

ESCOLA POLITÉCNICA DA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Sistema de localização em ambientes internos

Bruno Alan Miyamoto
N. USP 7626755

Gustavo Ryu Shimada
N. USP 7666812

Orientador: Prof. Dr. Jun Okamoto Jr.

São Paulo

2015

BRUNO ALAN MIYAMOTO

GUSTAVO RYU SHIMADA

Sistema de localização em ambientes internos

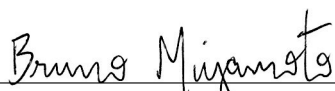
Monografia apresentada no Departamento
de Engenharia Mecatrônica e Sistemas
Mecânicos da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Engenheiro

Área de Concentração:
Engenharia Mecatrônica

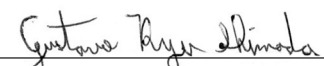
Orientador: Prof. Dr. Jun Okamoto Jr.

São Paulo
2015

Este relatório é apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. É o produto do nosso próprio trabalho, exceto onde indicado no texto. O relatório pode ser livremente copiado e distribuído desde que a fonte seja citada.



Bruno Alan Miyamoto



Gustavo Ryu Shimada

Resumo

A localização em ambientes internos possui diversas aplicações comerciais, industriais ou domésticas. Neste trabalho, foi realizado o desenvolvimento de um sistema de localização bidimensional em tempo real para ambientes internos, incluindo projetos de *hardware* e *software*.

Inicialmente, é feito um levantamento das tecnologias com as características necessárias para o funcionamento do sistema, tais como o ultrassom e o *Ultra-wideband* (UWB). Esta última apresentou diversas vantagens e foi selecionada.

Os requisitos do projeto foram analisados. Entre eles, estão baixo consumo de energia, dimensões físicas reduzidas e precisão de localização da ordem de 300 a 600 mm.

Os componentes necessários ao *hardware* foram selecionados, sendo desenvolvidos dois dispositivos: o *beacon*, que é fixado ao objeto a ser localizado, e o *node*, que é posicionado em locais fixos e conhecidos no ambiente. Foi desenvolvido um *hardware* dedicado tanto para o *beacon* como para o *node*. O projeto de *software* de cada um dos componentes do sistema foi especificado e implementado.

Os testes realizados indicaram que o sistema desenvolvido apresentou características adequadas de precisão e repetibilidade para a aplicação proposta.

Abstract

Indoor positioning systems can be employed in several commercial, industrial or home applications. The objective of this project is the development of a real-time indoor 2D positioning system that consists of specialized hardware and software.

Initially a few suitable technologies are surveyed, such as ultrasound and Ultra-wideband (UWB). The latter presented most favorable characteristics and was selected.

Project requirements including low energy consumption, small physical features and positioning accuracy of 300 to 600 mm were then analyzed.

Main electronic parts were specified and two devices were developed: the beacon, which is mobile and tracked, and the node, which is positioned in fixed known locations. Hardware design was further detailed and the first prototypes were manufactured, mounted and tested. Software project is specified and fully implemented.

Tests indicated that the system presented adequate precision and repeatability properties considering the proposed application.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Metodologia	2
2	Localização em ambientes internos	2
2.1	Técnicas de localização baseadas em tempo	5
2.1.1	Time of Flight (TOF) ou Time of Arrival (TOA)	5
2.1.2	Time Difference of Arrival (TDOA)	6
2.1.3	Abordagens estatísticas	9
2.1.4	Sincronização de <i>clock</i>	9
2.1.5	Sincronização de clock por interpolação linear	10
3	Projeto do sistema	12
3.1	Análise de requisitos	12
3.1.1	Precisão e acurácia	12
3.1.2	Consumo de energia	12
3.1.3	Dimensões	12
3.1.4	Comunicação e conexões	12
3.1.5	Número de dispositivos	13
3.1.6	Resistência às condições ambientais	13
3.2	Arquitetura	13
4	Desenvolvimento de <i>hardware</i>	14
4.1	Dispositivo <i>Beacon</i>	14
4.2	Dispositivo <i>Node</i>	16
4.3	Projeto do circuito e produção de <i>layouts</i>	17
4.4	Fabricação de protótipos e validação de funcionamento	17
4.5	Dispositivo sincronizador	18
4.6	Central de processamento	18
5	Desenvolvimento de <i>software</i>	19
5.1	Dispositivo <i>beacon</i>	19
5.1.1	Especificação de funcionamento	19
5.1.2	Formato dos pacotes enviados	19
5.1.3	Estrutura	20
5.1.4	Sequência de operação	20
5.2	Dispositivo sincronizador	21
5.3	Dispositivo <i>node</i>	21
5.3.1	Especificação de funcionamento	21
5.3.2	Formato dos pacotes de dados enviados à central de processamento	21

5.3.3	Estrutura	22
5.3.4	Sequência de operação	23
5.4	Central de processamento	24
5.4.1	Especificação de funcionamento	24
5.4.2	Estrutura	24
5.4.3	Sequência de operação	25
6	Testes para avaliação de desempenho	26
6.1	Procedimento experimental	26
6.2	Comportamento da estimativa de posição ao longo do tempo	26
6.2.1	Experimento	26
6.2.2	Análise	27
6.3	Estimativa de posição para múltiplos pontos experimentais	28
6.3.1	Experimento	28
6.3.2	Análise	29
6.4	Realização de experimentos com um segundo <i>beacon</i>	31
6.4.1	Experimento	31
6.4.2	Análise	32
6.5	Presença de obstáculo ao sinal	33
6.5.1	Experimento	33
6.5.2	Análise	35
6.6	Localização simultânea de dois <i>beacons</i>	36
6.6.1	Experimento	36
6.6.2	Análise	36
6.7	Simulação de erros devido a desvios na altura do <i>beacon</i>	36
6.7.1	Simulação	36
6.7.2	Análise	37
7	Conclusões	37
	Referências	39

1 Introdução

Sistemas de localização em ambientes internos possuem diversas aplicações comerciais, industriais ou domésticas. No âmbito industrial, uma possível utilização desse tipo de sistema é na localização de operários, máquinas e insumos em fábricas para maior controle logístico sobre a produção. Essa tecnologia pode ser potencialmente aplicada no controle e rastreamento de robôs ou sistemas de transporte autônomos (Zwirello et al., 2010). O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema para localização de tempo real em ambientes internos.

Para obtenção da localização em ambientes externos, é possível utilizar tecnologias tradicionais como o Sistema Global de Posicionamento por Satélites (GPS) e a triangulação por Wi-Fi. Entretanto, o uso dessas abordagens em ambientes internos, ou produz resultados com baixa qualidade, ou não é possível. Assim, torna-se necessário o uso de outra tecnologia (Subbu et al., 2014).

Entre as técnicas que buscam solucionar esse problema estão a localização por posicionamento magnético (Haverinen; Kemppainen, 2009), a localização por sensores inerciais (Subbu et al., 2014) e a estimativa de distância por intensidade de sinal (Liu, 2007). No entanto, tais abordagens apresentam limitações como a necessidade de mapeamento do ambiente e o acúmulo de erros de sensores, que restringem suas aplicações práticas em condições não ideais.

Uma alternativa é a tecnologia de localização por detecção do tempo de propagação de ondas eletromagnéticas. No caso específico da geração de pulsos por rádios UWB (*Ultra-wideband*), há diversas características favoráveis à implementação em um contexto industrial, tais como a capacidade de penetração de obstáculos e a resistência a interferências (Gezici; Poor, 2009; Liu, 2007). Por esses motivos, dentre outros analisados, optou-se pela utilização dessa abordagem.

Este projeto consiste no desenvolvimento de *hardware* e *software* especializados compondo um sistema de localização bidimensional de múltiplos objetos em tempo real, para ambientes internos. A precisão das estimativas de posição é da ordem de 300 a 600 mm, sendo esta alcançada através da utilização de um sistema de rádio e uma técnica de medição de tempo de propagação de ondas.

Para transmissão e recepção dos pacotes de rádio, são utilizados módulos comercialmente disponíveis. O desenvolvimento de geradores e receptores de sinal de rádio está fora do escopo deste trabalho. Os focos principais do projeto são a integração entre os componentes selecionados para composição do sistema e o desenvolvimento de algoritmos que permitam a coleta de dados e a interpretação dos dados coletados para obtenção da posição estimada do objeto da localização.

1.1 Metodologia

A arquitetura e os requisitos do sistema foram definidos após uma revisão extensiva do tema de localização em ambientes internos, que possibilitou a seleção das tecnologias empregadas. Os algoritmos necessários para implementação do cálculo da estimativa de posição foram estudados e desenvolvidos.

Partindo das informações obtidas, foi realizado o projeto do *hardware*, que incluiu o levantamento e o estudo dos componentes com potencial para utilização. Essa análise possibilitou a seleção de componentes adequados, que foram considerados no projeto dos circuitos eletrônicos dos dispositivos.

Os protótipos dos componentes desenvolvidos foram fabricados e montados nos laboratórios da Escola Politécnica e o funcionamento dos mesmos foi verificado com desenvolvimento e programação de *software* básico.

O *software* completo das partes que formam o sistema foi então especificado e implementado, possibilitando a realização de testes de desempenho.

As características do sistema desenvolvido foram levantadas com a execução de diversos experimentos que visaram verificar o atendimento aos requisitos de projeto.

2 Localização em ambientes internos

Há diversas técnicas atualmente sendo desenvolvidas para a solução da questão da localização em ambientes internos. A localização por posicionamento magnético se baseia na detecção de variações no campo magnético terrestre devido à interação com ferro presente em construções, porém necessita de um mapeamento prévio do ambiente (Haverinen; Kemppainen, 2009). Já a localização pela leitura de sensores inerciais, como acelerômetros e giroscópios, está sujeita ao acúmulo de erro dos sensores e fornece medidas relativas (Subbu et al., 2014).

Uma alternativa é a estimativa de distância pela detecção da intensidade de ondas eletromagnéticas (RSS, ou *Received Signal Strength*). Entretanto, a propagação de sinal de rádio em ambientes internos é suscetível a reflexões por múltiplos caminhos, reduzindo a precisão da localização estimada. Por isso, em muitos casos o modelo que transforma a intensidade na estimativa de distância possui parâmetros específicos ao local de implementação (Liu, 2007).

As técnicas baseadas na medição do tempo que uma onda leva para se propagar de um transmissor a um receptor, tais como *time of flight* (TOF) e *time difference of arrival* (TDOA), promovem resultados mais precisos e acurados que as baseadas em intensidade de sinal (Gaffney, 2008), porém podem também estar sujeitas a problemas devido a propagação por múltiplos caminhos (Liu, 2007). Essas técnicas podem ser implementadas por ondas mecânicas, caso do ultrassom (Ijaz et al., 2013), ou eletromagnéticas, caso da

Ultra-wideband (UWB) (Gezici; Poor, 2009).

Sistemas de localização em ambientes internos por ultrassom permitem a precisão na ordem de centímetros e possuem vantagens como o baixo custo do sistema, a escalabilidade e a alta eficiência energética. Seu princípio de funcionamento é o *time of flight* (TOF), no qual é calculado o tempo entre o envio do sinal por um transmissor e a sua chegada em um receptor. Utilizando-se a velocidade do som pode-se estimar a distância percorrida pela onda (Ijaz et al., 2013).

A tecnologia de ultrassom possui duas desvantagens principais: a velocidade do som no ar é suscetível a variações ambientais e as estimativas podem ser afetadas por ruídos ultrassônicos. Fatores como a umidade, que dificulta a propagação de ondas sonoras, e a temperatura, que afeta a velocidade do som, impactam negativamente o sistema. Ruídos ultrassônicos provenientes de máquinas e equipamentos eletrônicos também afetam as medidas obtidas (Ijaz et al., 2013).

Uma tecnologia que supera algumas dessas limitações é a de rádios *Ultra-wideband* (UWB). Ela se baseia na transmissão de pulsos curtos (da ordem de um nanosegundo) em uma banda larga (superior a 500 MHz). Essas características trazem vantagens para aplicações em localização, como a penetração de obstáculos, o baixo custo e a baixa demanda energética de transmissores e receptores; além dessas, a UWB também permite a transmissão de dados em alta velocidade (Gezici; Poor, 2009). A larga banda de transmissão permite sua utilização junto a outros sinais RF sem que haja interferências significativas, dadas as diferenças em tipo de sinal e espectro. Os pulsos curtos garantem alta resolução no tempo e facilitam a filtragem dos pulsos resultantes de reflexões daqueles corretos (Liu, 2007).

