

Improved Indoor 3D Localization using LoRa Wireless Communication

José A. Micheletti and Eduardo P. Godoy

Abstract—New communication technologies are being developed for the Internet of Things (IoT), such as the wireless long distance and low power networks (LPWAN). The LoRa (Long Range) protocol, a wireless communication technology for long-range applications, is a type of LPWAN that has been recently widely used. The 3D localization and tracking of objects using LPWAN is a hotspot in IoT applications. In spite of many methods for improving the accuracy of 3D localization using traditional wireless communication such as Wi-Fi, ZigBee and Bluetooth, a few of them are available for long-range applications. In this way, this paper presents an improved 3D localization system based on LoRa communication and altimeter for indoor applications. The method uses the traditional trilateration technique with the signal strength indicator (RSSI) together with experimental update of parameters for improving the localization accuracy. Experimental tests were done in two indoor scenarios shown a significant improvement of up to 80%, with a maximum confident interval (95%) of 0,121m, in the 3D localization accuracy, in addition to better results than related papers in the literature.

Index Terms—Internet of Things, LPWAN, Altimeter, Trilateration.

I. INTRODUÇÃO

A internet das Coisas (*IoT*), conectando dispositivos móveis, sensores, computadores e outros objetos, a cada dia apresenta novas aplicações e necessidades. Para satisfazer a essas necessidades da *IoT*, as aplicações envolvendo comunicação sem fio vêm crescendo consideravelmente nos últimos anos. Essa imensa troca de dados utiliza uma gama enorme de dispositivos com diferentes protocolos de comunicação como Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi, GPRS, LoRa, dentre outros.

As aplicações de *IoT* são inúmeras e novas emergem a todo momento, como cidades inteligentes, monitoramento de mercadorias, controle da demanda energética, localização e rastreamento de ativos entre muitas outras. Essa diversidade de aplicações requer novas soluções de redes e protocolos comunicação sem fio para garantir requisitos como área de cobertura, consumo de energia do dispositivo e escalabilidade [1].

Nesse contexto, as redes LPWAN (*Low Power Wide Area Network*) surgiram com o propósito de oferecer conectividade a baixo custo, baixo consumo de energia e atingindo grandes áreas de cobertura [1]. Entre essas tecnologias para LPWAN estão o Sigfox, NB-IoT e a LoRaWAN (Rede de Longa Distância baseada no LoRa), desenvolvida pela LoRa *Alliance* e baseada no protocolo LoRa [1].

J. A. Micheletti, E. P. Godoy are with São Paulo State University (Unesp), Sorocaba, SP 18087-180, Brazil (eduardo.godoy@unesp.br).

O conceito de localização de objetos está atrelado à *IoT* em aplicações importantes, como o monitoramento de ativos (na área da indústria e comércio), entre outros. Esse conceito consiste na determinação da posição tridimensional (coordenadas x , y e z) de um objeto de interesse, em uma região ou área específica, interna (*indoor*) ou externa (*outdoor*), por meio de algum método de comunicação. Os métodos mais conhecidos para localização e rastreamento utilizam sistemas GPS para aplicações externas e comunicação sem fio específica para aplicações internas. Os desafios encontrados nessas aplicações contemplam maior exatidão e precisão nos resultados, soluções de fácil aplicação, baixo custo, baixo consumo de energia dos dispositivos e utilização em áreas de cobertura mais extensas (maior distância) [2].

Na temática da localização *indoor*, existem hoje diversas tecnologias de comunicação sem fio utilizadas, bem como algumas técnicas e métodos de cálculo empregados [3]. Entre as tecnologias usadas, podemos destacar Wi-Fi, ZigBee, Bluetooth, Redes Celulares e o LoRa. Destas, somente as redes celulares e o LoRa oferecem grande área de cobertura, porém, o LoRa ainda tem um custo menor e melhor precisão. As demais, em geral, apresentam custo médio, baixa cobertura, e são mais suscetíveis a interferências.

Com relação às técnicas de localização, as mais conhecidas e empregadas são a Trilateração, a Triangulação e a Análise de cenas (*Fingerprinting*). A Triangulação e a Análise de cena requerem equipamentos específicos e maiores esforços na montagem, sendo a Trilateração a técnica mais simples e mais utilizada [3]. A Análise de cena, apesar de ser uma técnica mais recente e com melhores resultados de localização em geral, necessitam de uma grande quantidade de dados, o que representa um fator desfavorável em aplicações com maior área de cobertura. Quanto aos métodos de cálculo de distância usando comunicação sem fio, os principais são os que utilizam angulação dos sinais (*AoA*), tempo de transmissão de um sinal (*ToA* ou *TDoA*) ou a potência do sinal (RSSI). Enquanto *ToA/TDoA* e *AoA* requerem maior custo e equipamentos específicos, o RSSI não requer hardware adicional (além do próprio módulo de comunicação), proporciona menor custo e é amplamente utilizado [2].

