar que o sistema opera a partir da aquisição dos sinais *Bluetooth* (localização *indoor*), *Wifi* (localização *indoor*) e *GPS*, simultaneamente, por meio de um aplicativo desenvolvido para *smartphone*, o qual transmite estes dados para um *Web Service*, programado em linguagem PHP, na mesma frequência do sinal dos *Beacons Bluetooth* (1 Hz). Neste PHP, são executados todos os cálculos de localização, assim qualquer atualização beneficia todos usuários. A partir do tratamento (no servidor) dos dados coletados com o *smartphone*, estes são armazenados em um banco de dados em nuvem, o qual foi desenvolvido na plataforma MySQL. Após a etapa de armazenamento, os dados são plotados em um mapa e em um gráfico (em tempo real) disponíveis via web para usuários e outros sistemas.

Sistema de localização híbrido (HLS)

O desenvolvimento do aplicativo denominado de HLS (*Hybrid Location System*) para a aquisição dos sinais dos dispositivos *Wifi*, *Bluetooth* e *GPS*, para a transmissão de tais

sinais ao *Web Service* e para a visualização das posições do *smartphone* foi feito em linguagem Java na plataforma Android Studio, uma vez que *smartphones* e outros dispositivos móveis que utilizam o sistema operacional Android, atualmente, são amplamente utilizados.

Através de tal aplicativo, são determinadas as distâncias em metros entre o dispositivo móvel e os 3 *Beacons*, com o auxílio de um algoritmo pré-desenvolvido da biblioteca disponível em [24]. Este algoritmo pré-desenvolvido foi calibrado por meio de testes em laboratório. Os *Beacons* são diferenciados de acordo com seu valor específico de *hash code*.

Além disso, por meio do HLS, são coletados os dados de frequência e RSSI (*Received Signal Strength Indicator* – indica a intensidade do sinal recebido) dos 3 módulos *Wifi*, os quais foram programados para funcionar em modo AP (ponto de acesso *Wifi*), de forma que fosse possível identificar uma rede específica para cada módulo e diferenciar seus valores de RSSI. Os valores de latitude e longitude do *smartphone* também são coletados pelo HLS.

Sistema em nuvem

A partir da aquisição de todos os dados de localização interna e externa, o HLS envia os dados coletados a um servidor (a uma frequência de 1 Hz), onde são realizados os cálculos de distância entre os módulos *Wifi* e o *smartphone* através da equação de transmissão em espaço livre de Friis e dos valores de frequência (em MHz) e RSSI (em dB) de tais módulos. Esta equação de transmissão em espaço livre foi calibrada por meio da Tabela II do artigo escrito por Barai, Biswas e Sal [2].

A equação de espaço livre de Friis determina a relação de perdas entre a potência recebida por uma antena e a potência transmitida por outra antena, considerando um espaço livre entre elas [5]. No entanto, esta equação pode ser rearranjada para que se possa determinar a distância entre a antena transmissora e a receptora. A equação de transmissão em espaço livre de Friis, para determinar a distância entre antenas, pode ser encontrada da seguinte forma [5, 16]:

$$\frac{P_r}{P_t} = A_t A_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (1)$$

Em que:

P_r : Potência recebida [W];

P_t : Potência transmitida [W];

A_t : Ganho da antena transmissora;

A_r : Ganho da antena receptora;

d : Distância da antena transmissora à receptora [m];

λ : Comprimento de onda do sinal transmitido [m].

$$P_L = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (2)$$

Em que:

P_L : Perda em espaço livre.

$$P_L(\text{dB}) = 10 \log \left(\frac{4\pi d f}{c} \right)^2 \quad (3)$$

Em que:

c : Velocidade da luz no vácuo [Mm/s];

f : Frequência do sinal transmitido [MHz].

$$P_L(\text{dB}) = 20 \log \left(\frac{4\pi d f}{c} \right) \quad (4)$$

$$P_L(\text{dB}) = 20 \log d + 20 \log f - 27,55 \quad (5)$$

$$d = 10^{\kappa} [m] \quad (6)$$

$$\kappa = \frac{P_L}{20} - \log f + 1,3775 \quad (7)$$

De (1) para (2), assumiu-se que $A_t = 1$; $A_r = 1$ e $P_t/P_r = P_L$. Além disso, de (2) para (3), assumiu-se que $\lambda = c/f$ [m], e, de (4) para (5), assumiu-se que $\pi = 3,1415$ e que $c = 299,7925$ [Mm/s].

