

Algoritmo para Filtragem Adaptativa de Medições de Distância via Wi-Fi FTM

Marcos Stenner¹, Edelberto Franco Silva¹, Alex B. Vieira¹,
Rodrigo Mendes Peixoto¹, Michael Zancanella¹, Emmanuel Okwu¹

¹Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF – Juiz de Fora – MG – Brazil

marcos.stenner@estudante.ufjf.br, edelberto.franco@ufjf.br,

alex.borges@gmail.com, rodrigo.peixoto@gmail.com,

michael.zancanella@ufjf.br, emmanuel.okwu@estudante.ufjf.br

Resumo. A medição de distâncias usando o protocolo Fine Time Measurement (FTM), que é parte das especificações do Wi-Fi, apresenta limitações significativas devido ao multicaminhamento. Este trabalho propõe um filtro adaptativo assimétrico para melhoria das medições FTM, levando em conta características intrínsecas deste protocolo. O algoritmo desenvolvido implementa um filtro com parâmetros ajustados considerando a velocidade do alvo e a tendência do FTM em superestimar distâncias. Os experimentos demonstraram que o método reduz o erro médio das medições em até 50% quando comparado ao FTM puro. Sua baixa complexidade computacional o torna especialmente adequado para implementação em sistemas embarcados. Os resultados indicam que a solução é efetiva para aplicações de medição de distância em tempo real utilizando o Wi-Fi, inclusive em hardware de baixo custo.

Palavras-chave: ESP32, Filtro Adaptativo, FTM, IoT, Posicionamento Interno, Wi-Fi.

Abstract. Distance measurement using the Fine Time Measurement (FTM) protocol, which is part of Wi-Fi specifications, presents significant limitations due to multipath. This work proposes an asymmetric adaptive filter to improve FTM measurements, taking into account intrinsic characteristics of this protocol. The developed algorithm implements a filter with parameters adjusted considering the target velocity and FTM's tendency to overestimate distances. Experiments demonstrated that the method reduces the average measurement error by up to 50% when compared to pure FTM. Its low computational complexity makes it especially suitable for implementation in embedded systems. The results indicate that the solution is effective for real-time distance measurement applications using Wi-Fi, including in low-cost hardware.

Keywords: Adaptive Filter, ESP32, FTM, Indoor Positioning, IoT, Wi-Fi.

1. Introdução

A localização precisa de dispositivos é um dos pilares para a expansão de serviços automatizados em aplicações como cidades inteligentes, monitoramento de ambientes industriais e navegação interna em edifícios. As soluções mais adotadas dependem da medição de distância entre o dispositivo rastreado e estações fixas. Apesar da disponibilidade de

soluções baseadas no Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) para ambientes externos, sua precisão é consideravelmente reduzida ou inexistente em ambientes internos devido à ausência de linha de visada direta com os satélites. Assim, surgem soluções de localização baseadas em tecnologias de comunicação sem fio, como Wi-Fi, *Bluetooth* e *Ultra WideBand* (UWB). Dentre essas, o Wi-Fi destaca-se como uma alternativa viável devido à sua ubiquidade e baixo custo.

O protocolo *Fine Timing Measurement* (FTM), padronizado na IEEE 802.11mc em 2016 [802.11 2016], introduz um mecanismo baseado na medição do tempo de voo (ToF) dos sinais entre um transmissor e um receptor para a estimativa de distâncias entre dispositivos Wi-Fi. Ele se destaca pela promessa de alcançar precisão a nível de metros em condições de linha de visada (LOS), permitindo novos horizontes para aplicações de localização.

O suporte a esse protocolo está presente em celulares, possibilitando seu amplo uso, e também foi incorporado em dispositivos como o ESP32 (microcontrolador produzido pela Espressif), permitindo o uso do FTM em cenários IoT com orçamentos restritos. Contudo, seu desempenho ainda enfrenta desafios significativos em cenários complexos. O multicaminhamento, Figura 1, é um dos principais fatores limitantes na precisão do FTM. Em ambientes internos, sinais refletidos frequentemente possuem potência superior à do sinal direto, conforme observado por [Jiokeng et al. 2020], o que induz erros substanciais na estimativa de distância. Diversas abordagens foram testadas para mitigar esses erros [Farahsari et al. 2022] [Hashem et al. 2021], incluindo métodos baseados no uso do indicador de força de sinal recebido (RSSI) [Barral Vales et al. 2022], informação do estado do canal (CSI) [Tadayon et al. 2019] [Voggu et al. 2021] e redes neurais.

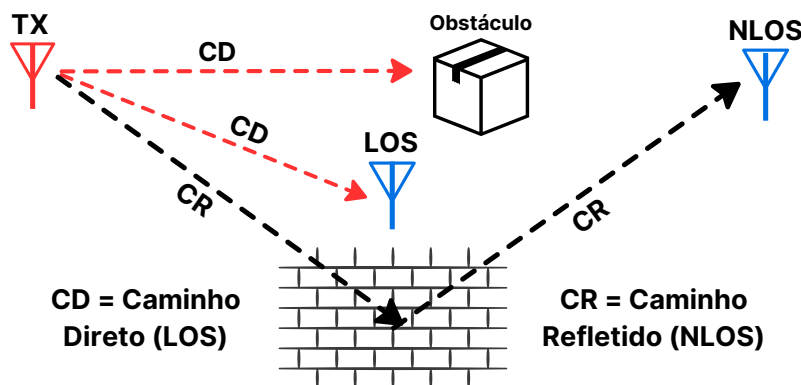


Figura 1. Sinal direto LOS e refletido NLOS.