Outro aspecto que contribui para a viabilidade de utilização da UWB no projeto é a existência de módulos UWB comercialmente disponíveis e de custo relativamente baixo que interfaceiam com microcontroladores. Um exemplo é o DWM1000, desenvolvido pela empresa irlandesa DecaWave. Entre suas características, estão a precisão de localização de 10 cm, taxas de comunicação de até 6,8 Mb/s, alcance de até 300 m em LOS (*Line of Sight*) e capacidade de comunicação de alta densidade, com até 11000 dispositivos em um raio de 20 m (DecaWave, 2015).

Em (Zwirello et al., 2010) e (Bharadwaj et al., 2013) foram realizados estudos da aplicação da UWB a sistemas de localização em ambientes internos. Zwirello et al. (2010) realizaram simulações do tipo *3D Ray Tracing*, que se baseia no modelo de propagação da onda em espaço tridimensional aplicadas a construções industriais. Bharadwaj et al. (2013) executaram ensaios experimentais em laboratório, verificando a influência de obstáculos ao sinal. Em ambos os estudos, foram obtidos erros médios inferiores a 10 cm, indicando a viabilidade da tecnologia.

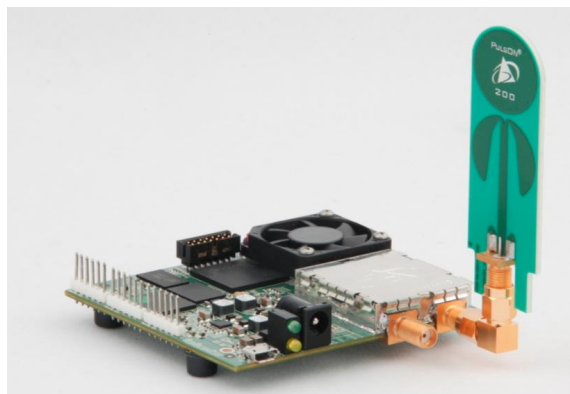


Figura 1: Rádio P410 da Time Domain com antena acoplada. Fonte: Time Domain (2015).

A empresa Time Domain comercializa o rádio P410 (Figura 1), que se utiliza da técnica TW-TOF (*two-way time of flight*) para estimar a posição entre dois rádios. Sua acurácia máxima é de 2 cm, sendo que a precisão e a acurácia combinadas na situação na qual não há linha direta de visão entre dois rádios é de 10 cm; suas dimensões são 76 x 80 x 16 mm (sem antena); o alcance máximo é 354 m (Time Domain, 2015). Essa empresa não fabrica um produto de dimensões inferiores que seja somente um transmissor.



Figura 2: Sistema Dart da Zebra. DartTag, Dart sensor e DartHub. Fonte: Zebra (2015).

A empresa Zebra comercializa uma solução completa para localização em tempo real em ambientes internos, denominada Dart. O sistema (Figura 2) é formado por *DartTags* (40 x 40 x 20 mm), que são fixados aos objetos cujas posições deseja-se estimar e emitem sinais UWB, *Dart sensors* (155 x 64 x 71 mm), que detectam o sinal das *DartTags*, e o *DartHub*, que recebe os dados dos *Dart sensors* através de comunicação serial por fio e possui um software que habilita a estimação de posição. A acurácia é de 30 cm em condições de linha direta de visão entre um DartTag e um Dart sensor; o alcance máximo é de 50 m (Zebra, 2015).

Há atualmente poucas empresas que comercializam sistemas completos de localização em ambientes internos utilizando a tecnologia UWB. Além disso, tais sistemas tem um custo relativamente alto (Yavari; Nickerson, 2014). O desenvolvimento de um novo sistema que seja robusto, garanta precisão razoável de localização e possua custo inferior às

soluções existentes é bastante favorável.

2.1 Técnicas de localização baseadas em tempo

Uma forma de se obter a estimativa de localização é através do uso de alguma técnica que possibilite o cálculo de informações de posição a partir de medições de tempo. Entre elas, estão *Time of Flight* (TOF) e *Time Difference of Arrival* (TDOA), que serão comparadas e analisadas quanto à adequação ao projeto.

2.1.1 Time of Flight (TOF) ou Time of Arrival (TOA)

Esta técnica fornece a distância entre uma fonte de sinal (*beacon*) e um receptor de sinal (*node*) a partir do tempo que o sinal leva para se propagar entre os dois, utilizando a informação da velocidade de propagação (velocidade da luz, no caso de sinais eletromagnéticos). Para que a estimativa do TOA seja obtida de forma não ambígua, é necessário que *beacons* e *nodes* tenham *clocks* sincronizados ou que seja implementado um protocolo para trocas de informação sobre tempo entre *beacons* e *nodes* (Gezici; Poor, 2009). Esse requisito torna mais complexa a operação do sistema e possivelmente aumenta o consumo de energia dos dispositivos, já que ambos devem realizar tanto transmissão quanto recepção de dados.

Abordagem geométrica Considerando que a posição do *node* é fixa e conhecida, uma medição de TOF define uma circunferência em torno do *node* na qual o *beacon* pode estar posicionado. A intersecção de três circunferências pode ser utilizada para determinar a posição do *beacon*, caracterizando o método da trilateração (Sahinoglu et al., 2008).

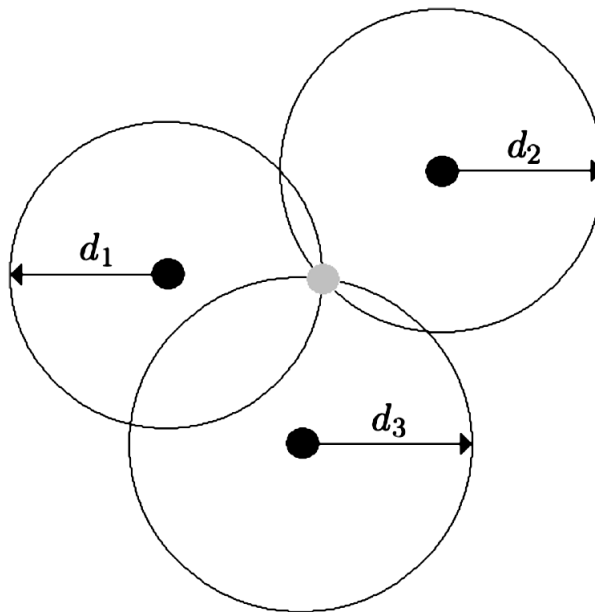


Figura 3: Estimativa de posição por trilateração. Fonte: Gezici; Poor (2009).

Sejam d_1 , d_2 e d_3 as distâncias obtidas pelas medições de TOA, conforme a Figura 3, o seguinte sistema de equações deve ser resolvido:

$$d_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y - y_i)^2}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

onde (x_i, y_i) é a posição do nó i e (x, y) é a posição do *beacon*. A solução do sistema (1) é:

$$x = \frac{(y_2 - y_1)\gamma_1 + (y_2 - y_3)\gamma_2}{2[(x_2 - x_3)(y_2 - y_1) + (x_1 - x_2)(y_2 - y_3)]}, \quad (2)$$

$$y = \frac{(x_2 - x_1)\gamma_1 + (x_2 - x_3)\gamma_2}{2[(x_2 - x_1)(y_2 - y_3) + (x_2 - x_3)(y_1 - y_2)]}, \quad (3)$$

onde

$$\gamma_1 = x_2^2 - x_3^2 + y_2^2 - y_3^2 + d_3^2 - d_2^2, \quad (4)$$

$$\gamma_2 = x_1^2 - x_2^2 + y_1^2 - y_2^2 + d_2^2 - d_1^2. \quad (5)$$

2.1.2 Time Difference of Arrival (TDOA)

TDOA é um parâmetro que indica a diferença entre os tempos de chegada de dois sinais partindo de uma fonte (*beacon*) e chegando a dois nós (*nodes*). O TDOA define uma hipérbole que delimita a posição do *beacon* no espaço. Assim, com a presença de ao menos três *nodes*, é possível determinar a posição do *beacon* em um espaço bidimensional, como indicado na Figura 4. Para obtenção do TDOA, é necessário que somente os *nodes* possuam *clocks* sincronizados (Gezici; Poor, 2009). Como não há necessidade de sincronização dos *clocks* dos *beacons*, a implementação dessa técnica implica em um menor consumo de energia.

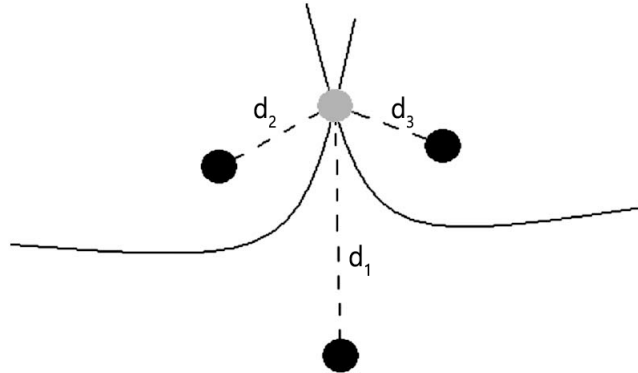


Figura 4: Estimativa de posição por TDOA. Adaptado de Gezici; Poor (2009).

Abordagem geométrica O lugar geométrico definido por cada medição de TDOA é uma hipérbole, na qual o *beacon* pode estar posicionado. O seguinte equacionamento é

sugerido por Sahinoglu et al. (2008). No caso de três nodes, a realização de duas medições de TDOA resulta nas seguintes equações:

$$d_{i1} \triangleq d_i - d_1 = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}, i = 2, 3 \quad (6)$$

que definem as duas hipérboles da Figura 4. O *beacon* é representado pelo ponto de cor cinza (x, y) e os nodes são os demais pontos. Cada node i , localizado em (x_i, y_i) , está a uma distância d_i do *beacon*. As equações definidas em (6) podem ser expressas no seguinte sistema linear, no qual as incógnitas são x , y e d_1 :

$$\begin{bmatrix} x_1 - x_2 & y_1 - y_2 \\ x_1 - x_3 & y_1 - y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_1 \\ y - y_1 \end{bmatrix} = d_1 \begin{bmatrix} d_{21} \\ d_{31} \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} d_{21}^2 - \tilde{d}_{21}^2 \\ d_{31}^2 - \tilde{d}_{31}^2 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

onde $\tilde{d}_{i1}^2 = (x_i - x_1)^2 + (y_i - y_1)^2$, para $i = 2, 3$.

Outra relação que pode ser utilizada é:

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

Combinando o sistema (7) e a equação (8), obtém-se uma equação quadrática para d_1 . Em determinadas condições geométricas, a solução dessa equação quadrática pode resultar em um valor único para d_1 , possibilitando o cálculo das coordenadas (x, y) do *beacon*.

Método de Chan Um método eficiente para estimação de posição por TDOA de forma geométrica é apresentado em Chan; Ho (1994). Seu desenvolvimento será aqui reproduzido. Seja (x, y) a posição do beacon e (x_i, y_i) as posições conhecidas dos sensores. A distância entre o beacon e o node i ao quadrado é dada por:

$$r_i^2 = (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 = K_i - 2x_i x - 2y_i y + x^2 + y^2, \quad (9)$$

onde

$$K_i = x_i^2 + y_i^2. \quad (10)$$

Seja

$$r_{i,1} = r_i - r_1 \Rightarrow r_i^2 = (r_{i,1} + r_1)^2. \quad (11)$$

Substituindo (11) em (9):

$$r_{i,1}^2 + 2r_{i,1}r_1 + r_1^2 = K_i - 2x_i x - 2y_i y + x^2 + y^2 \quad (12)$$

Subtraindo K_1 definido em (10) de (12):

$$r_{i,1}^2 + 2r_{i,1}r_1 = -2x_{i,1}x - 2y_{i,1}y + K_i - K_1, \quad (13)$$

onde $x_{i,1} = x_i - x_1$ e $y_{i,1} = y_i - y_1$.