No *Web Service*, também são calculadas as trilaterações em duas dimensões (x e y) dos sinais dos *Beacons Bluetooth* e dos sinais dos módulos *Wifi* a fim de se determinar a posição *indoor* do dispositivo móvel (x, y). A Fig. 2 ilustra o funcionamento do sistema de trilateração em duas dimensões aplicado neste projeto.

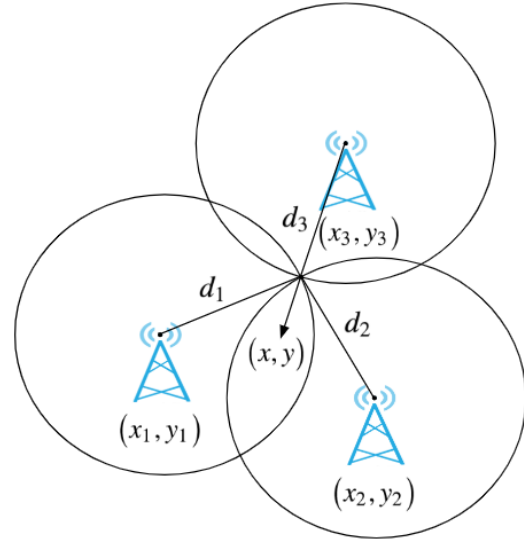


Figura 2. Esquemático do sistema de trilateração em duas dimensões de sinais de radiofrequência.

Os cálculos de trilateração são realizados considerando-se as três coordenadas x e y das posições fixas dos 3 dispositivos transmissores de sinais de radiofrequência ((x_1, y_1) , (x_2, y_2) e (x_3, y_3)), além das distâncias de cada um dos 3 dispositivos ao *smartphone* (d_1 , d_2 e d_3). A coordenada (x, y) é determinada a partir da interseção dos 3 sinais dos dispositivos transmissores. Tendo em vista a Fig. 2, pode-se encontrar as equações de trilateração da seguinte forma [22]:

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = d_1^2 \quad (8)$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = d_2^2 \quad (9)$$

$$(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = d_3^2 \quad (10)$$

$$x^2 - 2x_1 + x_1^2 + y^2 - 2y_1 + y_1^2 = d_1^2 \quad (11)$$

$$x^2 - 2x_2 + x_2^2 + y^2 - 2y_2 + y_2^2 = d_2^2 \quad (12)$$

$$x^2 - 2x_3 + x_3^2 + y^2 - 2y_3 + y_3^2 = d_3^2 \quad (13)$$

$$\alpha x + \beta y = \gamma \quad (14)$$

$$\delta x + \varepsilon y = \zeta \quad (15)$$

$$\alpha = -2x_1 + 2x_2 \quad (16)$$

$$\beta = -2y_1 + 2y_2 \quad (17)$$

$$\gamma = d_1^2 - d_2^2 - x_1^2 + x_2^2 - y_1^2 + y_2^2 \quad (18)$$

$$\delta = -2x_2 + 2x_3 \quad (19)$$

$$\varepsilon = -2y_2 + 2y_3 \quad (20)$$

$$\zeta = d_2^2 - d_3^2 - x_2^2 + x_3^2 - y_2^2 + y_3^2 \quad (21)$$

$$x = \frac{\beta\zeta - \gamma\varepsilon}{\delta\beta - \alpha\varepsilon} \quad (22)$$

$$y = \frac{\gamma\delta - \alpha\zeta}{\gamma\beta - \alpha\varepsilon} \quad (23)$$

A fim de se determinar os valores de α , β , γ , δ , ϵ e ζ , efetuou-se as seguintes manipulações matemáticas com as equações em questão: (11) – (12), e (12) – (13).

Após o tratamento dos dados, no servidor, para a determinação das posições interna e externa do dispositivo móvel, onde também foram implementadas as calibrações da equação de transmissão de Friis e do valor da distância dos *Beacons Bluetooth*, tais dados tratados são enviados para um banco de dados em nuvem. Os dados de posição do dispositivo móvel, armazenados no banco de dados, são plotados em um mapa que pode ser visualizado por meio do aplicativo HLS (ou via *web*), o qual acessa o servidor do mapa em questão e mostra a posição atual do *smartphone* (Fig. 3).