Dentre as abordagens existentes, o RSSI é altamente suscetível a variações causadas pelas condições ambientais, enquanto o uso de CSI exige uma elevada capacidade computacional e configurações específicas de hardware, o que torna sua ampla adoção impraticável em muitos cenários. Assim, é possível perceber que há uma lacuna na literatura para soluções que combinem precisão, simplicidade e viabilidade operacional.

Este trabalho propõe um algoritmo otimizado para estimativa de distâncias baseado exclusivamente no FTM. O método explora propriedades intrínsecas do protocolo

FTM para mitigar os efeitos do multicaminhamento, dispensando o uso de informações adicionais como RSSI ou CSI. Além disso, busca-se avaliar o desempenho dessa solução em diferentes cenários e comparar com abordagens existentes.

As principais contribuições deste trabalho incluem: o desenvolvimento de um algoritmo leve e adaptativo para a estimativa de distâncias baseado em FTM, alinhado às restrições de hardware de dispositivos IoT, como o ESP32; a análise de desempenho do algoritmo proposto em ambientes controlados e reais, considerando precisão, robustez e viabilidade operacional; e um comparativo com soluções existentes, destacando suas vantagens e limitações.

Este artigo está estruturado da seguinte forma: Seção 2 apresenta a fundamentação teórica e a revisão bibliográfica sobre FTM e os desafios associados; Seção 3 traz a análise dos trabalhos relacionados; Seção 4 detalha a abordagem proposta e os algoritmos desenvolvidos; Seção 5 descreve a metodologia experimental e os cenários de validação; Seção 6 analisa os resultados obtidos e discute as implicações do estudo; e, por fim, Seção 7 apresenta as conclusões e as propostas para trabalhos futuros.

2. Fundamentação Teórica

O *Fine Timing Measurement* (FTM) é um protocolo padronizado pelo IEEE 802.11-2016, [802.11 2016] que permite estimar a distância entre dois dispositivos Wi-Fi através da medição do tempo de voo ou *Time of Flight* (ToF) do sinal. O protocolo opera sem necessidade de associação prévia entre os dispositivos, permitindo que uma estação móvel *initiator* (iniciador) calcule sua distância em relação a pontos de acesso *responders* (respondedor) que suportem o protocolo.

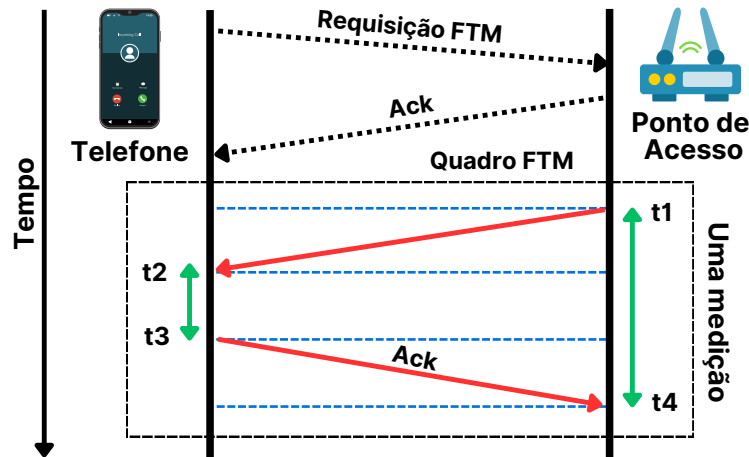


Figura 2. Quadro FTM

Na Figura 2, podemos observar o processo de medição FTM, que pode ser descrito matematicamente como:

$$d = c \cdot ToF \quad (1)$$

onde:

- d é a distância estimada
- c é a velocidade da luz no vácuo ($\approx 3 \times 10^8$ m/s)
- ToF é o tempo de voo do sinal

O ToF é calculado a partir do *Round Trip Time* (RTT):

$$ToF = \frac{RTT}{2} = \frac{(t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)}{2} \quad (2)$$

onde:

- t_1 é o timestamp de envio do pacote FTM pelo responder
- t_2 é o timestamp de recebimento do pacote FTM pelo initiator
- t_3 é o timestamp de envio do ACK pelo initiator
- t_4 é o timestamp de recebimento do ACK pelo responder

O multicaminhamento é um dos principais desafios para medições precisas com FTM em ambientes internos. Este fenômeno ocorre quando o sinal Wi-Fi chega ao receptor por múltiplos caminhos devido a reflexões em paredes, objetos e pessoas.