Para o caso de 3 nodes, o sistema de equações definido em (13) é:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} x_{2,1} & y_{2,1} \\ x_{3,1} & y_{3,1} \end{bmatrix}^{-1} \times \left\{ \begin{bmatrix} r_{2,1} \\ r_{3,1} \end{bmatrix} r_1 + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} r_{2,1}^2 - K_2 + K_1 \\ r_{3,1}^2 - K_3 + K_1 \end{bmatrix} \right\}. \quad (14)$$

Desenvolvendo (14), obtém-se:

$$\begin{cases} x = \frac{r_1 D + F}{C} \\ y = \frac{r_1 E + G}{C}, \end{cases} \quad (15)$$

onde

$$\begin{aligned} A &= (K_2 - K_1 - r_{2,1}^2)/2 \\ B &= (K_3 - K_1 - r_{3,1}^2)/2 \\ C &= x_{2,1}y_{3,1} - x_{3,1}y_{2,1} \\ D &= y_{2,1}r_{3,1} - y_{3,1}r_{2,1} \\ E &= x_{3,1}r_{2,1} - x_{2,1}r_{3,1} \\ F &= y_{3,1}A - y_{2,1}B \\ G &= -x_{3,1}A + x_{2,1}B \end{aligned}$$

Substituindo (15) em (9) com $i = 1$, é obtida a seguinte equação quadrática em r_1 :

$$Hr_1^2 + \frac{2}{C}Ir_1 - J = 0, \quad (16)$$

onde

$$\begin{aligned} H &= 1 - \frac{D^2 + E^2}{C^2} \\ I &= \frac{2}{C} \left(x_1 D + y_1 E - \frac{DF + EG}{C} \right) \\ J &= -K_1 + \frac{2}{C}(x_1 F + y_1 G) - \frac{1}{C^2}(F^2 + G^2) \end{aligned}$$

As raízes de (16) são dadas por:

$$r_1 = \frac{-I \pm \sqrt{I^2 - 4HJ}}{2H} \quad (17)$$

Substituindo a raiz positiva de r_1 em (15), encontra-se x e y . Nos casos em que ocorram duas raízes positivas, deve-se utilizar restrições geométricas para escolher o resultado adequado.

2.1.3 Abordagens estatísticas

Apesar da relativa facilidade de implementação das abordagens geométricas, elas não consideram a presença de ruído nas estimativas obtidas. Isso pode fazer com que as intersecções entre os lugares geométricos gerados pelas medições de TOA ou TDOA sejam realizadas não mais em um ponto único. Esse fator tende a ter ainda mais significância quando são adicionados novos *nodes* ao sistema (Gezici; Poor, 2009).

Caso fossem realizadas mais medições do que o necessário - através de mais de três *nodes* - as soluções geométricas não fariam uso de toda a informação disponível. Entretanto, quando o sistema é implementado em condições com ruído, a utilização de um número maior de *nodes* pode resultar em uma estimativa de localização com maior precisão. Essas limitações das abordagens geométricas tornam interessante a consideração de abordagens estatísticas, que permitem realizar estimativas com qualquer quantidade de medições (Sahinoglu et al., 2008).

Diversas técnicas estatísticas de estimativa podem ser aplicadas. Entre elas, estão os estimadores Bayesianos (MMSE e MAP) e os de probabilidade máxima (ML), que se baseiam na observação de vários sinais em um instante de tempo. No caso de serem realizadas múltiplas observações ao longo do tempo, a estimativa da localização pode ser melhorada ao utilizar um modelo de movimento para o *beacon*. Técnicas como os filtros de Kalman, os filtros de partícula e os baseados em grade buscam resolver o problema do rastreamento, no qual são realizadas estimativas em instantes de tempo consecutivos (Sahinoglu et al., 2008).

2.1.4 Sincronização de *clock*

Para implementação da técnica TDOA, é necessário que os *nodes* possuam uma base de tempo comum. Como cada *node* possui sua própria fonte de *clock*, é necessária a aplicação de um algoritmo de sincronização entre eles (McElroy et al., 2014).

Segundo Wu et al. (2011), a relação entre o *clock* de *nodes* A e B pode ser modelada pela seguinte equação:

$$C_B(t) = \theta^{AB} + f^{AB} \cdot C_A(t),$$

onde θ^{AB} é a diferença de fase relativa (*offset*) e f^{AB} é a diferença de frequência relativa (inclinação).

No caso de dois *clocks* perfeitamente sincronizados, $\theta^{AB} = 0$ e $f^{AB} = 1$. Entretanto, devido a fatores como temperatura e variações de tensão, esses parâmetros variam com o tempo, tornando necessária a sincronização periódica entre os *clocks*. As principais abordagens para o problema da sincronização são: troca de mensagens entre receptores e transmissores, envio de mensagens de um transmissor para diversos receptores e sincronização entre receptores que recebem uma mensagem comum (Wu et al., 2011).

Em McElroy et al. (2014), são avaliadas e comparadas as seguintes técnicas: interpolação linear, controle PI, controle PID, controle PII e filtro de Kalman, sendo todas baseadas no modelo de envio de mensagens de um transmissor para diversos receptores. A interpolação linear e o filtro de Kalman possibilitaram a estimativa de localização com maior acurácia.

2.1.5 Sincronização de clock por interpolação linear

A interpolação linear se baseia no ajuste linear do tempo de recepção do pulso transmitido por um *beacon* pelos tempos de recepção de dois pulsos sucessivos de sincronização (McElroy et al., 2014), sendo que o intervalo entre a transmissão de pulsos de sincronização deve ser constante e conhecido. O desenvolvimento matemático do método será realizado na sequência.

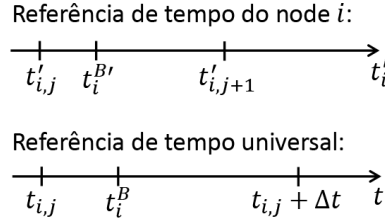


Figura 5: Instantes de tempo utilizados na sincronização por interpolação linear

Na referência de tempo do *node* i , dois pulsos consecutivos de sincronização são detectados nos instantes $t'_{i,j}$ e $t'_{i,j+1}$. No intervalo entre estes, um pulso proveniente de um *beacon* é recebido no instante $t_i^{B'}$, tal que $t'_{i,j} < t_i^{B'} < t'_{i,j+1}$.

Sabendo-se que os pulsos foram enviados com um intervalo Δt em uma referência de tempo universal, o ajuste linear do instante de recepção do pulso do *beacon* $t_i^{B'}$ para essa mesma referência de tempo universal é dado por:

$$\frac{t_i^{B'} - t'_{i,j}}{t'_{i,j+1} - t'_{i,j}} = \frac{t_i^B - t_{i,j}}{\Delta t} \Rightarrow t_i^B = t_{i,j} + \Delta t \frac{t_i^{B'} - t'_{i,j}}{t'_{i,j+1} - t'_{i,j}}, \quad (18)$$

onde t_i^B é o instante de recepção do pulso do *beacon* no *node* i e $t_{i,j}$ é o instante em que o primeiro pulso de sincronização atinge o *node* i , sendo ambos instantes aferidos na referência de tempo universal. Não é necessário conhecer o valor absoluto de $t_{i,j}$, já que na técnica TDOA somente são consideradas as diferenças entre os tempos de chegada. A Figura 5 ilustra o problema da sincronização por interpolação linear para as referências de tempo envolvidas.

Para localização em duas dimensões, são necessários três *nodes* ($i = 1, 2, 3$). Nesse caso, os valores de TDOA são calculados por:

$$t_2^B - t_1^B = (t_{2,j} - t_{1,j}) + \Delta t \left(\frac{t_2^{B'} - t_{2,j}'}{t_{2,j+1}' - t_{2,j}'} - \frac{t_1^{B'} - t_{1,j}'}{t_{1,j+1}' - t_{1,j}'} \right) \quad (19)$$

$$t_3^B - t_1^B = (t_{3,j} - t_{1,j}) + \Delta t \left(\frac{t_3^{B'} - t_{3,j}'}{t_{3,j+1}' - t_{3,j}'} - \frac{t_1^{B'} - t_{1,j}'}{t_{1,j+1}' - t_{1,j}'} \right) \quad (20)$$

As diferenças $t_{2,j} - t_{1,j}$ e $t_{3,j} - t_{1,j}$ entre os tempos de chegada dos pulsos de sincronização em *nodes* diferentes dependem da localização do emissor do pulso de sincronização em relação aos *nodes*. Supondo que o *node* i encontra-se nas coordenadas (x_i, y_i) e o emissor do pulso de sincronização encontra-se nas coordenadas (x_S, y_S) os instantes $t_{i,j}$ são calculados pelo tempo de propagação da onda eletromagnética entre o ponto (x_S, y_S) e o ponto (x_i, y_i) somado ao instante T_j^S , no qual o pulso de sincronização foi emitido:

$$t_{i,j} = T_j^S + \frac{d_{i,S}}{c}, \quad (21)$$

onde $d_{i,S} = \sqrt{(x_i - x_S)^2 + (y_i - y_S)^2}$ é a distância entre o *node* i e o emissor do pulso de sincronização e c é a velocidade de propagação da onda eletromagnética no ar.

Assim, calcula-se:

$$t_{2,j} - t_{1,j} = \frac{d_{2,S} - d_{1,S}}{c} \quad (22)$$

$$t_{3,j} - t_{1,j} = \frac{d_{3,S} - d_{1,S}}{c} \quad (23)$$

Substituindo (22) em (19) e (23) em (20), são obtidas as fórmulas para o cálculo dos valores de diferença de tempo de chegada (TDOA) utilizando sincronização por interpolação linear para localização bidimensional:

$$t_2^B - t_1^B = \frac{d_{2,S} - d_{1,S}}{c} + \Delta t \left(\frac{t_2^{B'} - t_{2,j}'}{t_{2,j+1}' - t_{2,j}'} - \frac{t_1^{B'} - t_{1,j}'}{t_{1,j+1}' - t_{1,j}'} \right) \quad (24)$$

$$t_3^B - t_1^B = \frac{d_{3,S} - d_{1,S}}{c} + \Delta t \left(\frac{t_3^{B'} - t_{3,j}'}{t_{3,j+1}' - t_{3,j}'} - \frac{t_1^{B'} - t_{1,j}'}{t_{1,j+1}' - t_{1,j}'} \right) \quad (25)$$

Para utilização destes valores no algoritmo de estimativa de posição, basta multiplicar os valores de TDOA pela velocidade de propagação da onda eletromagnética no ar:

$$r_{2,1} = c \times (t_2^B - t_1^B) \quad (26)$$

$$r_{3,1} = c \times (t_3^B - t_1^B) \quad (27)$$

3 Projeto do sistema

3.1 Análise de requisitos

Os requisitos de projeto serão analisados tendo em vista uma aplicação do sistema em ambiente industrial, como por exemplo na localização de operários, máquinas e insumos em fábricas.

3.1.1 Precisão e acurácia

Estima-se que tanto uma precisão quanto uma acurácia da ordem de 30 a 60 cm sejam suficientes para operação na indústria, dadas suas grandes dimensões. O sistema da Zebra, disponível no mercado, possui especificações dessa ordem (Zebra, 2015).

3.1.2 Consumo de energia

Os receptores de sinal, que estarão posicionados em locais fixos, podem estar conectados à rede elétrica. Assim, evita-se a necessidade de substituição de baterias.

Os transmissores de sinal, cujas posições serão estimadas, devem ser alimentados por baterias de longa duração. O circuito eletrônico dos transmissores deve ser projetado de forma a se reduzir o consumo de energia.

3.1.3 Dimensões

Por questões de praticidade da implantação do sistema, as dimensões físicas dos transmissores devem ser reduzidas. As dimensões da solução comercial da Zebra são de um quadrado de lado 40 mm (Zebra, 2015). Para este trabalho, os transmissores serão projetados utilizando como base o formato ID-1 (85,60 x 53,98 mm), descrito na norma ISO/IEC 7810:2003 (International Organization for Standardization, 2003).

Os receptores possuem requisitos dimensionais menos restritos, mas um tamanho reduzido também é favorável para instalação.