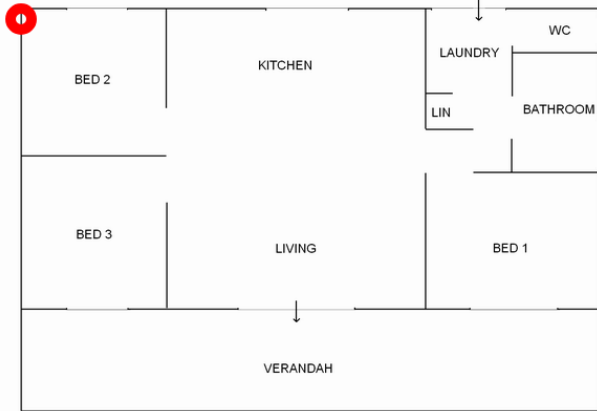


Figura 3. Mapa do Web Service apresentado na tela do aplicativo HLS que mostra a posição do smartphone.

Além disso, os valores de latitude e longitude do dispositivo móvel, armazenados no banco de dados, são plotados em um gráfico em tempo real (disponível em [12]) que apresenta a posição externa de tal dispositivo em função do tempo e que atualiza os dados plotados a cada 5 pontos armazenados de latitude e longitude.

Finalmente, como mencionado, os tratamentos e armazenamentos de dados foram realizados em nuvem neste projeto, pois o sistema se torna flexível e de fácil manutenção, atualização e otimização, beneficiando todos os usuários. A Fig. 4 ilustra as funções que são executadas em nuvem.

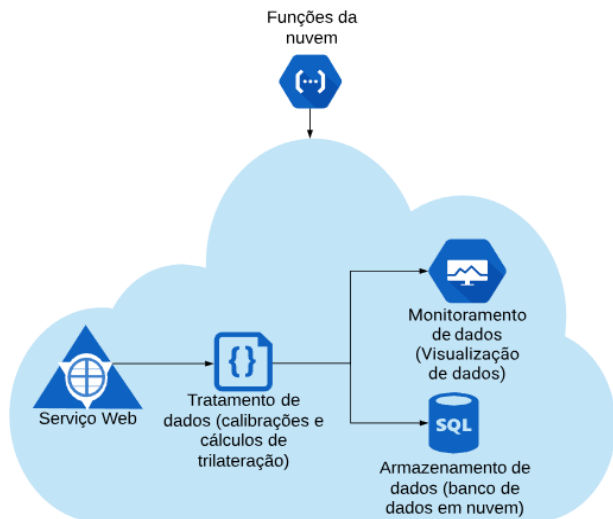


Figura 4. Esquemático da estrutura do sistema em nuvem.

Calibrações

A calibração da equação de transmissão Friis (equações (6) e (7)) foi realizada com o auxílio da Tabela I, onde os valores de RSSI com relação a distâncias físicas para módulos *Node MCU* foram referenciados da Tabela II do artigo escrito por Barai, Biswas e Sal [2]. Os valores de distância da coluna “Equação de Distância de Friis [m]” da Tabela I foram obtidos aplicando-se os valores de RSSI da coluna “RSSI [dB]” desta mesma tabela nas equações (6) e (7) (para valores de frequência fixos dos módulos *Wifi Node MCU*).

TABELA I
CALIBRAÇÃO DA EQUAÇÃO DE ESPAÇO LIVRE DE FRIIS

Distância Esperada [m]	RSSI [dB]	Equação de Distância de Friis [m]
0,3	-55	5,561
0,4	-59	8,813
0,5	-60	9,888
0,6	-62	12,449
0,7	-66	19,730
0,8	-68	24,838
0,9	-69	27,869
1	-71	35,085
2	-74	49,559
3	-79	88,130
4	-81	110,950
5	-83	139,680
6	-84	156,720
7	-85	175,840
8	-86	197,300
9	-87	221,370
10	-88	248,380

Na Tabela I, os valores de distância obtidos pela equação de transmissão em espaço livre de Friis foram determinados por meio dos valores de RSSI de acordo com as devidas distâncias físicas. O gráfico da Fig. 5 relaciona os valores das distâncias esperadas com os valores determinados pela equação de Friis. Nos eixos x e y, foram plotados os valores da coluna “Equação de Distância de Friis [m]” da Tabela I e da coluna “Distância Esperada [m]” desta mesma tabela respectivamente. De acordo com o gráfico da Fig. 5, pode-se concluir que a relação mencionada é linear ($R^2 = 0,9948$).

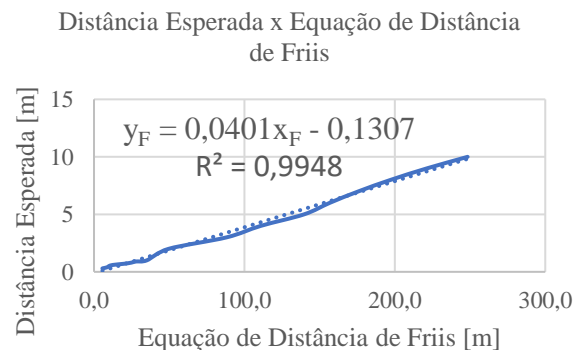


Figura 5. Gráfico utilizado para estabelecer a relação para calibração da equação de transmissão em espaço livre de Friis.