É importante observar que, apesar de existirem na literatura diversos métodos para localização 3D usando comunicação sem fio, especificamente para aplicações em longa distância, ainda se verifica uma carência. Considerando as pesquisas sobre técnicas visando a melhoria da exatidão da localização 3D usando esses métodos tradicionais, elas estão limitadas às redes sem fios tradicionais como Wi-Fi ou Bluetooth, não sendo na maioria das vezes diretamente aplicáveis ao caso das redes de longa distância [4].

Esses fatores citados reforçam a demanda por trabalhos que foquem nesta temática de melhorias em métodos de localização 3D tradicionais e muito utilizados usando comunicação sem fio de longa distância como o LoRa [2, 4]. Com base nisso, essa pesquisa apresenta o desenvolvimento de um sistema simples e de baixo custo, para localização 3D em ambientes internos usando comunicação sem fio de longa distância (LoRa) associada a sensores de altitude. A principal contribuição desta pesquisa é propor, e avaliar, em relação à literatura, um mecanismo para melhoria da acurácia da localização 3D usando comunicação LoRa e as técnicas tradicionais de Trilateração e RSSI.

Este artigo está apresentado da seguinte forma. A seção II apresenta uma revisão bibliográfica da literatura sobre aplicações de localização usando redes sem fio. A descrição da solução de localização 3D usando LoRa, bem como as melhorias de parâmetros experimentais atreladas à comunicação LoRa e a Trilateração usando RSSI são apresentados na seção III. A seção IV discute e compara os resultados obtidos com outros trabalhos. A seção V apresenta uma discussão sobre o artigo. As conclusões e contribuições deste artigo são elencadas na seção VI.

II. LOCALIZAÇÃO EM REDES SEM FIO

A localização de objetos usando comunicação sem fio tem sido um desafio em diversas aplicações em ambientes internos. A propagação de sinais de RF nos ambientes, apesar de atravessarem objetos e obstáculos físicos, sofrem diversos tipos de interferências. Os principais fenômenos envolvidos são reflexão, refração, difração e dispersão, além da atenuação. Apesar dessas interferências, a localização em ambientes internos pode utilizar diferentes tipos de comunicação, por exemplo, com rádios de maior grau de sensibilidade, e de métodos para correção do cálculo da distância e melhoria da acurácia do resultado [2, 4].

Os métodos de localização baseados em comunicação sem fio utilizam diferentes técnicas para calcular uma localização 2D ou 3D estimada de um objeto. No entanto, esse tipo de sistema deve considerar diferentes tecnologias de comunicação, técnicas e métodos de cálculo que impactarão em questões como o custo e complexidade de desenvolvimento, e área de cobertura e acurácia da localização [3].

As técnicas mais utilizadas para determinação da localização 3D são a Triangulação e a Trilateração [5]. A Trilateração necessita conhecer três posições fixas e a distância que cada uma está em relação ao ponto cuja posição é desconhecida. Como resultado, surge uma região com a posição desconhecida. Com a inserção de mais pontos fixos, a Trilateração passa a ser chamada de Multilateração. De outro lado, a Triangulação utiliza os ângulos de chegada dos sinais entre emissor e receptor, em cada uma das posições fixas pré-determinadas [6], para determinação da posição desconhecida.

Os métodos usando comunicação sem fio para a determinação da distância entre dois pontos, normalmente se baseiam na troca de sinal entre os nós [7, 8], como por exemplo *ToA*, *AoA* e *RSSI*. O *ToA* (*Time of Arrival*), se baseia no tempo que o sinal leva para chegar de um nó ao outro. Necessita que

os dois lados tenham um relógio sincronizado. Já o *AoA* (*Angle of Arrival*) utiliza-se do ângulo de chegada do sinal nas antenas receptoras. Para isso, são necessárias antenas especiais e ao menos dois nós receptores.

O *RSSI* (*Receive Signal Strength Indicator*) se baseia na intensidade do sinal trocado entre transmissor e receptor. Mesmo considerando-se as possíveis interferências de vários fatores, o *RSSI* é considerado o método mais simples e que vem sendo mais expressivamente utilizado na localização, usando comunicação sem fio [9]. Bem como, o *RSSI* é também classificado como o melhor método e de menor custo, associado a melhor precisão no cálculo de distância, em relação às outras técnicas utilizadas [4]. Além do fato de que *ToA* e *AoA* são técnicas que necessitam de circunstâncias especiais, o *RSSI* proporciona simplicidade de medição e não necessita de hardware adicional para medida da intensidade do sinal.

Métodos de localização usando comunicação sem fio mais recentes como a abordagem de análise de cena (*Fingerprinting*) utiliza algoritmos de Aprendizado de Máquina, Árvores de Regressão e K-vizinhos mais próximos (*KNN*) [6]. Inclusive em [10], é proposto um único ponto de acesso Wi-Fi de quinta geração (5G). Nesses métodos é necessária uma base de dados sobre a comunicação sem fio em diversos pontos da área de cobertura, os quais são usados para treinar um algoritmo para calcular a localização estimada. No entanto, esses métodos, além de mais complexos de serem implantados, requerem uma base de dados com muitos pontos de medição para proporcionarem melhores resultados de acurácia. Consequentemente, a necessidade dessa base de dados dificulta seu uso em muitos cenários, principalmente nos de localização em 3D e com maior área de cobertura com redes LPWAN, como a LoRa neste trabalho.