3.1.4 Comunicação e conexões

Os receptores devem poder se comunicar com uma central que realiza a análise de dados. A instalação do sistema é facilitada quando a forma de comunicação é sem fio.

Os sinal enviado dos transmissores aos receptores para estimação de distância também deve ser sem fio e deve permitir a identificação única dos transmissores. Além disso, o sistema deve ser capaz de operar em condições nas quais o sinal pode sofrer reflexões, principalmente em superfícies metálicas de geometria complexa (Zwirello et al., 2010).

3.1.5 Número de dispositivos

O sistema deve ser capaz de realizar a localização de múltiplos objetos. Neste projeto, serão realizados testes com dois transmissores (*beacons*), mas na prática o limite de número de transmissores simultâneos é maior.

3.1.6 Resistência às condições ambientais

Um ambiente industrial pode estar sujeito a condições de alta umidade, presença de gases e material particulado, que podem interferir com a operação do sistema ou degradar o equipamento com o passar do tempo. Assim, é desejável que um produto a ser comercializado seja resistente a essas condições. Entretanto, para os fins deste projeto, esse requisito não será considerado.

3.2 Arquitetura

A tecnologia selecionada para o desenvolvimento do sistema foi a localização baseada em tempo por rádio UWB, devido às características analisadas previamente na seção 2. Por não requerer a sincronização entre os *clocks* de todos os dispositivos, a técnica TDOA foi escolhida para implementação. Esse fato traz vantagens como um consumo de energia menor e a possibilidade de localização simultânea de um número maior de objetos, já que haverá menor probabilidade de colisão de mensagens. A sincronização entre os *nodes* é atingida pelo método da interpolação linear.

O sistema proposto é formado por quatro tipos principais de componentes com características distintas.

Os *beacons* são fixados aos objetos de localização e emitem sinais UWB para que suas posições sejam estimadas.

Os *nodes*, posicionados em locais fixos e de coordenadas conhecidas, detectam sinais UWB e efetuam as medições necessárias para localização dos *beacons*. Para a localização em espaço bidimensional utilizando a técnica TDOA, são necessários três nodes.

O sincronizador, também posicionado em local fixo e conhecido, emite os sinais UWB utilizados como base de tempo para a sincronização dos *nodes*.

A central de processamento recebe os dados obtidos pelos nodes e executa os algoritmos de sincronização e determinação da localização. A comunicação entre os *nodes* e a central é realizada via rede sem fio (Wi-Fi).

A Figura 6 apresenta um esquema dos componentes do sistema.

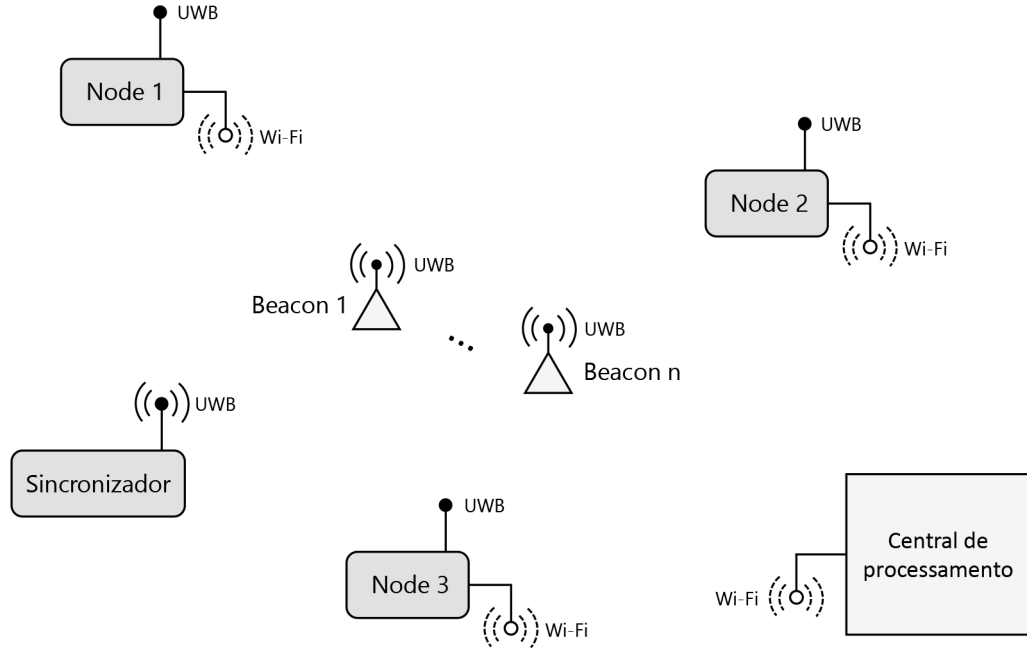


Figura 6: Esquema dos componentes do sistema

4 Desenvolvimento de *hardware*

4.1 Dispositivo *Beacon*

O *beacon* é um dispositivo cuja função é transmitir sinais que possibilitem sua localização, sem que haja a necessidade de processamento local de alta complexidade, como a aritmética de ponto flutuante. Os componentes essenciais para seu funcionamento são um microcontrolador, um módulo de rádio UWB e uma bateria de pequenas dimensões. A fim da obtenção de dados estimados de elevação do *beacon*, foi acrescentado ao projeto um sensor de pressão. Tendo em vista o requisito de baixo consumo de energia, foi adicionado também um sensor de movimento, cujos dados permitem adaptar a taxa de transmissão do sinal dependendo do estado – em repouso ou em movimentação – do objeto da localização. Um diagrama de blocos com os componentes do *beacon* encontra-se na Figura 7.

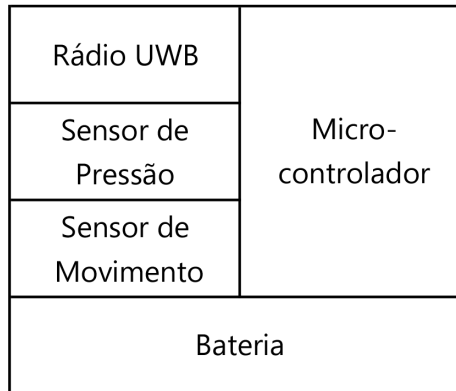


Figura 7: Diagrama de blocos de um *beacon*

Para atender aos requisitos dimensionais, optou-se por utilizar a Tecnologia de Montagem Superficial (SMT) no projeto das placas de circuito impresso. Essa tecnologia permite a montagem de componentes e a passagem de trilhas nas duas faces da placa, de forma a otimizar a utilização do espaço disponível.

Durante a seleção dos componentes, foram avaliadas diversas características: priorizou-se o baixo consumo de energia e as dimensões físicas reduzidas.

O microcontrolador coordena as transmissões do rádio UWB e realiza a leitura dos sensores de pressão e de movimento. Foi utilizado o PIC de 8-bits PIC16F1709, que possui 8kword de memória de programa e 1kbyte de RAM. Esse microcontrolador possui um oscilador interno de até 32 MHz e uma quantidade adequada de pinos de entrada e saída. É capaz de comunicação SPI e apresenta baixo consumo de energia (Microchip Technology, 2015).

O módulo UWB é responsável pela emissão do sinal de localização. O modelo selecionado foi o DWM1000, produzido pela DecaWave. Entre suas características, estão a precisão de localização de 10 cm, taxas de comunicação de até 6,8 Mb/s, alcance de até 300 m em LOS (*Line of Sight*) e capacidade de comunicação de alta densidade, com até 11000 dispositivos em um raio de 20 m (DecaWave, 2015).

O sensor de pressão realiza o fornecimento de dados de elevação do *beacon*. Uma aplicação possível é a distinção entre diferentes andares de um prédio. O modelo selecionado foi o BMP280, produzido pela Bosch, que possui uma acurácia relativa de ± 1 m (Bosch Sensortec, 2015).

O sensor de movimento permite a detecção de atividade do objeto da localização e a adaptação correspondente da taxa de envio do sinal. Por exemplo, caso o objeto encontre-se em repouso, a transmissão de pulsos pode ser interrompida ou ter o período aumentado. O modelo selecionado foi o LSM9DS1, produzido pela STMicroelectronics (STMicroelectronics, 2015). Esse circuito integrado agrega um acelerômetro, um giroscópio e um magnetômetro, podendo enviar um sinal de interrupção ao microcontrolador caso algum dos valores obtidos ultrapasse um limiar pré-estabelecido. Em uma

extensão deste projeto, as leituras desse sensor poderiam ser utilizadas para aprimorar a estimativa de posição.

4.2 Dispositivo *Node*

O *node* é um dispositivo capaz de detectar e interpretar os sinais provenientes do sincronizador e de múltiplos *beacons* e comunicá-los para uma central via rede sem fio. Assim, o processamento interno no node é feito por uma máquina Linux com dimensões extremamente reduzidas. Seus principais componentes são um processador ou microcontrolador, um módulo de rádio UWB e um módulo de rádio Wi-Fi, como representados na Figura 8. Como os *nodes* devem permanecer em posições fixas, os requisitos dimensionais são menos restritos, possibilitando a alimentação externa por um conjunto de baterias ou por um adaptador conectado à rede elétrica.

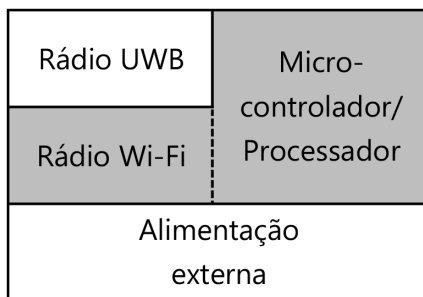


Figura 8: Diagrama de blocos de um *node*

Assim como no dispositivo *beacon*, utilizou-se a SMT no projeto das placas. Também foi utilizada a comunicação SPI entre o controlador e o periférico.

Um controlador embarcado é responsável pela coordenação e execução da lógica entre os demais componentes. Devido à complexidade das tarefas que deve executar em tempo real, é necessária uma maior capacidade computacional. O controlador selecionado foi a plataforma Intel® Edison, que consiste em um computador de pequenas dimensões (35,5 x 25,0 x 3,9 mm) que executa o sistema operacional Linux. O módulo é composto de diversos componentes, entre eles estão o processador Atom *dual-core* de 500 MHz, a memória RAM de 1 GB, a memória flash de 4 GB, o módulo Wi-Fi 802.11 a/b/g/n com antena embutida e o módulo Bluetooth 4.0 (Intel, 2015).

O rádio de rede sem fio (Wi-Fi) é utilizado para transmissão dos dados à central de processamento. O rádio Wi-Fi utilizado é o que se encontra dentro do módulo Intel® Edison.

O rádio UWB é responsável pela detecção dos sinais emitidos por diversos *beacons*. O modelo selecionado foi o mesmo utilizado no *beacon*, o DWM1000, produzido pela DecaWave (DecaWave, 2015).

4.3 Projeto do circuito e produção de *layouts*

Com base nas especificações dos componentes e na funcionalidade pretendida dos dispositivos *beacon* e *node*, as conexões necessárias foram identificadas e registradas nos diagramas esquemáticos. Foram acrescentados componentes secundários como conectores, capacitores de desacoplamento, teclas para *reset*, LEDs para indicação de funcionamento e transmissão ou recepção de sinais e conversores de nível de tensão lógica.

A partir dos diagramas esquemáticos, foram gerados os *layouts*, que consistem na definição de aspectos físicos das placas de circuito impresso, incluindo dimensões, furos, e a marcação das áreas onde ocorre a condução de sinais elétricos. Uma detalhe importante foi a remoção de cobre das áreas próximas às antenas, de acordo com as especificações dos *datasheets*, para evitar atenuação dos sinais.

A placa do *beacon* possui dimensões 68 x 45 mm, com cortes de 5 mm nos cantos para encaixe; tais dimensões são inferiores ao padrão adotado ID-1, descrito na seção 3.1.3. A placa do *node* possui dimensões 39 x 56 mm.

4.4 Fabricação de protótipos e validação de funcionamento

As placas dos protótipos foram fabricadas nos laboratórios da Escola Politécnica, montadas com os componentes necessários e validadas.