Por meio da linha de tendência plotada no Gráfico da Fig. 5, obteve-se a equação (24), a qual foi implementada no servidor para calibrar a equação de Friis.

$$y_F = 0,0401x_F - 0,1307 \quad (24)$$

O teste de calibração do algoritmo pré-desenvolvido da biblioteca disponível em [24] foi realizado de acordo com o plano de testes da Fig. 6.

Operador (Raul de Queiroz Mendes)	1														
Tensão de alimentação do Beacon (pilha de Lítio Sony CR2016 3V)	1														
Smartphone	1														
Local do Beacon (coordenada: (0, 0))	1														
Amostra do Beacon	1					2					3				
Local do Smartphone (coordenadas: (0,5, 0);(1, 0);(1,5, 0);(2, 0);(2,5, 0))	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Y (Distância do emissor ao Smartphone)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Figura 6. Plano de testes para a calibração do algoritmo pré-desenvolvido da biblioteca de Beacons [24].

No plano da Fig. 6, é possível verificar que foram selecionados 5 valores de distâncias esperadas (0,5; 1; 1,5; 2; 2,5) entre os Beacons e o dispositivo móvel. Os valores de distância entre os Beacons e o smartphone, obtidos pelo algoritmo em questão, foram armazenados no banco de dados e posteriormente agrupados na Tabela II.

TABELA II
CALIBRAÇÃO DE DISTÂNCIA PARA OS BEACONS 1, 2 E 3

Distância Esperada [m]	Distância do Beacon 1 (algoritmo) [m]	Distância do Beacon 2 (algoritmo) [m]	Distância do Beacon 3 (algoritmo) [m]
0,5	3,050	3,177	2,963
1	6,019	5,376	5,192
1,5	7,548	6,850	6,556
2	8,735	7,702	7,481
2,5	9,298	8,468	8,457

A partir da Tabela II, foram plotados gráficos da Fig. 7, da Fig. 8 e da Fig. 9, relacionando as distâncias esperadas com as distâncias obtidas pelo algoritmo da biblioteca de Beacons [24] para os Beacons 1, 2 e 3 respectivamente.

Nos gráficos da Fig. 7, da Fig. 8 e da Fig. 9 foram plotadas linhas de tendência a fim de se determinar uma expressão matemática que correlaciona os valores de distância teóricos com os valores de distância experimentais entre os Beacons e o

dispositivo móvel. Além disso, visou-se gerar um termo de correlação R^2 para cada gráfico.

Distância Esperada x Distância para o Beacon 1 (Algoritmo)

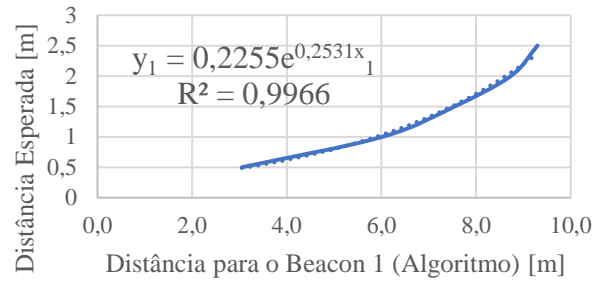


Figura 7. Gráfico que relaciona as distâncias esperadas com as distâncias obtidas para o Beacon 1 por meio do algoritmo em questão.

Distância Esperada x Distância para o Beacon 2 (Algoritmo)

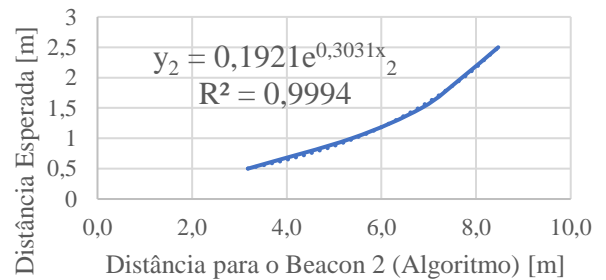


Figura 8. Gráfico que relaciona as distâncias esperadas com as distâncias obtidas para o Beacon 2 por meio do algoritmo em questão.