Em se tratando de tecnologias de comunicação sem fio, redes Wi-Fi, Bluetooth e ZigBee são amplamente usadas em diferentes soluções de localização de objetos em ambientes internos. Uma aplicação de localização usando uma rede ZigBee com três nós de referência e realizando uma triangulação geométrica a partir de áreas circulares é apresentada em [11]. Os resultados obtidos apontam um erro médio de 22,27% em relação à posição 2D real, o que representa aproximadamente 4 metros.

Uma aplicação de localização 3D usando rede Wi-Fi utiliza um robô móvel para realizar um mapeamento da propagação de sinal na área em estudo e calcular a localização do objeto por meio da potência do sinal Wi-Fi [12]. Apesar da obtenção de resultados com erros na faixa de metros, a necessidade de obtenção dos dados pode tornar esse método de difícil execução e baixa aplicação real. O método desenvolvido em [13], utiliza um cubo imaginário como volume de teste, com quatro nós de referência posicionados em vértices opostos. O cubo é subdividido internamente em planos horizontais e verticais. O método e os cálculos são muito complexos, considerando um erro médio resultante em torno de 1,0 metro.

Algumas aplicações de localização de objetos usando LPWAN têm utilizado o protocolo LoRa como tecnologia de comunicação. A utilização de nós LoRa associados à equação da distância em função da propagação do sinal, possibilita

opções de melhorias no cálculo de posição, em função da sua tecnologia [14]. Testes de propagação em ambientes internos de módulos LoRa, entre doze andares de um edifício, demonstram robustez da comunicação, apesar dos obstáculos e interferência [15]. Inclusive trabalhos recentes, utilizando comunicação LoRa e métodos de localização baseados no *RSSI*, têm obtido bom desempenho em comparação com outras tecnologias [16].

Trabalhos propondo melhorias em métodos tradicionais e consolidados de localização usando comunicação sem fio têm sido desenvolvidos recentemente [17, 18]. As equações para cálculo da distância por meio do *RSSI* permitem a incorporação de parâmetros de ajuste ou correções de valores com base em testes operacionais de comunicação [19]. Outras possibilidades são as novas tecnologias de rádios transmissores que possibilitam leituras de sinais mais precisos, associados a técnicas que utilizam grande número de leituras e cálculos de desvio padrão médio e erro quadrático médio [3, 20].

Com base nesse levantamento realizado, verifica-se a importância no desenvolvimento de novos métodos e melhoria de métodos existentes para localização de objetos nas aplicações da *IoT*, principalmente no contexto de redes LPWAN. Este trabalho contribui nesse caminho, através da implementação de um sistema de localização 3D, usando comunicação LoRa e altímetro, baseado numa melhoria da técnica de trilateração e do método *RSSI* para o cálculo das distâncias e da posição do objeto com melhor acurácia.

III. SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO 3D BASEADA EM LORA

A. Descrição do Sistema

A proposta deste trabalho está fundamentada no desenvolvimento de um sistema para Localização 3D de objetos, conforme representado na Fig. 1, utilizando comunicação em uma rede sem fio LoRa na faixa de 915MHz, composta por três dispositivos fixos (Localizadores), um dispositivo móvel (Localizável) e um dispositivo Concentrador.

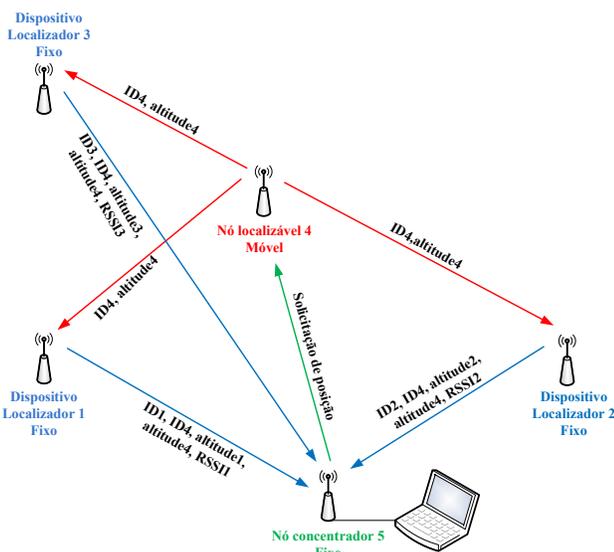


Fig. 1. Plataforma de Localização 3D.

Entre os Localizadores 1 e 2, é formado um eixo X imaginário e entre os Localizadores 1 e 3, um eixo Y imaginário. O Concentrador inicia o processo, enviando uma solicitação de posição ao Localizável. Ao receber a mensagem do Concentrador, o Localizável monta um pacote de dados contendo sua identificação (ID4) mais a sua altitude (altitude4) e os envia ao mesmo tempo a todos os Localizadores. A partir da mensagem recebida do Localizável, cada Localizador monta um novo pacote, contendo as informações do Localizável (ID4 e altitude4) mais a identificação e altitude do Localizador (por exemplo ID1 e altitude1) mais o valor da potência do sinal trocado entre Localizável e Localizador (por exemplo RSSI1), e os envia ao Concentrador. A partir das informações recebidas, o Concentrador executa o cálculo da posição (x, y, z) do Localizável.