O funcionamento dos circuitos é validado pela verificação de integridade da comunicação no barramento SPI entre o módulo de rádio UWB e o controlador de cada placa. Essa verificação foi realizada pela leitura de registradores, como de identificação (ID), e pela escrita de registradores, tais como de configuração. As Figuras 9 e 10 mostram os dispositivos montados. Os testes foram realizados em ambas as placas e indicaram o funcionamento correto.

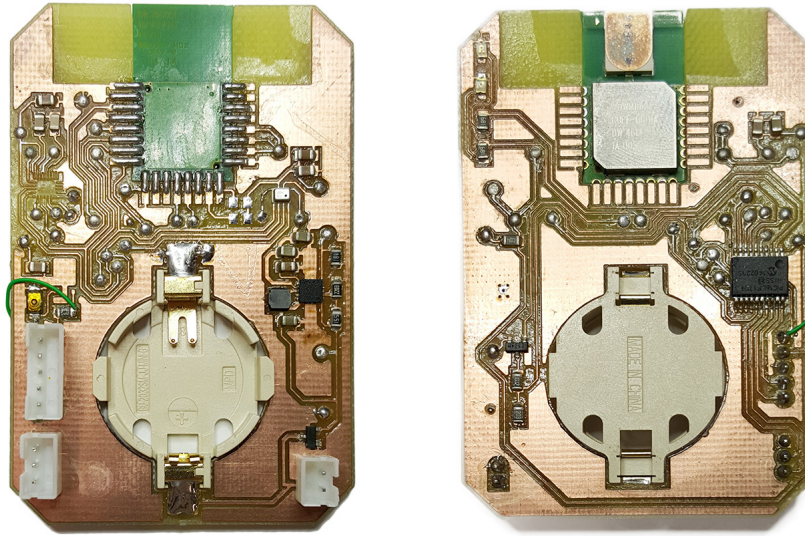


Figura 9: Vistas superior e inferior do dispositivo *beacon*

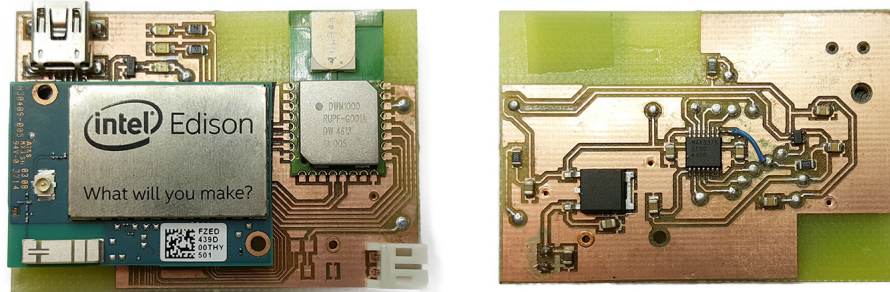


Figura 10: Vistas superior e inferior do dispositivo *node*

4.5 Dispositivo sincronizador

O sincronizador deve realizar a emissão constante de pulsos a intervalos definidos. Portanto, sua função pode ser exercida tanto por um *beacon* quanto por um *node*, já que ambos possuem os componentes necessários para realizar a transmissão de pulsos UWB.

4.6 Central de processamento

A função da central de processamento é coletar as informações obtidas por todos os nodes e executar os algoritmos de sincronização e estimativa da localização. Dada a maior complexidade de cálculo matemático necessária, a central utilizada foi um computador pessoal

de uso geral que possui capacidade para processar em tempo real os dados recebidos. Um requisito é a existência de uma conexão de rede para comunicação com os *nodes*.

5 Desenvolvimento de *software*

O *software* de todos os componentes do sistema foi desenvolvido na linguagem de programação C.

5.1 Dispositivo *beacon*

5.1.1 Especificação de funcionamento

Durante o processo de inicialização, o software do beacon deve realizar as configurações próprias do microcontrolador, como definição de *clock*, entradas, saídas e módulos. Então, deve ser realizada comunicação via SPI com o módulo de rádio UWB para, primeiramente, realizar sua configuração e, posteriormente, enviar uma sequência de pacotes a uma taxa pré-definida. Os pacotes devem seguir o padrão especificado na seção 5.1.2.

5.1.2 Formato dos pacotes enviados

Tabela 1: Formato dos pacotes enviados por UWB

<i>byte</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>campo</i>	<i>ID</i>	<i>dev</i>	<i>seq</i>		<i>data</i>				<i>CRC</i>	

Cada pacote UWB enviado pelo beacon contém uma sequência de bytes que pode ser lido pelos *nodes*. Foi definido que essa sequência deve conter 10 bytes, sendo esses divididos conforme a Tabela 1. A quantidade de bytes enviada deve ser a menor possível, já que um pacote muito longo demanda um tempo maior para transmissão, o que aumenta a probabilidade de colisão de pulsos. Os campos devem ser utilizados como descrito na sequência:

1. Identificador do dispositivo (*ID*, 1 byte): inteiro sem sinal, possibilita a identificação de até 256 *beacons*.
2. Tipo de dispositivo (*dev*, 1 byte): caracter 'b' da tabela ASCII (valor hexadecimal 0x62) para o *beacon*.
3. Número de sequência do pacote (*seq*, 2 bytes): inteiro sem sinal utilizado para identificação única de cada pacote enviado por um dispositivo específico. Deve ser inicialmente 0 e incrementado a cada pacote transmitido.
4. Dados (*data*, 4 bytes): pode conter dados diversos, tais como leituras de sensores.

5. Código de detecção de erro CRC (*CRC*, 2 bytes): calculado automaticamente pelo módulo de rádio.

5.1.3 Estrutura

O software foi estruturado em 3 camadas, uma próxima ao hardware, outra que agrega funcionalidades e uma da aplicação. Essa estrutura permite alterações no hardware sem a necessidade de alterações em camadas superiores do software.

Camada inferior Essa camada é responsável pela interação com o hardware do microcontrolador e realiza a comunicação SPI em baixo nível. Possibilita o envio e a recepção de bytes e vetores de bytes para os periféricos conectados ao barramento. Sua programação foi realizada com base no *datasheet* do microcontrolador.

Camada intermediária A camada intermediária contém funções específicas aos recursos dos periféricos, como inicialização, configuração e leitura de dados. No caso do módulo de rádio UWB, o fabricante fornece um exemplo de *driver* que executa funções compatíveis com essa camada (DecaWave, 2015). Esse *driver*, desenvolvido originalmente para um processador ARM, foi adaptado para a plataforma do microcontrolador PIC utilizado. Foram realizadas otimizações para reduzir o consumo de memória e torná-lo compatível com a arquitetura de 8-bits, além de conectá-lo à camada inferior para habilitar sua conexão com o módulo por SPI.

Camada superior A camada superior faz chamadas às funções da camada intermediária para executar algoritmos que seguem a especificação de funcionamento.

5.1.4 Sequência de operação

O programa não possui nenhuma entrada, portanto todas as configurações devem ser armazenadas na memória do microcontrolador. Assim, a sequência de operação é fixa e reproduzida sempre que ocorre um evento de *reset*, que pode ser iniciado pela tecla presente na placa ou pela remoção e reinserção da bateria.

1. Configuração do microcontrolador
 - (a) Seleção de *clock* interno e configuração para 16 MHz.
 - (b) Definição de entradas e saídas conforme o projeto de hardware.
 - (c) Inicialização e configuração do módulo SPI. Seleção do modo de operação e frequência de *clock*.
2. Inicialização e configuração do módulo de rádio UWB por SPI.

- (a) Configuração conforme a recomendação do datasheet para o caso de uso em sistemas TDOA, alcance curto e alta densidade de dispositivos.
- (b) Configuração dos LEDs conectados ao módulo para indicar recepção e transmissão de pacotes.

3. Envio de pacotes UWB

- (a) Um vetor contendo os dados do pacote conforme o formato definido na seção 5.1.2 é montado.
- (b) O pacote é enviado pelo módulo de rádio.
- (c) O número de sequência do pacote é incrementado.
- (d) O programa pausa durante um período fixo.
- (e) Retorna-se ao item 3(a)

5.2 Dispositivo sincronizador

O software do sincronizador é análogo ao do *beacon*. Uma diferença é o tipo de dispositivo (definido na especificação da seção 5.1.2), que deve ser alterado para o caracter 's' da tabela ASCII (valor hexadecimal 0x73). Outra alteração é o intervalo entre o envio de pacotes, que deve ser reduzido. No restante, a mesma estrutura e sequência de operação do *beacon* podem ser utilizados no sincronizador.

5.3 Dispositivo *node*

5.3.1 Especificação de funcionamento

Inicialmente, o *software* do node deve realizar a inicialização do módulo SPI. Então, deve ser realizada comunicação com o módulo de rádio UWB para realizar sua configuração. Posteriormente, o módulo de rádio UWB deve ser mantido em modo de recepção e a central de processamento deve ser informada da recepção de cada pacote e seu conteúdo, assim como o instante exato de sua recepção, medido pelo contador de *clock* do rádio UWB. Os pacotes recebidos podem ser provenientes de *beacons* ou do sincronizador.

5.3.2 Formato dos pacotes de dados enviados à central de processamento

Tabela 2: Formato dos pacotes de dados enviados à central

<i>byte</i>	1	2	3	4	5-9	10-11	12-13	14-17	18
<i>campo</i>	:	<i>node ID</i>	<i>dev</i>	<i>dev ID</i>	<i>timestamp</i>	<i>seq</i>	<i>last sync</i>	<i>data</i>	;

A conexão entre o node e a central de processamento é estabelecida por um *socket* TCP/IP. Definiu-se que cada pacote de dados enviado por esse *socket* é composto por 18 bytes, sendo esses divididos conforme a Tabela 2. Os campos devem ser preenchidos como descrito na sequência:

1. Start byte (:, 1 byte): caracter ':' da tabela ASCII (valor hexadecimal 0x3A). Indica o início de um pacote de dados.
2. Identificador do *node* (*node ID*, 1 byte): inteiro sem sinal, possibilita a identificação de até 256 *nodes*.
3. Tipo de dispositivo (*dev*, 1 byte): caracter 'b' (valor hexadecimal 0x62) para o pulso de um *beacon* e caracter 's' (valor hexadecimal 0x73) para pulso do sincronizador.
4. Identificador do dispositivo (*dev ID*, 1 byte): inteiro sem sinal, possibilita a identificação de até 256 *beacons* e 256 sincronizadores.
5. Instante de recepção (*timestamp*, 5 byte): inteiro sem sinal representado do byte mais significativo para o menos significativo. Indica o instante de recepção na referência de tempo do *node*.
6. Número de sequência do pacote (*seq*, 2 bytes): inteiro sem sinal utilizado para identificação única de cada pacote enviado por um dispositivo específico. Deve ser inicialmente 0 e incrementado a cada pacote transmitido.
7. Número de sequência do último pulso de sincronização recebido (*last sync*, 2 bytes): inteiro sem sinal utilizado para informar à central o número de sequência do último pulso de sincronização recebido antes da recepção do pulso do beacon, a fim de realizar os cálculos de sincronização e estimativa de posição.
8. Dados (*data*, 4 bytes): pode conter dados diversos, tais como leituras de sensores.
9. Start byte (;, 1 byte): caracter ';' (valor hexadecimal 0x3B). Indica o fim de um pacote de dados.

5.3.3 Estrutura

Assim como no caso do *beacon*, o *software* foi estruturado em 3 camadas.

Camada inferior A camada inferior é responsável pela interação com o *hardware* do controlador e realiza a comunicação SPI em baixo nível. Possibilita o envio e a recepção de bytes e vetores de bytes para os periféricos conectados ao barramento. Para desempenho dessa função, foi utilizada a biblioteca MRAA desenvolvida pela Intel® para a placa Edison com esse propósito (Intel IOT, 2015).

Camada intermediária A camada intermediária contém funções específicas do módulo de rádio UWB, como inicialização, configuração e envio e recepção de pacotes. Assim como no caso do *beacon*, para o módulo de rádio UWB foi utilizada uma adaptação do *driver* disponibilizado pela DecaWave (DecaWave, 2015). Como o *node* possui maior capacidade computacional, foram necessárias alterações no *driver* somente para compatibilizá-lo com o compilador utilizado e conectá-lo com as bibliotecas da camada inferior.