Distância Esperada x Distância para o Beacon 3 (Algoritmo)

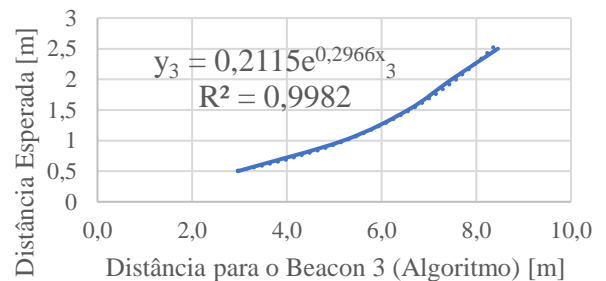


Figura 9. Gráfico que relaciona as distâncias esperadas com as distâncias obtidas para o Beacon 3 por meio do algoritmo em questão.

Com os dados plotados da Tabela II, foram geradas as equações (25), (26) e (27), respectivamente aos Beacons 1, 2 e 3.

$$y_1 = 0,2255e^{0,2531x_1} \quad (25)$$

$$y_2 = 0,1921e^{0,3031x_2} \quad (26)$$

$$y_3 = 0,2115e^{0,2966x_3} \quad (27)$$

Tendo em vista as equações (25), (26) e (27) e os valores de correlação R^2 , tem-se que a relação entre as distâncias

esperadas e as distâncias obtidas pelo algoritmo é exponencial. Tais equações também foram implementadas no *Web Service* para calibrar o algoritmo.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Testes

Os testes realizados para verificar a funcionalidade do sistema de localização híbrido foram executados de acordo com o plano da Fig. 10.

Operador (Raul de Queiroz Mendes)	1									
Tensão de alimentação dos Beacons/módulos Wifi (pilha CR2016 3V e USB 5V respectivamente)	1									
Smartphone	1									
Local fixo dos Beacons/módulos Wifi (coordenadas: (2, 0);(2, 3);(0,5, 1))	1									
Local do Smartphone (coordenadas: (1,3, 1,1);(1,9, 1,4);(2, 2);(2,3, 1,5);(1,5, 2))	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Y (Dados de localização dos Beacons (x,y))	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Y (Dados de localização dos módulos Wifi (x,y))	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Y (Dados de localização do GPS (latitude, longitude))	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Figura 10. Plano de testes para verificar a funcionalidade do sistema de localização híbrido.

De acordo com o plano de testes da Fig. 10, os *Beacons* e os módulos *Wifi* foram posicionados em locais fixos ((2, 0);(2, 3);(0,5, 1)). A partir disso, variou-se a posição do *smartphone* em 5 pontos e, para cada rodada, coletou-se os dados de localização.

A Tabela III apresenta as posições do *smartphone* determinadas pelo método de trilateração dos sinais dos *Beacons* e dos sinais dos módulos *Wifi* ESP8266, em relação as posições esperadas.

TABELA III
POSIÇÕES DO SMARTPHONE DETERMINADAS PELOS MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO INDOOR EM RELAÇÃO AS POSIÇÕES ESPERADAS

Coordenada	Posição Esperada [m]	Posição (Beacon) [m]	Posição (ESP8266) [m]	Erro de Posição [%] (Beacon)	Erro de Posição [%] (ESP8266)
x	1,3	1,386	1,214	6.636	6.653
y	1,1	1,467	0,928	33.341	15.642
x	1,9	1,914	1,961	0.741	3.216
y	1,4	1,600	1,410	14.262	0.743
x	2	1,830	2,076	8.514	3.775
y	2	1,648	1,738	17.615	13.085
x	2,3	2,378	2,259	3.373	1.787
y	1,5	1,734	1,452	15.620	3.200
x	1,5	1,484	1,599	1.036	6.600
y	2	1,904	1,738	4.787	13.085

A Tabela IV mostra as coordenadas geográficas do *smartphone* obtidas por meio do aplicativo HLS e as coordenadas geográficas verificadas pelo *Google Maps* (ambas com relação as posições locais do dispositivo móvel utilizadas em teste) [10].

TABELA IV
RELAÇÃO ENTRE AS COORDENAS GEOGRÁFICAS OBTIDAS PELO SMARTPHONE E AS COORDENADAS GEOGRÁFICAS VERIFICADAS PELO GOOGLE MAPS

Posição local do smartphone (x, y) [m]	Coordenada Geográfica Obtida (Latitude, Longitude) [°]	Coordenada Geográfica Esperada (Latitude, Longitude) [°]	Erro de Posição GPS [m]
(1,3, 1,1)	(-21,980833, -47,878049)	(-21,980714, -47,877901)	21,102563
(1,9, 1,4)	(-21,980832, -47,878048)	(-21,980706, -47,877904)	21,261992
(2, 2)	(-21,980830, -47,878050)	(-21,980703, -47,877912)	20,839963
(2,3, 1,5)	(-21,980830, -47,878051)	(-21,980699, -47,877904)	21,879638
(1,5, 2)	(-21,980828, -47,878053)	(-21,980711, -47,877912)	20,359537