Os dispositivos são formados por microcontroladores ESP32 LoRa e sensores de altitude BME280, na seguinte distribuição: Localizadores e Localizável com 1 ESP LoRa e 1 BME280 e Concentrador com 1 ESP LoRa e um computador. O controlador ESP LoRa é um microcontrolador de 32 bits com alto poder de processamento e com comunicação LoRa incorporada. O BME280 é um sensor de temperatura, umidade, pressão e altitude da Bosch de alta precisão. No computador, os dados são recebidos e tratados pelo software de cálculo, que implementa as equações de cálculo e atualização de parâmetro para melhoria do resultado.

Utilizando os valores de *RSSI* enviados por cada Localizador, são calculadas as distâncias entre Localizador e Localizável, a partir de (1), Equação de distância [21]:

$$RSSI = A - 10 \cdot n \cdot \log(d) \quad (1)$$

Onde:

RSSI = potência do sinal (dB) entre o Localizável e os Localizadores;

A = potência do sinal (dB) de referência de cada Localizador em relação ao Localizável, à distância de 1m;

n = expoente de propagação, específico para locais abertos ou fechados e com mais ou menos interferência do sinal;

d = distância (m) entre o Localizável e os Localizadores.

Cada distância é projetada no plano de altitude do Localizável, gerando a Fig. 2.

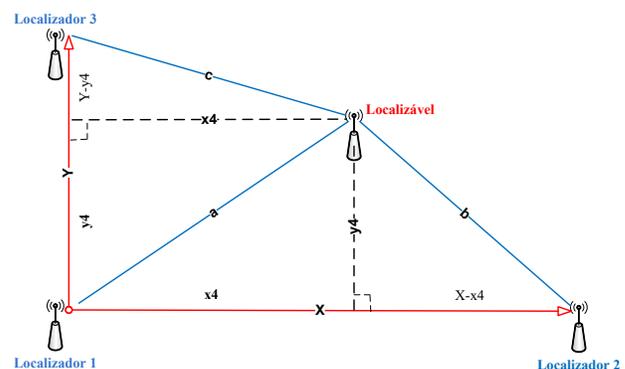


Fig. 2. Plano XY do Localizável.

A partir das retas dispostas na figura, formando triângulos escalenos e retângulos, é realizada a trilateração com base em

equações trigonométricas, calculando-se os valores de x e y do Localizável. O valor de z é obtido a partir da altitude do Localizável em relação ao solo, fornecida pelo sensor de altitude. Nesta pesquisa optou-se pela utilização do altímetro para medição das coordenadas no eixo Z buscando simplificar a solução (equações) desenvolvida e melhorar a exatidão das medições.

B. Procedimento de Melhoria da Localização

A solução de localização 3D baseia-se num plano X, Y horizontal, posicionado em uma altura Z vertical. Os dispositivos são posicionados na área onde será realizado o teste, conforme modelo apresentado na Fig. 3.

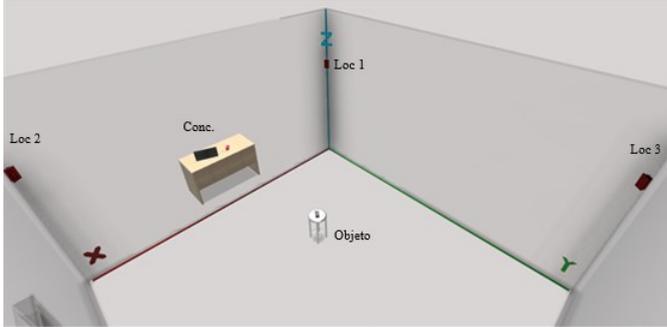


Fig. 3. Modelo da área de testes de localização.

No método tradicional de localização 3D usando Trilateração e $RSSI$, são medidos os valores dos parâmetros A (Equação 1), para cada Localizador. Para isso, o Localizável é posicionado em frente ao Localizador, a uma distância de 1m e o $RSSI$ medido. Dessa forma são obtidos A_1, A_2 e A_3 . O expoente de propagação n , pode assumir valores de 2, 3 ou 4, conforme o nível de interferências físicas no local (quanto maior o valor, maior a interferência) [7, 14, 21]. No entanto, o simples uso dessa equação não considera aspectos essenciais da comunicação sem fio, resultando em erros que impactam a acurácia da localização obtida. Buscando melhorar o resultado, informações sobre o protocolo de comunicação utilizado e seus parâmetros de configuração, bem como estes operacionais de comunicação no ambiente de operação, se tornam necessários.

Nesta pesquisa foram desenvolvidas e incorporadas no sistema de localização 3D usando LoRa, três melhorias que proporcionaram ganho significativo de acurácia na localização 3D aos resultados dos cálculos de posição.