Em um cenário ideal com linha de visada direta *Line of Sight* (LOS), apenas o sinal direto seria considerado:

$$RTT_{LOS} = \frac{2d}{c} \quad (3)$$

Entretanto, em cenários reais com multicaminhamento *Non-Line of Sight* (NLOS), o RTT medido pode ser distorcido pelos sinais refletidos:

$$RTT_{NLOS} = \frac{2d_{ref}}{c} > RTT_{LOS} \quad (4)$$

onde d_{ref} é a distância do caminho refletido.

As medidas retornadas da estimativa de distância podem apresentar dois tipos principais de erros. São eles: **primeiro**, os erros de *hardware*, que podem ocorrer devido à resolução limitada dos *timestamps* ou ao *drift* dos relógios. Esses erros podem resultar em valores maiores ou menores do que o real, mas não são o escopo do estudo atual, pois sua correção cabe ao fabricante do *hardware*, e não é possível detectá-los nas leituras obtidas. E em **segundo** lugar, os erros de propagação, como o multicaminhamento, a atenuação do sinal ou a interferência. Esses serão os erros tratados neste trabalho. Como todos eles resultam em um aumento de tempo para o sinal sair do *initiator*, chegar ao *responder* e retornar, a distância calculada poderá ser maior que a distância real, mas nunca menor, já que nenhum fenômeno pode fazer com que o sinal viaje mais rápido. Devemos manter esse fato em mente, pois será a base do algoritmo apresentado.

O uso do FTM isolado apresenta vantagens significativas em relação a outras abordagens de estimativa de distância, principalmente por não necessitar estar associado ao ponto de acesso e por apresentar baixíssima complexidade computacional, conforme vemos na Tabela 1.

Tabela 1. Comparativo entre as diferentes abordagens de correção FTM

Característica	RSSI	CSI	FTM puro
Complexidade Computacional*	Baixa	Alta	Baixa
Necessidade de Associação	Não	Sim	Não
Precisão	Baixa	Alta	Média
Escalabilidade	Alta	Baixa	Alta

* Uma análise da complexidade computacional é apresentada na Seção 5.

3. Trabalhos Relacionados

Nesta seção, são analisadas as principais abordagens relacionadas ao uso do protocolo FTM para medição de distância. São abordadas soluções que utilizam exclusivamente o FTM, abordagens híbridas com RSSI e CSI e, por fim, realiza-se uma comparação entre essas metodologias, destacando suas limitações e contribuições relevantes.

Barral Vales et al. [Barral Vales et al. 2022] realizou uma investigação sobre o uso do FTM implementado no ESP32 para aplicações de localização na Internet das Coisas (IoT). Este trabalho explorou cenários internos e externos, demonstrando que a precisão do FTM em ambientes externos alcança erros médios de até 2,5 metros. Contudo, em cenários internos, a presença de interferências e multicaminhamento resulta em erros que frequentemente ultrapassam 8 metros. Apesar dessas limitações, o trabalho destaca a viabilidade de sistemas baseados unicamente no FTM para aplicações de baixo custo e consumo de energia.

O uso combinado do FTM com o RSSI tem sido investigado para melhorar a precisão em cenários nos quais o multicaminhamento afeta significativamente os resultados. No entanto, devido à alta variabilidade do RSSI em ambientes internos, esta métrica frequentemente introduz inconsistências, conforme observado por outros estudos [Au 2016] [Barral Vales et al. 2022]. Apesar disso, abordagens híbridas apresentam potencial quando calibradas para cenários específicos, embora careçam de generalização para ambientes diversos.

O trabalho de Jiokeng et al. [Jiokeng et al. 2020] introduziu a solução FUSIC, que utiliza o CSI em conjunto com o FTM para corrigir erros introduzidos pelo multicaminhamento. Por meio da aplicação do algoritmo *Multiple Signal Classification* (MUSIC), a solução é capaz de identificar e corrigir erros nas estimativas de distância em cenários de linha de visada obstruída (NLOS). Embora a precisão seja significativamente melhorada, a dependência do CSI e os altos requisitos computacionais limitam sua adoção em aplicações práticas, especialmente em dispositivos IoT de baixo custo.

As abordagens discutidas apresentam diferentes níveis de complexidade, precisão e aplicabilidade. Soluções como o FUSIC destacam-se por utilizarem CSI para melhorar a precisão em cenários NLOS, mas introduzem desafios como a necessidade de associação aos pontos de acesso e altos requisitos computacionais. Por outro lado, a implementação nativa do FTM no ESP32 demonstra ser prática para aplicações de baixo custo e baixa complexidade, embora limitada em ambientes internos devido ao multicaminhamento e às interferências.

A abordagem proposta neste trabalho busca equilibrar precisão e simplicidade,

explorando as características intrínsecas do FTM sem depender de CSI ou RSSI. Isso permite uma aplicação mais abrangente e com menores requisitos computacionais, sendo adequada para dispositivos IoT com recursos limitados. No entanto, persiste o desafio de lidar com cenários de multicaminhamento extremos, o que motiva futuras melhorias no algoritmo.