Camada superior A camada superior faz chamadas a funções da camada intermediária e do sistema operacional para executar algoritmos que seguem a especificação de funcionamento. Ela é dividida em três componentes: o programa principal, o gerenciador de dados e o gerenciador de conexão. O programa principal é responsável por inicializar os demais componentes, configurar o módulo UWB e colocá-lo em modo de recepção. O gerenciador de dados realiza processamento e validação dos pacotes UWB e montagem dos pacotes direcionados à central. O gerenciador de conexão estabelece a comunicação entre o *node* e a central através de *sockets* TCP/IP e contém funções de envio e recepção de dados pela rede.

5.3.4 Sequência de operação

1. Leitura dos parâmetros do programa, obtidos na linha de execução. São armazenados o ID do node e o endereço IP da central de processamento.
2. Estabelecimento do *socket* de conexão com a central de processamento pelo gerenciador de conexão.
3. Inicialização do módulo SPI da placa Intel® Edison.
4. Inicialização e configuração do módulo de rádio UWB por SPI.
 - (a) Inicialização do micro-código do módulo que realiza a estimativa precisa do instante de recepção de pacotes.
 - (b) Configuração conforme a recomendação do datasheet para o caso de uso em sistemas TDOA, alcance curto e alta densidade de dispositivos.
 - (c) Configuração da interrupção realizada quando um pacote UWB é recebido.
 - (d) Configuração dos LEDs conectados ao módulo para indicar recepção e transmissão de pacotes.
5. Inicialização do modo de recepção do módulo de rádio UWB.
6. Programa principal colocado em espera indefinidamente.
7. Detecção de uma interrupção proveniente do módulo UWB.

- (a) Verificação do CRC.
- (b) Leitura do instante de recepção conforme calculado pelo módulo UWB. A unidade de tempo é baseada na frequência de 63,8976 GHz, sendo que o contador de tempo retorna a zero a cada 17,2074 s.
- (c) Leitura, processamento e verificação dos dados recebidos pelo gerenciador de dados, conforme a especificação da seção 5.1.2.
- (d) Montagem do pacote de dados a ser enviado pelo socket estabelecido com a central, conforme a especificação da seção 5.3.2.
- (e) Envio pelo gerenciador de conexão do pacote montado com os dados recebidos por UWB.

5.4 Central de processamento

5.4.1 Especificação de funcionamento

A central de processamento recebe os dados coletados por todos os *nodes* do sistema. Os instantes em que pacotes de *beacons* e de sincronização são recebidos nos *nodes* são utilizados para estimar os valores de diferença de tempo de chegada, através da implementação das equações (24) e (25). Os valores resultantes são então utilizados para estimar a posição dos beacons em espaço bidimensional, através do método de Chan, apresentado na seção 2.1.2. O programa deve ser capaz de estimar a posição de múltiplos *beacons* e lidar com a recepção simultânea e com o possível atraso na recepção de pacotes de dados enviados pelos *nodes*, assim como o caso em que pacotes UWB são perdidos.

5.4.2 Estrutura

O programa foi estruturado em módulos com funções distintas:

Gerenciador do servidor O gerenciador do servidor cria um *socket* que aceita conexões dos *nodes* e gera uma *thread* que recebe os dados de cada nova conexão aceita. Os pacotes recebidos são encaminhados ao gerenciador de pacotes.

Gerenciador de pacotes O gerenciador de pacotes processa os dados recebidos de acordo com a especificação da seção 5.3.2. Caso não haja erros de verificação, os valores obtidos são encaminhados ao estimador de posição.

Estimador de posição O estimador de posição controla o estado do sistema de localização. São mantidos dois *buffers*: um para os pulsos de sincronização e um para os pulsos dos *beacons*. Dados são acrescentados nos *buffers* quando recebidos do gerenciador de

pacotes e removidos quando processados. As informações são processadas para realizar a sincronização e a estimativa de posição.

Programa principal O programa principal inicializa o estimador de posição e inicia a execução do servidor.

5.4.3 Sequência de operação

1. Inicialização dos *buffers* do estimador de posição e início da execução do servidor.
2. Gerenciador do servidor aguarda a conexão dos *nodes*.
3. Criação de uma *thread* para cada conexão estabelecida com um *node*.
4. Recepção de um pacote.
 - (a) Processamento pelo gerenciador de pacotes.
 - (b) Envio dos dados processados ao estimador de posição.
5. Inclusão de nova entrada no *buffer* de pulsos de sincronização ou no *buffer* de pulsos de *beacons*, dependendo do processamento do pacote.
 - (a) Caso o *buffer* de pulsos de sincronização esteja cheio, a entrada mais antiga é sobrescrita.
 - (b) Caso o *buffer* de pulsos de *beacons* esteja cheio, o novo pulso é descartado.
6. Processamento dos *buffers*.
 - (a) Busca de pulsos de *beacons* prontos para ser processados, o que se verifica pelas seguintes condições:
 - i. Pulso do *beacon* recebido por todos os *nodes*
 - ii. Pulso de sincronização imediatamente anterior ao pulso do *beacon* recebido por todos os *nodes*
 - A. Caso esse pulso de sincronização tenha sido sobrescrito, o pulso do *beacon* é descartado do *buffer*.
 - iii. Pulso de sincronização imediatamente posterior ao pulso do *beacon* recebido por todos os *nodes*
 - (b) Obtenção dos valores de diferença de tempo de chegada (TDOA) pelas equações (24) e (25).
 - (c) Cálculo da estimativa de posição pelo método de Chan (seção 2.1.2) e impressão na tela.

- (d) Pulso do *beacon* processado é removido do *buffer*.
7. Aguarda-se a recepção de um novo pacote e repete-se a sequência a partir do item (4).

6 Testes para avaliação de desempenho

Os testes efetuados buscaram avaliar o desempenho do sistema principalmente em função dos graus de precisão e acurácia obtidos.

6.1 Procedimento experimental

Os ensaios foram realizados em um laboratório de área retangular com dimensões 6 x 10 m. Adotou-se um dos cantos do ambiente como a origem dos eixos coordenados, sendo que os eixos x e y estão contidos em um plano paralelo ao piso. Os *nodes* foram posicionados nas paredes a uma altura de 1,5 m do chão, nas posições indicadas pela Tabela 3.

Tabela 3: Posições dos nodes nos experimentos

<i>Node</i>	x (mm)	y (mm)
1	0	3000
2	6240	0
3	6240	5880

Na implementação do sincronizador, configurou-se um intervalo entre as transmissões de 150 ms que, conforme o estudo de McElroy et al. (2014), é suficiente para obtenção da precisão desejada neste projeto. O sincronizador foi posicionado também em uma parede a 1,5 m do chão, nas coordenadas $x = 3965$ mm e $y = 0$.

Os testes foram realizados com um *beacon* posicionado sobre um tripé à altura aproximada de 1,5 m do chão. Configurou-se um intervalo de 1 s entre a emissão de pulsos pelos *beacons*. Para cada posição do *beacon*, foram tomadas ao menos 30 medidas.

A velocidade de propagação do sinal UWB foi considerada igual à velocidade da luz no vácuo $c = 299.792.458$ m/s para configuração do *software* da central de processamento.

6.2 Comportamento da estimativa de posição ao longo do tempo

6.2.1 Experimento

Com o beacon nas coordenadas $x = 4866, y = 2918$ mm, foram realizadas 54 medições de diferença de tempo de chegada, e para cada uma delas foram calculadas estimativas de posição em x e y . A Figura 11 apresenta as estimativas obtidas para as medições. Os

valores médios das estimativas foram $\bar{x} = 5136, \bar{y} = 2715$ mm e os desvios-padrão foram $\sigma_x = 139, \sigma_y = 171$ mm.

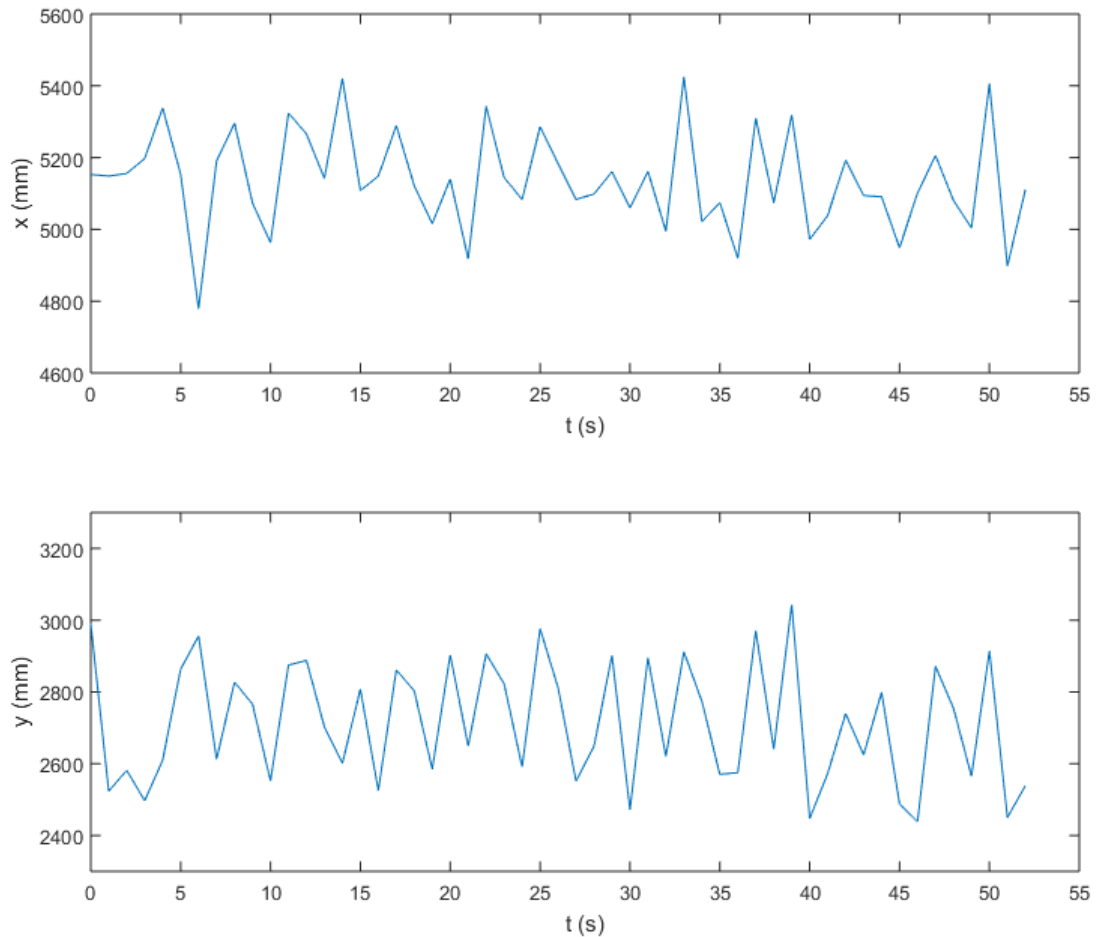


Figura 11: Estimativa de posição ao longo do tempo

6.2.2 Análise

Nota-se graficamente que a estimativa de posição varia em torno de um valor médio de forma estável. Isso indica que a utilização de um filtro nas estimativas pode melhorar consideravelmente os resultados. Aplicando um filtro de médias móveis não ponderadas com janela de quatro medidas, os desvios-padrão foram reduzidos para $\sigma_x = 50, \sigma_y = 64$ mm. Uma comparação entre as estimativas originais e as filtradas encontra-se na Figura 12, onde a linha contínua representa os valores após o filtro.