Melhoria por Calibração de Parâmetros do LoRa: O rádio LoRa, possui parâmetros configuráveis, como a Potência de transmissão ($txPower$) e o Fator de propagação do espectro (SF). O $txPower$ está relacionado a transmissão em longas distâncias e foi parametrizado com o valor máximo ($txPower=20dB$). Já o SF é responsável por tornar o link de transmissão mais robusto e diminuir a influência de interferências, tendo sido parametrizado com o valor mais apropriado, levantado em testes de laboratório, para este projeto ($SF=10$). A largura de banda (BW) do sinal também pode ser parametrizada, podendo assumir valores de 125, 250 ou 500 KHz. Porém, nos testes realizados, o BW não apresentou significativa influência nos resultados, e por isso, foi

parametrizado com 125KHz. A influência desses parâmetros na acurácia foi avaliada e o melhor valor de configuração foi definido. O uso desses parâmetros proporcionou melhores resultados para o cálculo de localização 3D.

Melhoria na Precisão: A precisão no resultado de localização 3D está relacionada ao grau de variabilidade ou dispersão das medidas de distância e posição calculadas. Como a comunicação sem fio está sujeita a interferências de propagação do sinal, existe uma variabilidade inerente às medições do $RSSI$. De forma a suavizar o impacto de valores espúrios ou dispersos de $RSSI$, os quais originam erros de localização, neste trabalho foi desenvolvido um filtro *trimmer* estatístico para redução da variabilidade e melhoria da precisão da localização 3D, através da remoção de 10% dos piores valores de medição para o cálculo da localização 3D.

Melhoria na Exatidão: A exatidão no resultado de localização 3D está relacionada ao grau de aderência, em relação à posição real, das medidas de distância e posição calculadas. Testes operacionais demonstraram que a exatidão da localização, era significativamente impactada pelo parâmetro A inadequado, em relação à comunicação LoRa usado na Equação 1. Testes mostram que os valores de A originais definidos na literatura não fornecem boa aderência para o caso da comunicação LoRa, principalmente pela característica de propagação x potência do sinal dessa tecnologia, se diferenciar das redes tradicionalmente usadas na literatura (Wi-Fi etc.).

Dessa forma, verificou-se a necessidade de realização de testes com a comunicação LoRa para estimação dos valores adequados de A (no caso A_1, A_2 e A_3). Testes foram realizados, nos quais os valores de $RSSI$ medidos foram comparados com os valores reais, a partir do cálculo utilizando a Equação 1 da distância. Observou-se que as curvas resultantes (curva dos valores medidos e curva dos valores reais), não eram coincidentes (Fig. 4), portanto, os cálculos de posição resultavam em baixa exatidão.

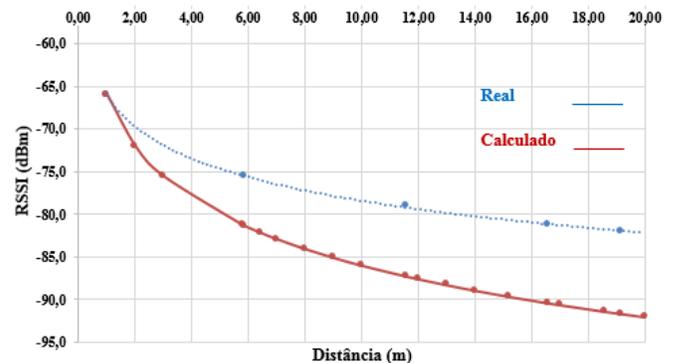


Fig. 4. Curvas dos valores Reais e Calculados dos pontos medidos.

Nesse caso, a melhoria proposta foi baseada na adequação experimental do parâmetro A , tornando as curvas coincidentes. Após esses testes os valores medidos de A foram substituídos pelos valores melhorados, nos dois ambientes de testes, conforme relacionado a seguir:

A medido

Laboratório: A1= -66dBm, A2= -61dBm, A3= -50dBm;

Quadra: A1= -61dBm, A2= -64dBm, A3= -50dBm.

A melhorado

Laboratório: A1= -57dBm, A2= -55,5dBm, A3= -46dBm;

Quadra: A1= -60dBm, A2= -63dBm, A3= -46dBm.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na fase de desenvolvimento do estudo, foram realizadas uma grande quantidade de testes em diferentes tipos de cenários e pontos de interesse de localização, até se alcançar os refinamentos de parâmetros e as conclusões necessárias para o aprimoramento do processo. Na fase final, buscando avaliar e comprovar o uso do sistema de localização 3D baseada no LoRa para aplicação *indoor*, foram realizados experimentos em dois cenários: área com interferências (laboratório de pesquisa com equipamento, mobiliário e pessoas) e área mais ampla sem interferência (quadra poliesportiva). Testes em três pontos distintos em cada uma das áreas acima foram realizados, com a comparação dos resultados antes e depois dessas melhorias, para verificação. Em cada ponto, foram coletadas e calculadas cem amostras de dados. O valor do parâmetro n da Equação 1 usado neste trabalho foi $n = 2$.