4. Proposta

Nesta seção apresentamos o algoritmo proposto, que baseia-se em duas premissas fundamentais sobre as medições FTM. A primeira é que essas tendem a apresentar erros positivos, ou seja, estimativas maiores que as distâncias reais, devido ao multicaminhamento. Isso ocorre porque o sinal refletido sempre percorre um caminho mais longo que o sinal direto. A segunda premissa considera que, em um conjunto de medidas consecutivas de um alvo em movimento, algumas medições serão realizadas com linha de visada direta, resultando em estimativas mais precisas. Aproveitando estas características, desenvolvemos um filtro adaptativo assimétrico que prioriza as medições menores, respeitando as limitações físicas de velocidade do alvo.

Para se adaptar as limitações físicas de movimento do alvo e as características do FTM foram utilizados dois parâmetros. São eles: **o primeiro** parâmetro que limita a correção dos dados em função da estimativa da velocidade máxima do alvo, ou seja, o quanto uma leitura de distância pode ser maior que a anterior, impedindo que valores muito grandes e fora da realidade previsível altere o resultado. Já **o segundo** parâmetro ajusta a prioridade que será dada aos valores baixos, ou seja, o quão rápido ele se ajusta a novas leituras menores que a atual. Uma vez que consideramos mais relevantes as leitura mais baixas, é necessário permitir uma variação mais rápida neste sentido, a fim de aproximarmos as medidas mais rapidamente da realidade. Porém, é necessário inserir um filtro, para que erros grosseiros, possíveis por falha no hardware, não levem a grandes erros de leitura. Os parâmetros então são:

$$\Delta MAX = v_{max} \times \Delta t \quad (5)$$

$$\Delta MIN = k \times \Delta MAX \quad (6)$$

Onde:

- v_{max} é a velocidade máxima esperada do alvo
- Δt é o intervalo entre medições
- k é uma constante de ajuste

O ΔMAX representa a máxima variação possível na distância entre duas medições consecutivas, considerando a velocidade típica do alvo. Para aplicações de rastreamento de pessoas em ambientes internos, utilizamos como base a velocidade média de caminhada humana.

Optou-se por utilizar um parâmetro ΔMIN definido como múltiplo de ΔMAX , estabelecendo que as correções para valores menores sejam proporcionalmente mais rápidas, de acordo com a velocidade máxima estimada do alvo. Em testes empíricos, valores de K entre 20 e 50, que correspondem a uma confiabilidade superior a 95% para as medidas mais baixas, demonstraram-se altamente eficientes. Este ajuste permite que a distância calculada convirja rapidamente para um valor mais próximo ao real.

O algoritmo proposto pode ser implementado conforme o pseudocódigo abaixo e tem como função limitar as variações máximas permitidas, tanto para o acréscimo quanto para o decréscimo da distância calculada, de acordo com os parâmetros definidos, além de aplicar variações que estejam abaixo desses limites para garantir a maior resolução possível do sistema:

```
Função filtro_adaptativo(distancia_anterior, distancia_lida)  
    diferenca =  $|distancia\_lida - distancia\_anterior|$   
    se distancia_lida  $\geq$  distancia_anterior então  
        se diferenca  $>$   $\Delta MAX$  então  
            valor = distancia_anterior +  $\Delta MAX$   
        senão  
            valor = distancia_anterior + diferenca  
    se distancia_lida  $<$  distancia_anterior então  
        se diferenca  $>$   $\Delta MIN$  então  
            valor = distancia_anterior -  $\Delta MIN$   
        senão  
            valor = distancia_anterior - diferenca  
    retorna valor
```

O algoritmo apresenta vantagens significativas em relação a outras abordagens, por exemplo, ao não requerer que seja realizado o processo de associação com o *Access Point*, pois utiliza o FTM puro, o que permite medições simultâneas com múltiplos respondedores. Além disso, possui um baixo custo computacional, viabilizando a implementação em sistemas embarcados. Também dispensa hardware adicional, exceto pelo suporte ao FTM, e é autoadaptativo às condições do ambiente, além de não exigir calibração prévia.

As principais limitações do algoritmo são: seu tempo de convergência inicial e um possível atraso na detecção de mudanças bruscas de distâncias, dependendo dos parâmetros escolhidos.

O algoritmo proposto apresenta complexidade computacional $O(1)$ tanto temporal quanto espacial, característica que o torna especialmente eficiente. Em sua execução, realiza apenas operações aritméticas simples e comparações condicionais, mantendo tempo de processamento constante independentemente do número de medições. Quanto ao uso de memória, utiliza alocação fixa e trabalha apenas com dois valores: a medida calculada anteriormente e a leitura atual, dispensando o armazenamento de histórico. Esta baixa complexidade computacional combinada com requisitos mínimos de memória o torna particularmente adequado para implementação em dispositivos com recursos computacionais limitados, como o ESP32. Comparado a abordagens baseadas em CSI ou aprendizado de máquina (que podem apresentar complexidade $O(n)$ ou superior e exigir grande alocação de memória para dados e histórico), nosso algoritmo oferece uma solução computacionalmente eficiente sem comprometer a precisão das medições em cenários com multicaminhamento.