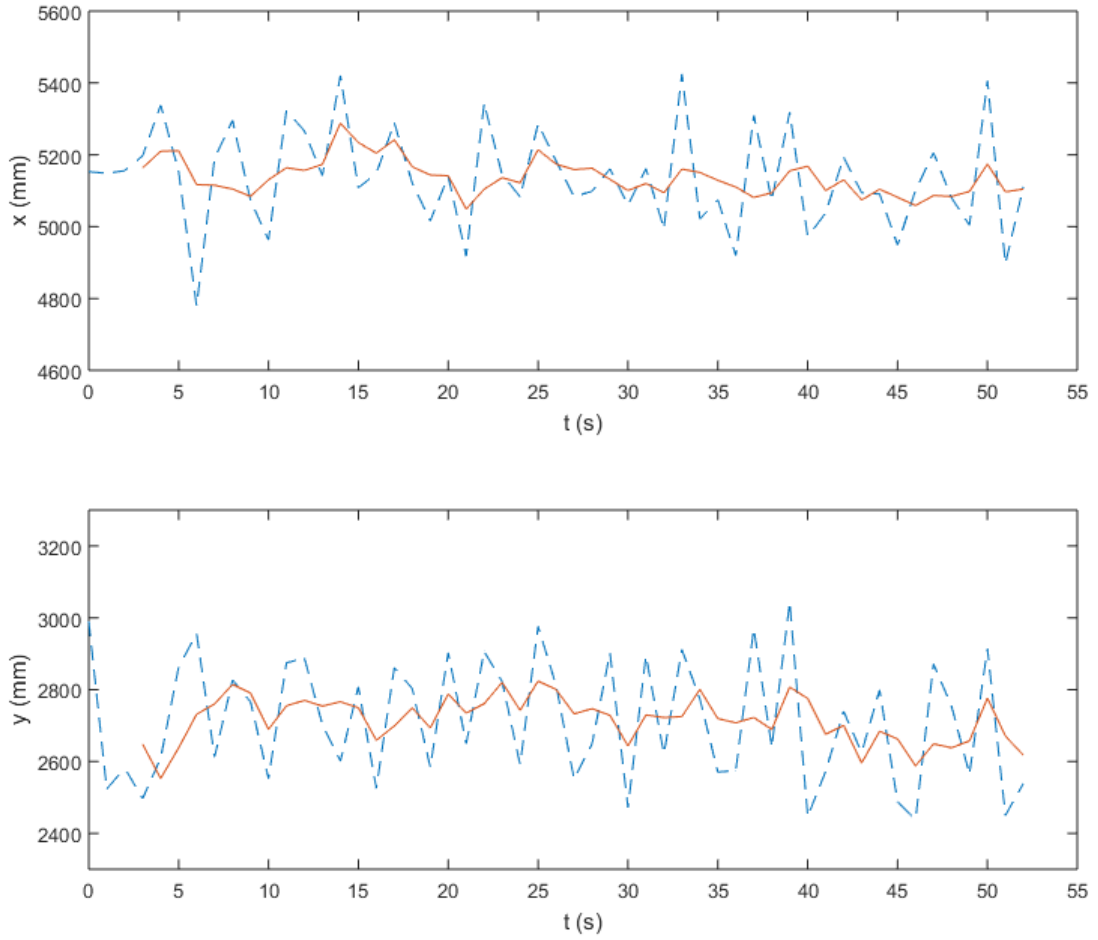


Figura 12: Estimativa de posição ao longo do tempo antes e após aplicação de filtro de médias móveis

A implementação deste filtro pode ser realizada em tempo real e reduz o desvio dos resultados obtidos, porém a resposta do sistema a variações de posição do *beacon* será mais lenta.

Convém mencionar que o erro entre a posição real e a posição estimada, calculado pela distância entre o ponto médio estimado e o ponto real, é de 336 mm. Esse valor não é reduzido com a aplicação do filtro, mas, para esse ponto, encontra-se dentro dos requisitos definidos para o projeto, de até 600 mm.

6.3 Estimativa de posição para múltiplos pontos experimentais

6.3.1 Experimento

Este experimento foi proposto para os fins da realização de um estudo da variação do erro entre as estimativas médias e as posições reais em diferentes pontos do ambiente

O procedimento de cálculo de valores médios das estimativas e desvios-padrão foi

realizado para 24 pontos experimentais. Os resultados são apresentados graficamente na Figura 13, que contém uma representação do espaço bidimensional no qual o experimento foi realizado. Os quadrados preenchidos indicam a posição dos *nodes*. O quadrado não preenchido indica a posição do sincronizador. Os triângulos representam as posições reais dos *beacons*. Os pontos com as barras de erros indicam as posições estimadas, sendo que as dimensões das barras equivalem ao desvio-padrão nas direções x e y . O erro entre as estimativas e as posições reais, calculado pela distância entre as duas, é representado pelas linhas pontilhadas.

O erro mínimo foi 141 mm, o erro máximo foi 631 mm e o erro médio foi 378 mm.

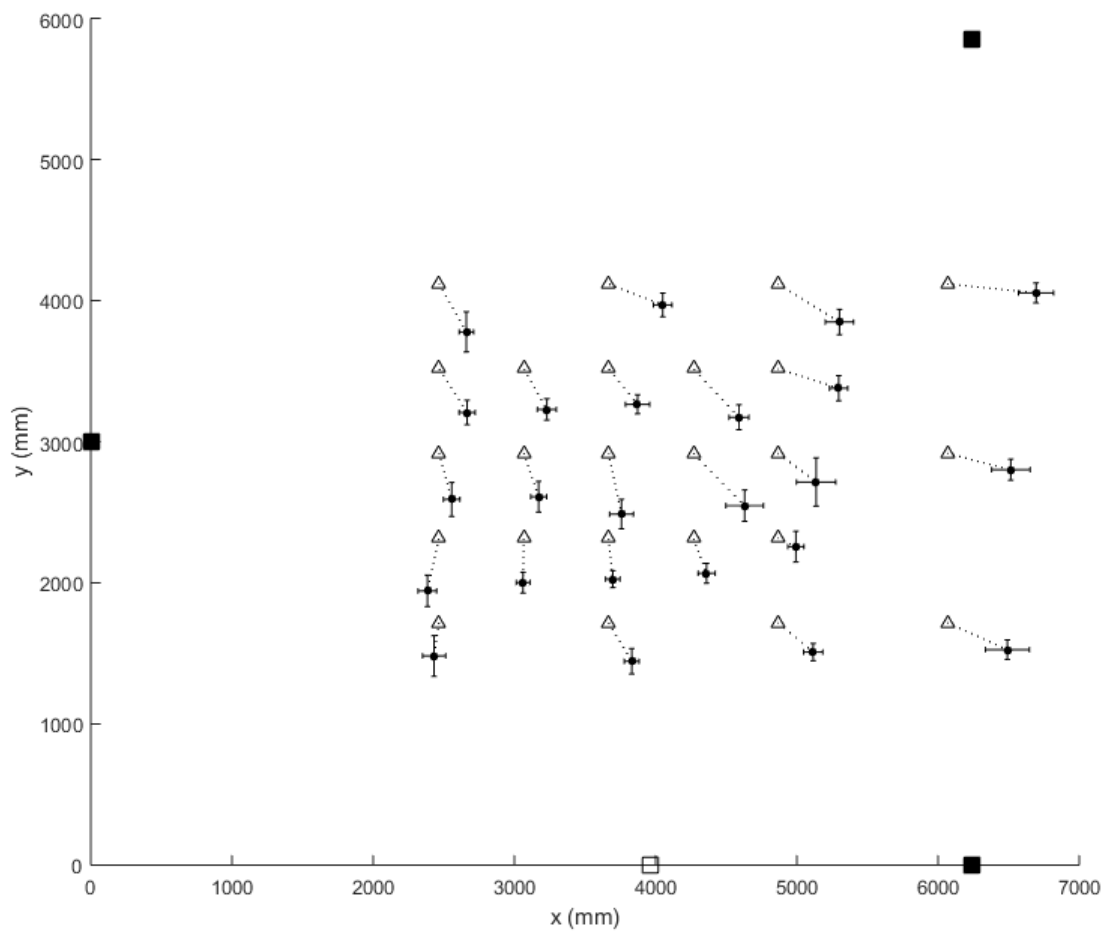


Figura 13: Estimativa de posição em múltiplos pontos

6.3.2 Análise

O erro médio encontra-se dentro do esperado, inferior a 600 mm. Ao analisar a Figura 13, percebe-se claramente uma tendência da direção do erro para o canto inferior direito, o que aponta para o fato de que há uma fonte de erro sistemática com potencial para

compensação.

Para o cálculo das diferenças de tempo de chegada (TDOA), é necessário realizar utilizar uma estimativa do tempo de propagação de pulsos entre o sincronizador e os *nodes*. Caso essa estimativa, calculada com base na geometria do posicionamento dos dispositivos, seja diferente do valor real, é possível que essa tendência ocorra. Algumas possíveis causas desse fenômeno são erros experimentais de posicionamento e aferição de posições ou fatores como reflexões das ondas eletromagnéticas.

Em termos matemáticos, o efeito disso é a soma ou subtração de valores constantes aos valores de TDOA.

Uma forma de avaliar esse fator e compará-lo ao observado na Figura 13 é realizando simulações da soma de diferentes valores aos TDOAs e calculando as estimativas de posição resultantes. Para que isso seja realizado, inicialmente deve-se calcular valores teóricos de TDOA0 (entre nodes 2 e 1) e TDOA1 (entre nodes 3 e 1) para as condições do experimento em múltiplos pontos. Então, esses valores teóricos devem ser acrescidos de uma constante e utilizados para o cálculo de novas estimativas de posição. O acúmulo das estimativas para várias constantes diferentes descreve a curva que se deseja observar.

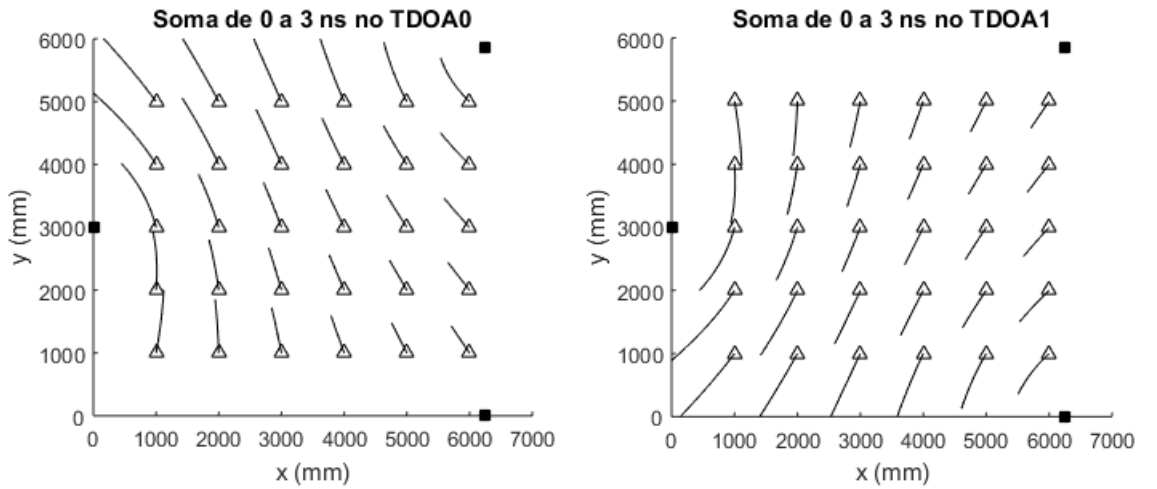


Figura 14: Simulação do efeito da soma de valores aos TDOAs

O resultado desse procedimento encontra-se na Figura 14. Os triângulos representam as posições estimadas para os valores de TDOA teóricos e as curvas que deixam essas posições representam o efeito da soma de diferentes constantes (de 0 a 3 ns). Nota-se que a soma de constantes no TDOA0 é similar a um efeito inverso ao que ocorre na Figura 13, indicando que a fonte dos desvios ocorridos seja de fato um erro no cálculo do tempo de propagação dos pulsos do sincronizador. Assim sendo, tais desvios podem ser facilmente compensados através da soma de constantes nos valores de TDOA.

Uma estimativa dessas constantes de calibração do sistema pode ser obtida ao encontrar os valores que somados aos TDOAs minimizam o erro médio. Para o caso desse

ensaio, os valores de calibração foram encontrados empiricamente e resultaram na soma de 1,75 ns ao TDOA0 e na soma de 0,55 ns ao TDOA1. Os resultados encontram-se na Figura 15.