Como parâmetros de análise e comparação, definiu-se o uso do desvio padrão (DP) e dos erros médios (E) dos resultados por coordenada, bem como o erro quadrático médio (EQ) do ponto 3D calculado. O erro quadrático demonstra a acurácia da localização, onde, quanto mais baixo seu valor (mais próximo de 0), mais próximo está o resultado do valor real. Foi também calculado, o valor do intervalo de confiança (CI) do erro quadrático, para 95%. Os resultados são apresentados em metros e porcentagem.

A. Experimentos no Laboratório

As dimensões do laboratório constam de 7m x 22m, compreendendo uma área de 154 m². A seguir na Tabela II, são apresentados os resultados de cada ponto testado, originalmente (x_a , y_a e z_a) e depois das melhorias (x_d , y_d e z_d):

TABELA II
RESULTADOS DOS TESTES NO LABORATÓRIO

Coordenadas	DP	E (m)	E (%)	EQ (m)	CI	
Ponto 1	x_a	49,81	6,28	125		
	y_a	50,30	7,04	176	14,67	--
	z_a	100,47	10,11	486		
	x_d	0,07	0,46	9,2		1,484
	y_d	0,05	1,41	35	1,49	1,495
	z_d	0,00	0,04	1,9		
Ponto 2	x_a	49,92	5,30	96		
	y_a	49,79	10,36	74	17,64	--
	z_a	99,98	10,05	2392		
	x_d	0,22	0,21	3,8		2,700
	y_d	0,04	2,70	19	2,71	2,719
	z_d	0,00	0,03	7		
Ponto 3	x_a	57,06	10,55	722		
	y_a	54,44	15,77	85,2	26,02	--
	z_a	113,83	12,85	911		
	x_d	0,09	0,11	7,5		0,690
	y_d	0,01	0,69	3,7	0,70	0,709
	z_d	0,00	0,02	1,4		

Considerando este tipo de cenário com muitos equipamentos e mobiliário, portanto, propício à maior influência das múltiplas reflexões dos sinais, as melhorias aplicadas trouxeram um significativo ganho aos resultados de localização 3D, como visto por meio da comparação dos erros quadráticos. O erro por coordenada ficou em média abaixo de 10%, inferior ao de outros trabalhos onde o erro fica em torno de 20% [2, 22].

B. Experimentos na Quadra

As dimensões da quadra são de 13m x 26m, compreendendo uma área de 338 m². A seguir, na Tabela III, são apresentados os resultados de cada ponto testado, originalmente (x_a , y_a e z_a) e depois das melhorias (x_d , y_d e z_d):

TABELA III
RESULTADOS DOS TESTES NA QUADRA

Coordenadas	DP	E (m)	E (%)	EQ (m)	CI	
Ponto 1	x_a	0,42	1,37	21		
	y_a	0,37	1,75	26,9	2,29	--
	z_a	0,00	0,03	2,1		
	x_d	0,10	0,56	8,6		0,662
	y_d	0,28	0,34	5,2	0,68	0,697
	z_d	0,00	0,03	2,1		
Ponto 2	x_a	0,22	5,43	54		
	y_a	0,25	1,58	12	5,66	--
	z_a	0,00	0,03	2,1		
	x_d	0,21	1,21	12,1		1,436
	y_d	0,10	0,82	6,3	1,47	1,503
	z_d	0,00	0,03	2,1		
Ponto 3	x_a	0,72	3,83	76,6		
	y_a	0,40	1,27	6,3	4,08	--
	z_a	0,00	0,03	2,1		
	x_d	0,81	0,72	14,4		2,449
	y_d	0,34	2,37	11,8	2,51	2,570
	z_d	0,00	0,03	2,1		

Neste tipo de cenário, com pouca interferência das múltiplas reflexões dos sinais, os resultados foram ainda melhores, como pode-se observar por meio dos erros quadráticos. Nesse caso, o erro por coordenada também ficou em média abaixo de 10%, valores os quais se mostram menores que em outros trabalhos onde o erro foi em torno de 20% [11, 13].

Como pode ser observado a partir dos intervalos de confiança, em todos os pontos medidos em cada um dos ambientes de teste, temos no mínimo 95% de certeza que o valor real calculado está dentro do intervalo de confiança. O que contribui fortemente para a credibilidade do processo estabelecido.

V. DISCUSSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em se tratando das melhorias aplicadas à solução de localização 3D, discutiu-se o impacto de cada uma delas nos resultados. Inicialmente, faz-se necessário observar que, os parâmetros de configuração da comunicação LoRa possuem grande relevância na propagação dos sinais trocados entre os módulos, tornando-os mais robusto e com menor flutuação de valores de medição de *RSSI*. Dessa forma, verifica-se que a melhoria por calibração de parâmetros do LoRa proposta, tem significativa parcela na melhoria dos resultados.

A melhoria na precisão dos resultados, a qual está

relacionada com a filtragem de dados de medição dispersos, tem menor impacto na melhoria dos resultados. Isso é justificado pelo fato que a própria melhoria por calibração de parâmetros do LoRa já proporciona uma menor variabilidade dos dados de medição de *RSSI*. Dessa forma, a melhoria da precisão torna-se mais importante para a mitigação de erros de leitura.