5. Metodologia de Avaliação

Para validação do algoritmo proposto, utilizou-se como base o dataset disponibilizado em [Barral 2021] e que pode ser encontrado em <https://ieee-dataport.org/open-access/esp32s2-ftm-measurements>. Este conjunto de dados foi gerado utilizando placas de desenvolvimento ESP32-S2-Saola-1 da Espressif, configuradas tanto como Respondedores (âncoras) quanto como Iniciadores (alvos). O dataset foi coletado em dois cenários distintos.

O ESP32-S2 possui suporte integrado ao IEEE 802.11 b/g/n e diversos periféricos [ESP-IDF 2024] [github 2024]. Conta com 43 pinos GPIO, processador Xtensa 32-bit LX7 single-core de 240MHz, 320kB de SRAM e 128kB de ROM. O dispositivo possui recursos avançados de criptografia e desempenho de rádio aprimorado em comparação com seu antecessor, apresentando as seguintes características relevantes para o experimento:

- Suporte ao protocolo FTM (IEEE 802.11-2016)
- Operação na banda de 2.4GHz
- Largura de banda configurável (20/40MHz)
- Alta precisão nos *timestamps* (picossegundos)

Para a realização do experimento, foram escolhidos dois cenários disponíveis no dataset: um externo, com a finalidade de estabelecer uma linha base de performance do sistema com mínima interferência, e um cenário interno em ambiente controlado com múltiplas fontes de interferência, simulando um cenário real de uso. As características de cada um dos cenários são:

- Cenário Externo:
 - Área aberta do campus universitário
 - Mínima interferência de RF detectada
 - Dois módulos em tripés a 1,75m de altura
 - Medições de 120 segundos
 - Distâncias variando de 1 a 20 metros em intervalos de 1 metro
- Cenário Interno:
 - Sala com dimensões de 12m x 6m x 3,2m
 - Múltiplas redes Wi-Fi detectadas (> 7)
 - Presença de dispositivos Bluetooth e ZigBee
 - Diversos obstáculos físicos
 - 4 âncoras fixas nos cantos
 - 1 dispositivo móvel para medições em diferentes pontos
 - Tempo de medição: 180 segundos por ponto

Para cada ponto de medição, foram coletados os seguintes parâmetros:

- *anchorId*: Identificador único do módulo âncora
- *rtt_raw*: Valor bruto do RTT em nanosegundos
- *rtt_est*: Estimativa corrigida do RTT fornecida pelo firmware em nanosegundos
- *rss_i*: Nível de potência do sinal recebido em dBm
- *dist*: Distância real medida até a âncora em metros

A conversão do RTT para distância é realizada através da equação:

$$d = \frac{rtt \cdot c}{2} \quad (7)$$

Onde:

- d é a distância estimada em metros
- rtt é o tempo de ida e volta em nanosegundos
- c é a velocidade da luz ($\approx 0,299792458$ m/ns)

Para avaliar o desempenho do sistema, foram adotadas duas métricas principais: o erro absoluto entre a medida estimada e a medida real, e a função de distribuição cumulativa (CDF) do erro. A escolha dessas métricas específicas, em detrimento de outras comumente utilizadas na literatura, como o Erro Médio Absoluto (MAE) ou o Desvio Padrão, fundamenta-se na natureza convergente do algoritmo proposto.

O algoritmo desenvolvido processa os dados coletados em cada ponto de medição e converge para um único valor estimado de distância. Esta característica fundamental do sistema implica que, para cada ponto de medição, obtém-se apenas uma estimativa final, e não uma série de medidas que poderiam ser analisadas estatisticamente através de métricas como MAE ou desvio padrão.

Para utilizar métricas estatísticas tradicionais como MAE ou desvio padrão, seria necessário realizar múltiplas séries de medições independentes, retornando aos mesmos pontos várias vezes para coletar novos conjuntos completos de dados, não disponíveis no dataset usado.

Portanto, optou-se por utilizar:

1. O erro absoluto (E_a) como métrica primária:

$$E_a = |d_{estimada} - d_{real}| \quad (8)$$

onde $d_{estimada}$ é a distância calculada pelo algoritmo e d_{real} é a distância real medida.

2. A função de Distribuição Cumulativa (CDF) do erro fornece uma visualização clara da distribuição dos erros, facilitando a interpretação dos resultados e a identificação dos percentis de erro para comparação direta com outros métodos da literatura.

Esta abordagem permitiu uma avaliação objetiva e significativa do desempenho do sistema, mantendo o foco na capacidade do algoritmo de convergir para estimativas mais precisas em cada ponto de medição, que é o objetivo principal do trabalho.

6. Resultados e Discussão

Na Figura 3, observam-se todos os pontos coletados no cenário externo. É possível notar que as medidas apresentam relativamente pouco ruído e que, de modo geral, as leituras de distância do FTM puro estão acima do valor da distância real.

Na Figura 4, referente ao cenário interno, apesar de haver muito mais ruído e imprecisões nas leituras devido principalmente ao multicaminhamento, o mesmo comportamento das leituras do FTM puro apresentarem valores superiores à distância real pode ser claramente observado.