Através da equação (28), pode-se determinar o erro relativo entre as coordenadas da posição do *smartphone* esperadas e aquelas obtidas pelos dois métodos utilizados para determinação de posição interna [2].

$$\text{Erro Relativo} [\%] = \frac{|\rho_{esperado} - \rho_{obtido}|}{\rho_{esperado}} \times 100 \quad (28)$$

De acordo com a Tabela III, os erros máximo e mínimo de coordenada de posição do dispositivo móvel, gerados por meio dos *Beacons*, foram iguais a 33,341% e 0,741% respectivamente, e, aqueles gerados por meio dos módulos *Wifi*, foram iguais a 15,642% e 0,743% respectivamente. Os erros máximos de posição *indoor* podem ser explicados pela presença de não linearidades no ambiente onde foram executados os testes de validação do sistema em questão, gerando interferências na recepção do sinal pelo dispositivo móvel (apesar dos *Beacons* e dos módulos *Wifi* terem sido calibrados).

Tendo em vista tais erros relativos máximos e mínimos de coordenada de posição interna, conclui-se que o sistema híbrido aplicado para localização em ambientes internos é confiável.

A coluna de erro de posição GPS da Tabela IV relaciona as coordenadas geográficas obtidas em teste e as coordenadas geográficas verificadas pelo *Google Maps* [10]. Tais erros foram calculados a partir das equações (29), (30) e (31) [3].

$$DLA = |lat_{esperada} - lat_{obtida}| \times 60 \times 1852 \quad (29)$$

DLA: Diferença de latitude [m];

lat: latitude [°].

$$DLO = |long_{esperada} - long_{obtida}| \times 60 \times 1852 \quad (30)$$

DLO: Diferença de longitude [m];

long: longitude [°].

$$\text{Erro (GPS)} = \sqrt{(DLA)^2 + (DLO)^2} [m] \quad (31)$$

As constantes 60 e 1852 das equações (29) e (30) foram utilizadas para converter a unidade graus [°] em milha náutica [NM] e a unidade milha náutica [NM] em metros [m] respectivamente. Além disso, o método utilizado nas equações (29), (30) e (31) foi validado comparando-se os dados da coluna “Erro de Posição GPS [m]” da Tabela IV com os valores de posição GPS em metros obtidos por meio do site disponível em [23]. Neste site, foram inseridos os dados das coordenadas geográficas obtida e esperada da Tabela IV, bem como o modelo da Terra WGS84/NAD83/GRS80 a fim de se determinar os valores de posição GPS em metros.

Por meio da comparação dos valores dos erros de posição GPS em metros da Tabela IV com os dados gerados pelo site disponível em [23], obteve-se um erro máximo de 4,575% (erro da ordem de centímetros), comprovando que o método utilizado em questão é válido para esta aplicação. Os valores dos erros de posição GPS da Tabela IV são da ordem de dezenas de metros e, devido a isso, conclui-se que o sistema GPS não é confiável para a determinação da localização de dispositivos móveis em ambientes internos, restringindo assim sua utilização para ambientes externos.

Finalmente, a Fig. 11 mostra a tela inicial do aplicativo HLS com um ícone (*START RANGING*) para ser clicado a fim de se iniciar o processo de monitoramento do dispositivo móvel.

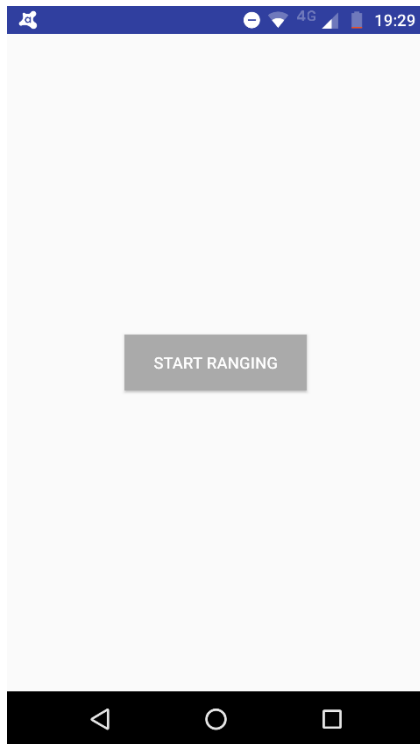


Figura 11. Tela inicial do aplicativo HLS.