A melhoria na exatidão, a qual está relacionada à adequação do parâmetro *A* da equação de cálculo de distância através da Trilateração, se mostrou essencial para melhoria da localização 3D nos dois cenários investigados. Contudo, essa melhoria proporciona melhor resultado quanto maior for a interferência do local. Nesses locais, as reflexões dos sinais são maiores, aumentando a relevância desse método de melhoria.

Em uma comparação baseada nos erros quadráticos, originalmente (conforme a literatura) e após a aplicação das melhorias propostas neste trabalho, observa-se um ganho de acurácia na localização 3D de até 85% no cenário do laboratório e de até 79% no cenário da quadra. É importante citar que esses resultados de melhoria são compatíveis (semelhantes) e até superiores aos encontrados em outros trabalhos relacionados à melhoria de métodos de localização, em torno de 50% [17, 20].

Com relação aos erros obtidos por área e por coordenada, entre todos os pontos, de forma resumida obtiveram-se:

Laboratório: coordenada *X* apresentou uma variação de 3,8% a 9,2%, em *Y* a variação foi de 3,7% a 35% e em *Z* a variação foi de 1,4%.

Quadra: coordenada *X* teve uma variação de 8,6% a 14,4%, em *Y* a variação foi de 5,2% a 11,8% e em *Z* o valor foi fixo de 2,1%.

Os valores da coordenada *Z* apresentam os menores valores, pelo fato da própria utilização do sensor de altitude. Verifica-se que a maioria dos valores está abaixo de 10%, o que representa um resultado de grande relevância quando comparado a muitos outros trabalhos aqui referenciados, inclusive utilizando LoRa ou outras tecnologias, onde o erro médio está em torno de 20% [2, 11, 13, 22].

VI. CONCLUSÃO

Este trabalho desenvolveu uma solução simples e de baixo custo para a localização 3D de objetos usando comunicação sem fio de longa distância LoRa, aplicável a ambientes internos (*indoor*). As melhorias adicionadas à técnica de Trilateração usando *RSSI* da comunicação sem fio LoRa, proporcionaram aumento significativo de até 80%, com uma confiança acima de 95% (intervalo de confiança), na acurácia da localização 3D.

O primeiro ponto importante a se destacar é o fato de que a correta parametrização da comunicação LoRa (melhoria por calibração de parâmetros do LoRa) no ambiente de operação da solução é determinante para obtenção de resultados melhores e com maior acurácia. A melhoria de precisão está direcionada com a mitigação de prováveis erros de leitura da solução. Finalmente, a melhoria na exatidão, relacionada à adequação do parâmetro *A* da equação de cálculo de distância, através da Trilateração, se mostrou essencial para melhoria da localização, proporcionando melhor resultado em cenários com maior interferência na propagação da comunicação sem fio.

As melhorias desenvolvidas e aplicadas à solução de localização 3D usando LoRa e sensores de altitude, possibilitaram a obtenção de erros médios de coordenadas abaixo de 10% e uma acurácia 3D média de raio próxima a um metro do ponto calculado para o real, os quais representam um bom resultado para soluções de localização baseadas em LPWAN como a LoRa e um resultado até superior a trabalhos da literatura relacionados nessa mesma temática.