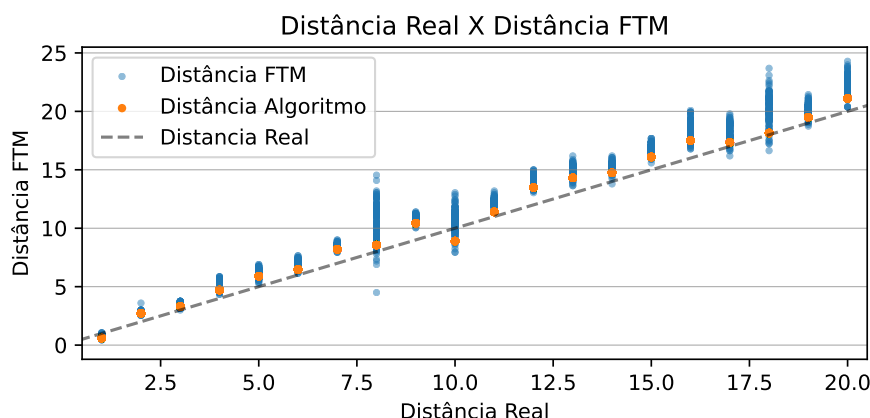


Figura 3. Leituras obtidas em ambiente externo

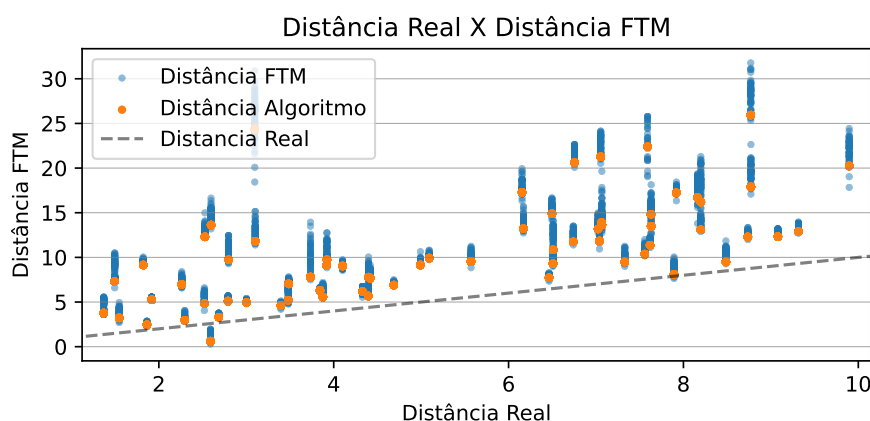


Figura 4. Leituras obtidas em ambiente interno

O algoritmo demonstrou alta eficiência nos dois cenários testados, apresentando resultados superiores ao FTM puro. Na Figura 5, pode-se observar um exemplo em um único ponto de como o algoritmo converge para um valor mais próximo do valor real e não apresenta variações bruscas como nos dados lidos diretamente do FTM. Um ponto forte do algoritmo é sua capacidade de minimizar variações bruscas de leitura, impedindo que *outliers* ou erros grosseiros de alguma leitura devido ao multicaminhamento ou outro fator externo interfiram no resultado, mantendo, desta forma, um controle mais efetivo sobre os erros.

No cenário externo, verificou-se um erro de 1,03 metros no 80º percentil, resultado 50.5% melhor que o FTM puro, que apresentou erro de 2,09 metros, conforme observado na Figura 6.

Já no cenário interno, demonstrado na Figura 7, que se mostra muito mais desafiador devido aos obstáculos que causam multicaminhamento do sinal, o erro foi de 4,77 metros para o 80º percentil no algoritmo proposto e de 9,09 metros para o FTM puro, demonstrando uma melhora de 47.5%.