A Fig. 12 mostra a tela do aplicativo que acessa o servidor em nuvem e monitora a posição *indoor* do dispositivo móvel através de um mapa, enquanto a posição *outdoor* do dispositivo é monitorada por meio de um outro servidor (disponível em [12]) que apresenta um gráfico em tempo real.

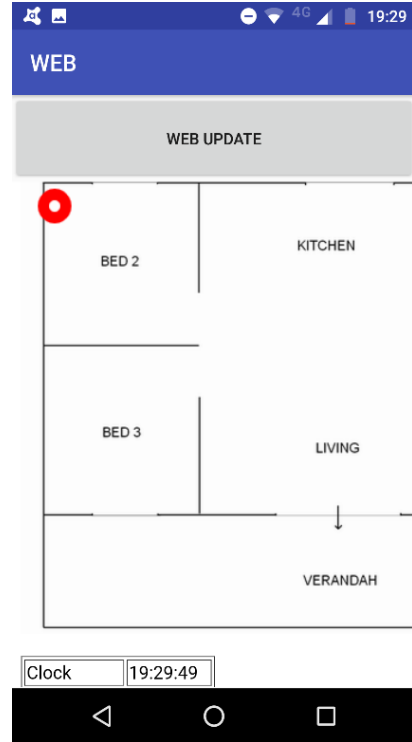


Figura 12. Tela do aplicativo HLS que mostra o mapa para monitoramento do *smartphone*.