Com base nestas conclusões, é possível afirmar que a solução de localização 3D desenvolvida, é viável para aplicação em diversas aplicações focadas no monitoramento de ativos. Trabalhos futuros objetivam a realização de testes em cenários de maior área, como por exemplo, armazéns de logística e ambientes industriais de produção, que não puderam ser analisadas neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] R.S. Iborra, J.S. Gomez, J.B. Viñas, M.D. Cano, A.F. Skarmeta. Performance Evaluation of LoRa Considering Scenario Conditions. *Sensors* (Basel) 2018 Mar; 18(3): 772. Published online.
- [2] F. Bonafini, C.D. Fernandes, A. Depari, P. Ferrari, A. Flammini, M. Pasetti, S. Rinaldi, E. Sisinn. Evaluating indoor and outdoor localization services for LoRaWan in Smart City applications. 2019 *IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 and Internet of Things*.
- [3] H. Obeidat, W. Shuaieb, O. Obeidat, R.A. Alhameed. A Review of Indoor Localization Techniques and Wireless Technologies. *Wireless Personal Communications* 119:289-327, Springer 2021.
- [4] C. Zhao, B. Wang. A MLE-PSO Indoor Localization Algorithm Based On *RSSI*. Proceedings of the 36th Chinese Control Conference July 26-28, 2017, Dalian, China.
- [5] B.C. Fargas, M.N. Peterse. GPS-free Geolocation using LoRa in Low-Power WANs. 2017 *IEEE Global Internet of Things Summit* (Glo TS).
- [6] M. Anjum, M.A. Khan, S.A. Hassan, A. Mahmood, H.K. Qureshi, M. Gidlund. *RSSI* Fingerprinting-based Localization Using Machine Learning in LoRa Networks. *IEEE Internet of Things Magazine*, vol.3, e.4, 2020.
- [7] M. Passafiume, S. Maddio, M. Lucarelli, A. Cidronali. An Enhanced Triangulation Algorithm for a Distributed *RSSI*-DoA Positioning System. 13th European Radar Conference, 2016.
- [8] J. Luo, Z. Wang. A Novel Closed-Form Estimator for 3D Source Localization Using Angle of Arrivals and Gain Ratio of Arrivals. 36th Chinese Control Conference, Dalian, China, July 26-28, 2017.
- [9] A. Espinoza, E. Reyes, M. Tapia, E. Ruiz, J. Ruiz, J. Cortez. Performance comparison between simulated and real case scenario of *RSSI*-Based localization algorithms on a *WSAN*. *IEEE Latin America Transactions*, Jan. 2016.
- [10] A.R.L. Paiva, W.C. Freitas, I.M. Guerreiro, H.J.B. Nascimento. Indoor Localization Algorithm based on Fingerprint Using a Single Fifth Generation Wi-Fi Access Point. *IEEE Latin America Transactions*, July 2018.
- [11] P. Kristalina, A. Pratiarso, T. Badriyah, E.D. Putro. A Wireless Sensor Networks Localization Using Geometric Triangulation Scheme for Object tracking in Urban Search and Rescue Application. 2nd International Conference on Science in Information Technology (ICSITech), 2016.
- [12] M. Jirku, V. Kubelka, M. Reinstein. Wi-Fi localization in 3D. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, October 9-14, 2016, Daejeon, Korea.
- [13] R.V. Hernández, D.M. Rodrigues, C.V. Rosales, L.R. Dominguez. 3-D Position Location in Ad Hoc Networks: A Manhattanized Space. *IEEE Communications Letters* (vol. 21, Issue: 1, Jan. 2017).
- [14] K. Lam, C. Chenung, C.; Lee, W. LoRa-based Localization System for Noisy Outdoor Environment. *IEEE 13th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, 2017.
- [15] L.H. Trinh, V.X. Bui, F. Ferrero, T.Q.K. Nguyen, M.H. Le. Signal Propagating of LoRa Technology Using for Smart Building Applications. *IEEE CAMA*, Tsukuba, Japan, 2017.

- [16] A. Lazaro, M. Lazaro, R. Villarino. Room-Level Localization System Based on LoRa Backscatters. *IEEE Access*, January 20, 2021.
- [17] M.E. Rusli, M. Ali, N. Jamil, M.M. Din. An Improved Indoor Positioning Algorithm Based on RSSI-Trilateration technique for Internet of Things (IOT). *IEEE International Conference on Computer & Communication Engineering*, 2016.
- [18] G. Li, E. Geng, Z. Ye, Y. Xu, J. Lin, Y. Pang. Indoor Positioning Algorithm Based on the Improved RSSI Distance Model. *Sensors Journal MPDI*, 2018.
- [19] S. Spinsante, L. Gioacchini, L. Scalise. A novel experimental-based tool for the design of LoRa networks. *IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 and Internet of Things*, 2019.
- [20] X. Dang, Y. Hei, Z. Hao. An Improved Indoor Localization Based on RSSI and Feedback Correction of Anchor Node for WSN. *IEEE International Conference on Computer, Information and Telecommunication Systems*, 2016.
- [21] A. Fahhem, R. Virrankoski, M. Elmusrati. Improving RSSI based distance estimation for 802.15.4 wireless sensor networks. *IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems*, 2010.
- [22] A. Falhi, Z. Guennoun. Localization Estimation in Wireless Sensor Networks Based on IEEE 802.15.4 standard. *IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems*, 2011.
- [23] C.D. Fernandes, A. Depari, E. Sisinni, P. Ferrari, A. Flammini, S. Rinaldi, M. Pasetti. Hybrid indoor and outdoor localization for elderly care applications with LoRaWAN. *IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA)*, 2020.
- [24] S. Anthrayose, A.DR. Payal. Comparative Analysis of Approximate point in Triangulation (APIT) and DV-HOP algorithms for solving localization problem in Wireless Sensor Networks. *IEEE 7th International Advance Computing Conference*, 2017.



José Antonio Micheletti received the B.Eng. degree in Electrical Engineering from the Engineering College of Sorocaba (SP) - FACENS (1987) and the M.Sc. in Electrical Engineering at São Paulo State University (Unesp) in 2021. Currently he is a professor at Paula Souza Center of São Paulo (CPS) in Sorocaba (SP-Brazil). His research interests include automation,

Internet of Things and Industry 4.0. <http://lattes.cnpq.br/6847142094517509>.



Eduardo Paciencia Godoy received the B.Eng. degree in Control and Automation Engineering at Itajubá Federal University (MG-Brazil) in 2003 and the M.Sc. and Ph.D. degrees in Mechanical Engineering at University of São Paulo (SP-Brazil) in 2007 and 2011. Currently he is an Associate Professor of the São Paulo State University (Unesp) (SP-Brazil). His

research interests include automation and networked systems, wireless networks and telemetry, Internet of Things and Industry 4.0. <http://lattes.cnpq.br/0072632067545698>.