Destacamos que nos cenários anteriores, não foi possível comparar os resultados

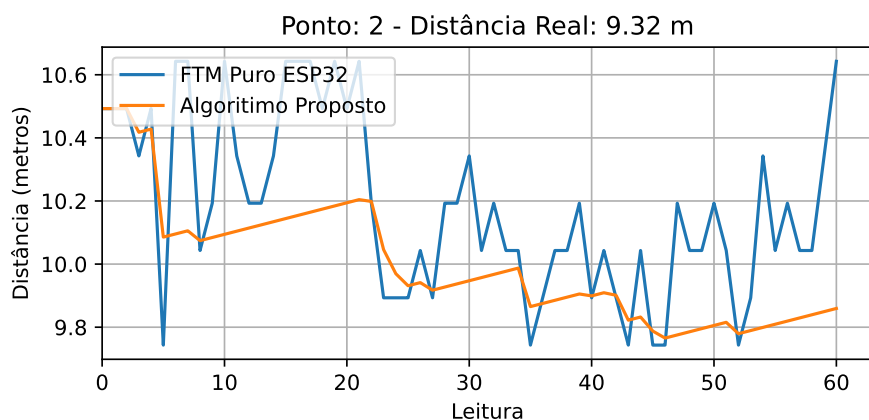


Figura 5. Exemplo de convergência do algoritmo adaptativo

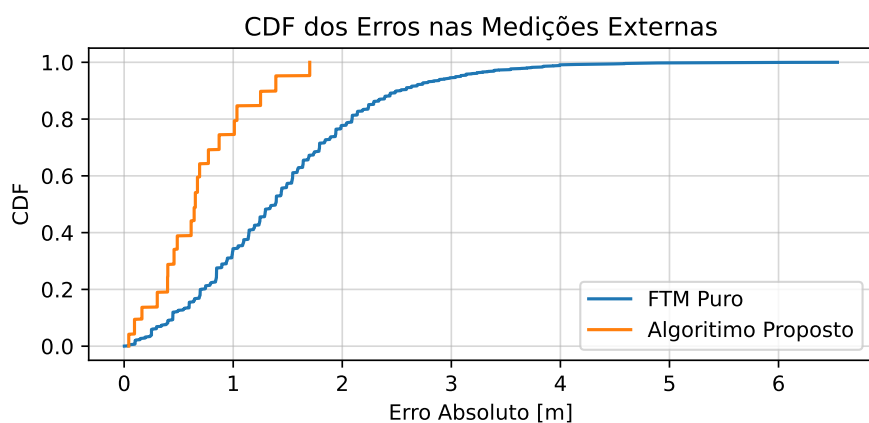


Figura 6. Distribuição cumulativa dos erros em ambiente externo

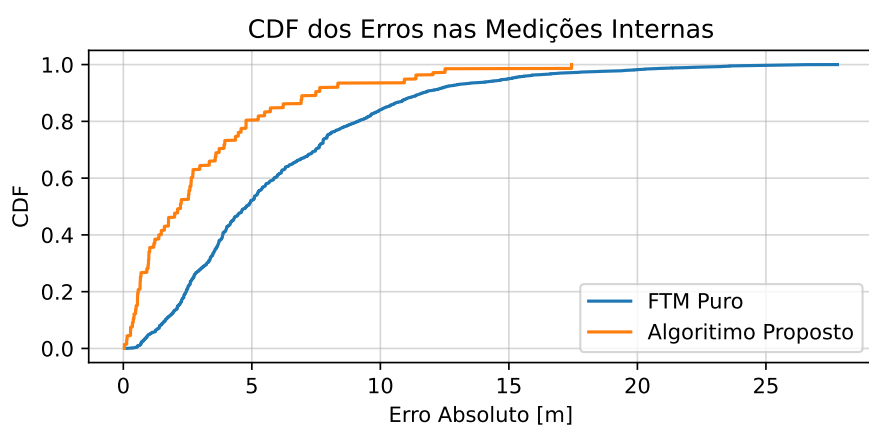


Figura 7. Distribuição cumulativa dos erros em ambiente interno

com os apresentados em [Barral Vales et al. 2022], pois os dados calculados pelo algoritmo apresentados naquele artigo não estão disponíveis no dataset. Entretanto, o mesmo artigo apresenta um outro cenário de teste de validação que contém os dados calculados no

dataset. Comparando esses resultados com o algoritmo proposto neste trabalho, observa-se, na Figura 8, que o erro no 80º percentil do algoritmo adaptativo ficou em 5,35 metros, enquanto no algoritmo de Barral ficou em 6,17 metros. Isso demonstra uma melhora de 13,3% na precisão em relação a este último e de 33,5% em relação ao FTM puro, que apresentou um valor de 8,04 metros no 80º percentil.

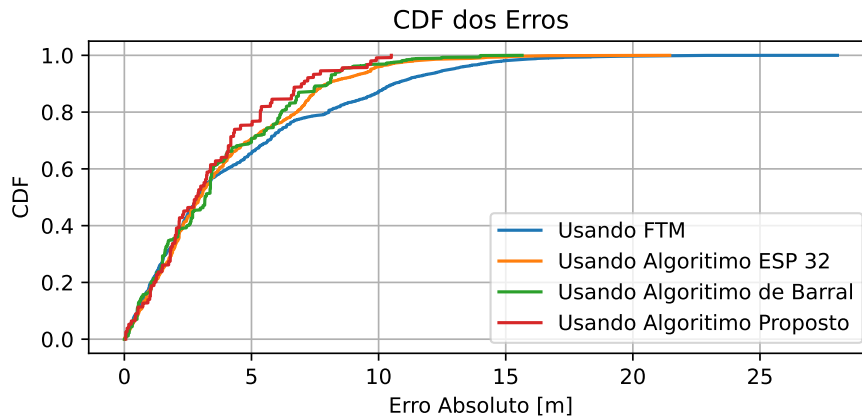


Figura 8. Análise comparativa dos erros entre os algoritmos

7. Conclusões e Trabalhos Futuros

O presente estudo apresentou uma abordagem inovadora para medições de distância baseadas no protocolo Fine Time Measurement (FTM) utilizando o ESP32. A partir de uma análise detalhada das limitações de métodos existentes, como aqueles baseados em RSSI e CSI, propôs-se um algoritmo adaptativo centrado nas características do próprio FTM. Os resultados demonstraram que o método proposto é capaz de oferecer uma precisão superior em comparação com o FTM puro, especialmente em cenários indoor com alto nível de multicaminhamento. A solução também se destaca por sua simplicidade computacional e pela independência de associações Wi-Fi, ampliando consideravelmente seu potencial de aplicação.