IV. CONCLUSÃO

O sistema de localização híbrido desenvolvido neste projeto apresentou-se como um sistema aplicável, funcional e com uma considerável precisão para a determinação da posição de robôs e dispositivos móveis em ambientes internos e externos, tendo em vista os erros das coordenadas de posição obtidos por meio dos testes executados. Além disso, a utilização de sistemas em nuvem para processamento, armazenamento e visualização de dados mostrou-se viável, prática e eficaz, considerando-se todas as manipulações de dados que foram realizadas rapidamente e eficientemente durante o funcionamento do sistema de localização híbrido. O sistema de localização desenvolvido neste projeto pode ser disseminado e aplicado em diversos outros dispositivos móveis e em locais distintos, uma vez que o aplicativo HLS apresenta uma interface simples e fácil de se utilizar, e sua codificação está aberta e publicada no Github [13, 14]. Como próximos passos, novas tecnologias de localização *indoor* e *outdoor*, para dispositivos móveis, serão avaliadas, testadas e, possivelmente, incorporadas no sistema vigente a fim de se aumentar sua precisão e sua eficiência. Acrescentando-se a isso, trabalhos já estão sendo realizados para melhorar a precisão dos dispositivos implementados.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a universidade Federal de São Carlos (UFSCar) pela disponibilidade de equipamentos e laboratórios para a realização da pesquisa. Agradecemos também ao órgão CNPq pelo financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] Azzouzi, S. et al. *New measurement results for the localization of UHF RFID transponders using an Angle of Arrival (AoA) approach*. IEEE International Conference on RFID, p. 91-97, 2011.
- [2] Barai, S., Biswas, D., & Sau, B. (2017, December). *Estimate distance measurement using NodeMCU ESP8266 based on RSSI technique*. In Antenna Measurements & Applications (CAMA), 2017 IEEE Conference on (pp. 170-173). IEEE.
- [3] Beni, E. *Calculando distâncias e direções utilizando Coordenadas Geográficas*. Piloto Policial, set. 2009. Disponível em: <https://www.pilotopolicial.com.br/calculando-distancias-e-direcoes-utilizando-coordenadas-geograficas/>. Acesso em: 9 mai. 2018.
- [4] Biswas, J.; Veloso, M. *WiFi localization and navigation for autonomous indoor mobile robots*. IEEE International Conference on Robotics and Automation, p. 4379-4384, 2010.
- [5] Breinbjerg, O., & Kaslis, K. (2017, August). *On the accuracy of Friis' transmission formula at short range*. In General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS), 2017 XXXIInd (pp. 1-2). IEEE.
- [6] Chawathe, S. S. *Beacon Placement for Indoor Localization using Bluetooth*. 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, p. 980-985, 2008.
- [7] Chawathe, S. S. *Low-latency indoor localization using Bluetooth Beacons*. IEEE, 12th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, p. 1-7, 2009.
- [8] Digiampolo, E.; Francesco, M. *A Passive UHF-RFID System for the Localization of an Indoor Autonomous Vehicle*. IEEE, IEEE Transactions on Industrial Electronics p. 3961-3970, 2011.
- [9] Feng, Yanming, and Jinling Wang. *GPS RTK performance characteristics and analysis*. Journal of Global Positioning Systems 7.1 (2008): 1-8.
- [10] Google Maps. *UFSCar - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos - SP*. 2018. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/place/UFSCar+-+Universidade+Federal+de+S%C3%A3o+Carlos/@-21.9841396,-47.8824341,17z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x94b870d8899b96c5:0x26bd4c677a5af1d4!8m2!3d-21.9841446!4d-47.8802454>. Acesso em: 9 mai. 2018.
- [11] Maycotte, H. O. *Beacon Technology: The Where, What, Who, How and Why*. Forbes, set. 2015. Disponível em: <https://www.forbes.com/sites/homaycotte/2015/09/01/Beacon-technology-the-what-who-how-why-and-where/#289bbd881aaf>. Acesso em: 18 jan. 2018.
- [12] Mendes, R. Q. *Coordenadas GPS x Tempo*. Robótica UFSCar, jun. 2018. Disponível em: <http://www.robotica.ufscar.br/~raul/mapa/html/graph.html>. Acesso em: 2 dez. 2018.
- [13] Mendes, R. Q. *RauldeQueirozMendes/Cloud-System*. Github, jun. 2018. Disponível em: <https://github.com/RauldeQueirozMendes/Cloud-System>. Acesso em: 2 dez. 2018.
- [14] Mendes, R. Q. *RauldeQueirozMendes/Web-Service---Beacon---Wifi---GPS*. Github, jun. 2018. Disponível em: <https://github.com/RauldeQueirozMendes/Web-Service---Beacon---Wifi---GPS>. Acesso em: 29 jun. 2018.
- [15] Mirisola, L. et al. *Validação Experimental de um Veículo Robótico Terrestre Para Ambientes Externos*. X Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI), São João del-Rei, p. 1322-1327, 2011.
- [16] Poole, I. *Free Space Path Loss: Details, Formula, Calculator*. radio-electronics.com. Adrio Communications Ltd. Disponível em: <https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/propagation-overview/free-space-path-loss.php>. Acesso em: 25 abr. 2018.
- [17] Raghavan, A. N et al. *Accurate mobile robot localization in indoor environments using Bluetooth*. IEEE, IEEE International Conference on Robotics and Automation, p. 4391-4396, 2010.
- [18] Rodrigues, D. *Como Utilizar o seu GPS/GNSS RTK*. MundoGEO, maio. 2014. Disponível em: <http://mundogeo.com/blog/2014/05/30/artigo-como-utilizar-o-seu-gpsgnss-rtk/>. Acesso em: 17 jan. 2017.
- [19] Rodrigues, M. L. *Localização em Ambientes Internos Utilizando Múltiplas Tecnologias Sem Fio*. 2011. 145 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2011.
- [20] Stein, P. S.; Reis, N. R. S. D. *Sistema Integrado de Navegação para o Robô Ambiental Híbrido na Floresta Amazônica*. Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, 2007.
- [21] Violino, B. *What is RFID ?*. RFID Journal, jan. 2005. Disponível em: <http://www.rfidjournal.com/articles/view?1339>. Acesso em: 19 de jan. 2018.
- [22] Wedding, J. *Find X location using 3 known (X,Y) location using trilateration*. StackExchange MATHEMATICS, ago. 2014. Disponível em: <https://math.stackexchange.com/questions/884807/find-x-location-using-3-known-x-y-location-using-trilateration>. Acesso em: 6 mar. 2018.
- [23] Williams, E. *Great Circle Calculator*. edwilliams.org, jun. 2003. Disponível em: <http://edwilliams.org/gccalc.htm>. Acesso em: 2 dez. 2018.
- [24] Young, G. D. *AltBeacon/android-beacon-library-reference*. Github, nov. 2018. Disponível em: <https://github.com/AltBeacon/android-beacon-library-reference>. Acesso em: 2 dez. 2018.
- [25] Zhu, J. et al. *Improving crowd-sourced Wi-Fi localization systems using Bluetooth Beacons*. IEEE, 9th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON), p. 290-298, 2012.



Raul de Queiroz Mendes discente no curso de graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em automação e controle, bacharelado, no Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) do Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia (CCET) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).



Rafael Vidal Aroca é doutor em Engenharia Elétrica e de Computação pela UFRN e mestre em Engenharia Mecânica, na área de Mecatrônica, pela EESC-USP. Durante sua graduação, cursou Bacharelado em Informática, com ênfase em Administração e Gerenciamento de redes, na Universidade de São Paulo (ICMC-USP). Atualmente é Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).