As principais contribuições deste trabalho incluem:

- Desenvolvimento de um Algoritmo Adaptativo: Um modelo que prioriza resultados menores, considerando que erros por multicaminhamento geralmente superestimam a distância real.
- Validação Experimental Abrangente: Testes realizados em dataset coletado em cenários reais, incluindo condições de alta interferência, demonstraram a robustez da solução.
- Proposta de Uma Solução Ampla: A utilização exclusiva do FTM, sem necessidade de RSSI ou CSI, reduz a dependência de outros sistemas e aumenta a viabilidade para IoT.

Embora os resultados sejam promissores, algumas limitações foram identificadas:

- Dependência de Configurações Específicas: O desempenho é sensível à escolha de parâmetros, como os coeficientes de ajuste (ΔMAX e ΔMIN).

- Desempenho em Cenários Extremamente Densos: Em ambientes com interferências severas e grande quantidade de dispositivos, a precisão pode ser reduzida.
- Testes Limitados ao ESP32: A solução ainda não foi avaliada em outros dispositivos com suporte ao FTM.

Como continuidade deste trabalho, propõe-se realizar uma nova coleta de dados de forma contínua, não apenas em pontos discretos pré-determinados, o que potencialmente beneficiaria o funcionamento do algoritmo proposto, possivelmente resultando em melhor desempenho.

A validação do sistema proposto pode ser estendida para incluir diversos ambientes desafiadores. Propõe-se a realização de testes em ambientes industriais caracterizados por alta densidade de equipamentos metálicos, onde os efeitos de multicaminha-mento são mais pronunciados. Faz-se necessária também a avaliação em edifícios com múltiplos pavimentos e diferentes materiais construtivos, visando compreender o impacto das variações estruturais no desempenho do sistema. A validação em cenários com alta densidade de pessoas em movimento também se mostra relevante, assim como a análise em ambientes sujeitos a diferentes níveis de interferência eletromagnética.

O desenvolvimento de um sistema de localização tridimensional robusto constitui uma extensão natural deste trabalho. Para tal fim, propõe-se investigar o algoritmo de Levenberg-Marquardt para otimização não linear, aplicando-o na minimização do erro de posicionamento tridimensional. O filtro de Kalman Estendido seria implementado para realizar a fusão de sensores, combinando as medições FTM com dados inerciais quando disponíveis. A trilateração com múltiplos pontos de ancoragem seria utilizada para melhorar a precisão da estimativa de posição em três dimensões.

Referências

- 802.11, I. (2016). IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks—Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. *IEEE Std 802.11-2016 (Revision of IEEE Std 802.11-2012)*, pages 1–3534. Conference Name: IEEE Std 802.11-2016 (Revision of IEEE Std 802.11-2012).
- Au, E. (2016). The Latest Progress on IEEE 802.11mc and IEEE 802.11ai [Standards]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 11(3):19–21. Conference Name: IEEE Vehi-cular Technology Magazine.
- Barral, V. (2021). ESP32S2 FTM Measurements.
- Barral Vales, V., Fernández, O. C., Domínguez-Bolaño, T., Escudero, C. J., and García-Naya, J. A. (2022). Fine Time Measurement for the Internet of Things: A Practical Approach Using ESP32. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(19):18305–18318. Con-ference Name: IEEE Internet of Things Journal.
- ESP-IDF, E. (2024). ESP-IDF Programming Guide - ESP32 - — ESP-IDF Programming Guide v5.3.2 documentation.

- Farahsari, P. S., Farahzadi, A., Rezazadeh, J., and Bagheri, A. (2022). A Survey on Indoor Positioning Systems for IoT-Based Applications. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(10):7680–7699. Conference Name: IEEE Internet of Things Journal.
- github, E.-I. (2024). espressif/esp-idf. original-date: 2016-08-17T10:40:35Z.
- Hashem, O., Harras, K. A., and Youssef, M. (2021). Accurate indoor positioning using IEEE 802.11mc round trip time. *Pervasive and Mobile Computing*, 75:101416.
- Jiokeng, K., Jakllari, G., Tchana, A., and Beylot, A.-L. (2020). When FTM Discovered MUSIC: Accurate WiFi-based Ranging in the Presence of Multipath. In *IEEE INFOCOM 2020 - IEEE Conference on Computer Communications*, pages 1857–1866. ISSN: 2641-9874.
- Tadayon, N., Rahman, M. T., Han, S., Valaee, S., and Yu, W. (2019). Decimeter Ranging With Channel State Information. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 18(7):3453–3468. Conference Name: IEEE Transactions on Wireless Communications.
- Voggu, A. R., Vazhayil, V., and Rao, M. (2021). Decimeter Level Indoor Localisation with a Single WiFi Router using CSI Fingerprinting. In *2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pages 1–5. ISSN: 1558-2612.