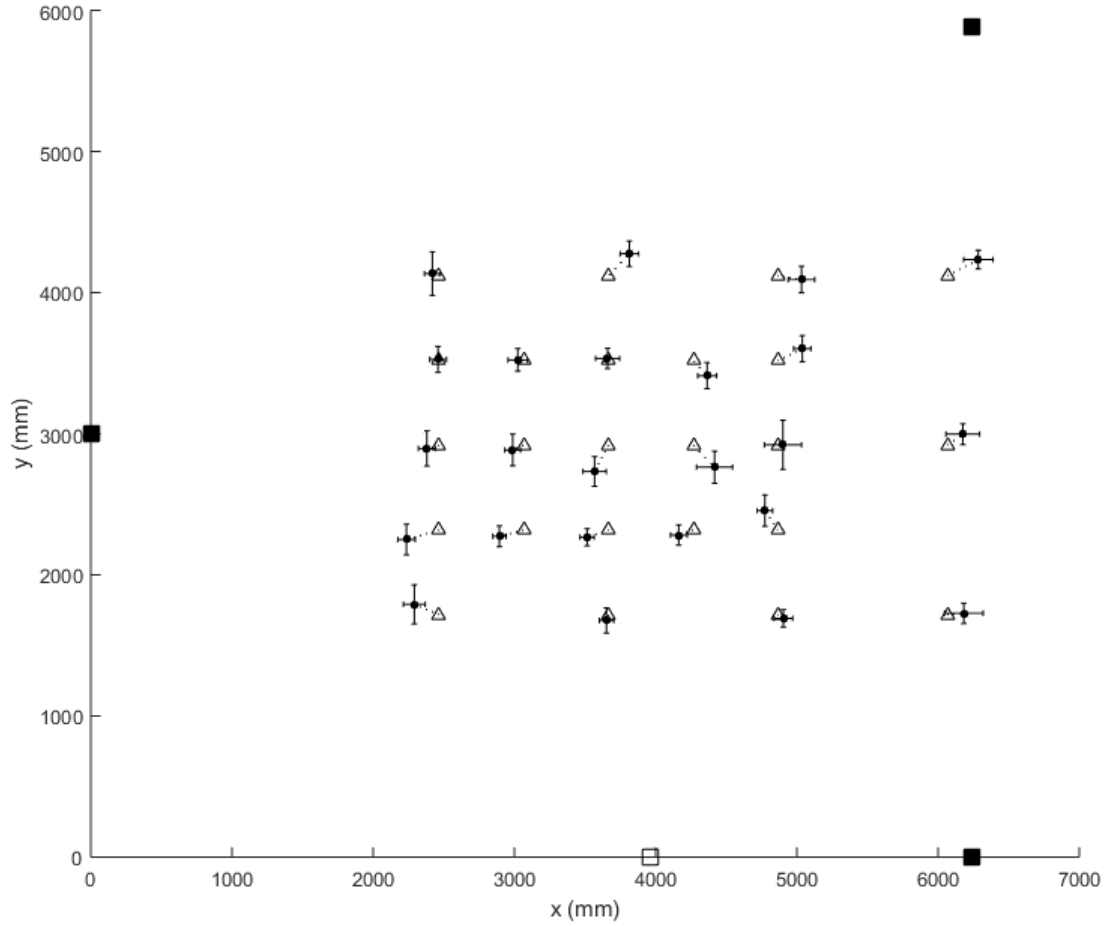


Figura 15: Estimativa de posição em múltiplos pontos após calibração

O erro mínimo passou de 141 a 11 mm, o erro máximo passou de 631 a 248 mm e o erro médio foi reduzido de 378 a 130 mm, estando todos dentro do requisito de 600 mm. Conclui-se que a realização desse procedimento de calibração pode reduzir significativamente o erro médio das estimativas de posição do sistema.

6.4 Realização de experimentos com um segundo *beacon*

6.4.1 Experimento

O mesmo procedimento descrito na seção 6.3.1 foi executado com outro *beacon*, utilizando o resultado da calibração anterior. O resultado encontra-se na Figura 16.

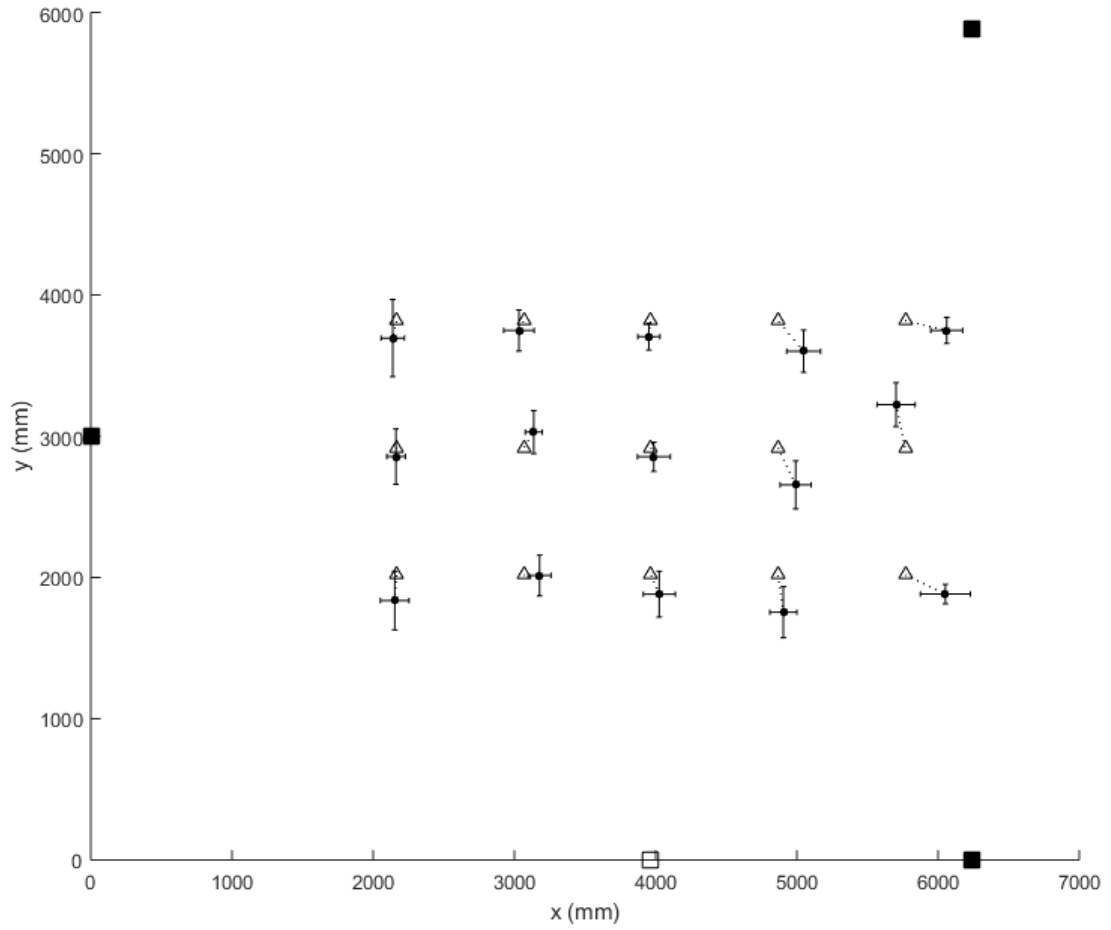


Figura 16: Estimativa de posição em múltiplos pontos com outro *beacon* e calibrada

O erro mínimo foi 62 mm, o erro máximo foi 316 mm e o erro médio foi 186 mm.

6.4.2 Análise

Os valores de erro obtidos foram maiores que os anteriores, porém ainda satisfazem os requisitos do projeto. Um fator que pode ter contribuído para essa diferença é a realização do experimento em outra situação, na qual a variação da temperatura ambiente pode ter alterado sensivelmente a frequência de *clock* dos dispositivos do sistema (McElroy et al., 2014) e modificado as constantes de calibração necessárias devido a diferenças de referência de tempo.

6.5 Presença de obstáculo ao sinal

6.5.1 Experimento

Com o beacon nas coordenadas $x = 3966, y = 2918$ mm, foram realizadas 35 medições de diferença de tempo de chegada, e para cada uma delas foram calculadas estimativas de posição em x e y . A Figura 17 apresenta as estimativas obtidas para as medições, onde a linha tracejada encontra-se sobre o valor médio de cada coordenada. Os valores médios das estimativas foram $\bar{x} = 3993, \bar{y} = 2834$ mm e os desvios-padrão foram $\sigma_x = 92, \sigma_y = 155$ mm.

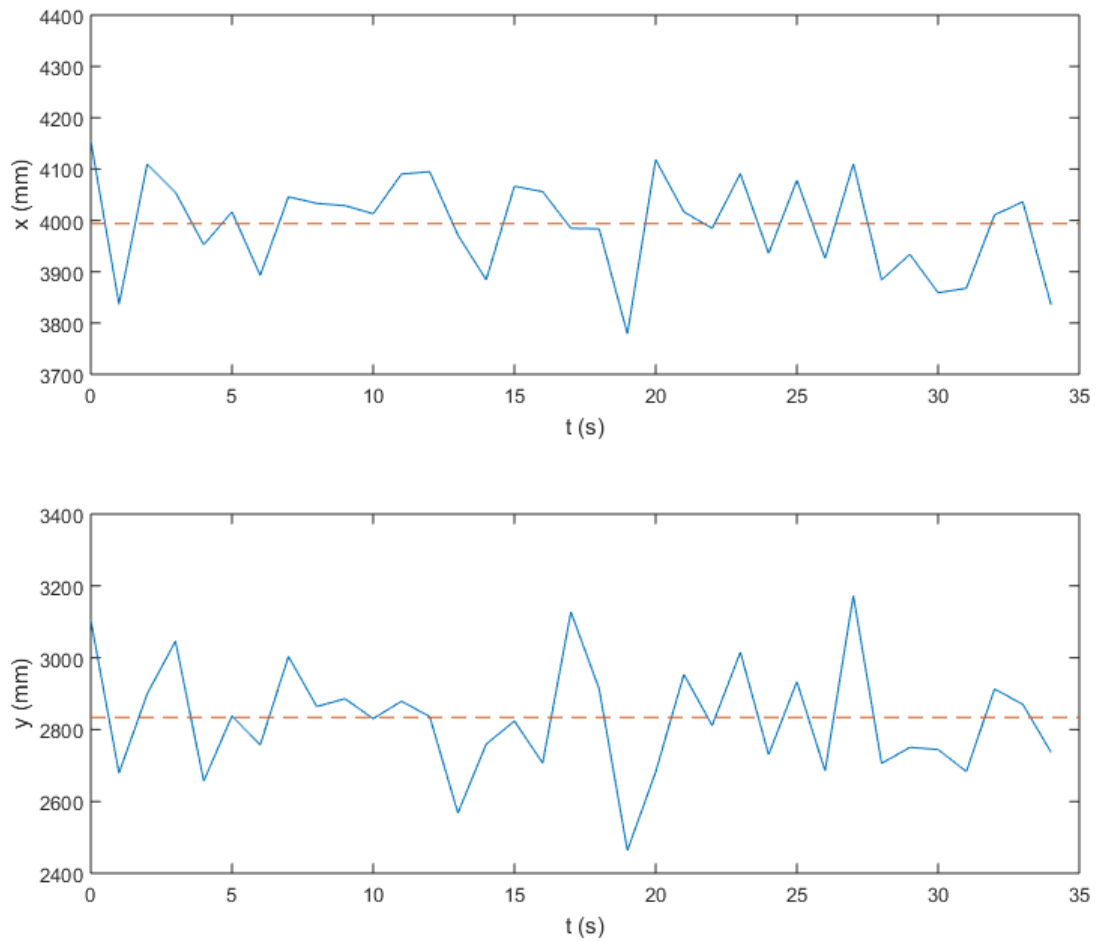


Figura 17: Estimativa de posição ao longo do tempo sem obstáculos ao sinal

Ao realizar o experimento com o *beacon* nas mesmas coordenadas, porém com uma pessoa nas coordenadas $x = 4566, y = 2918$ mm possivelmente atenuando o sinal do beacon, foram obtidos os resultados da Figura 18. Os valores médios das estimativas foram $\bar{x} = 3958, \bar{y} = 2769$ mm e os desvios-padrão foram $\sigma_x = 110, \sigma_y = 163$ mm.

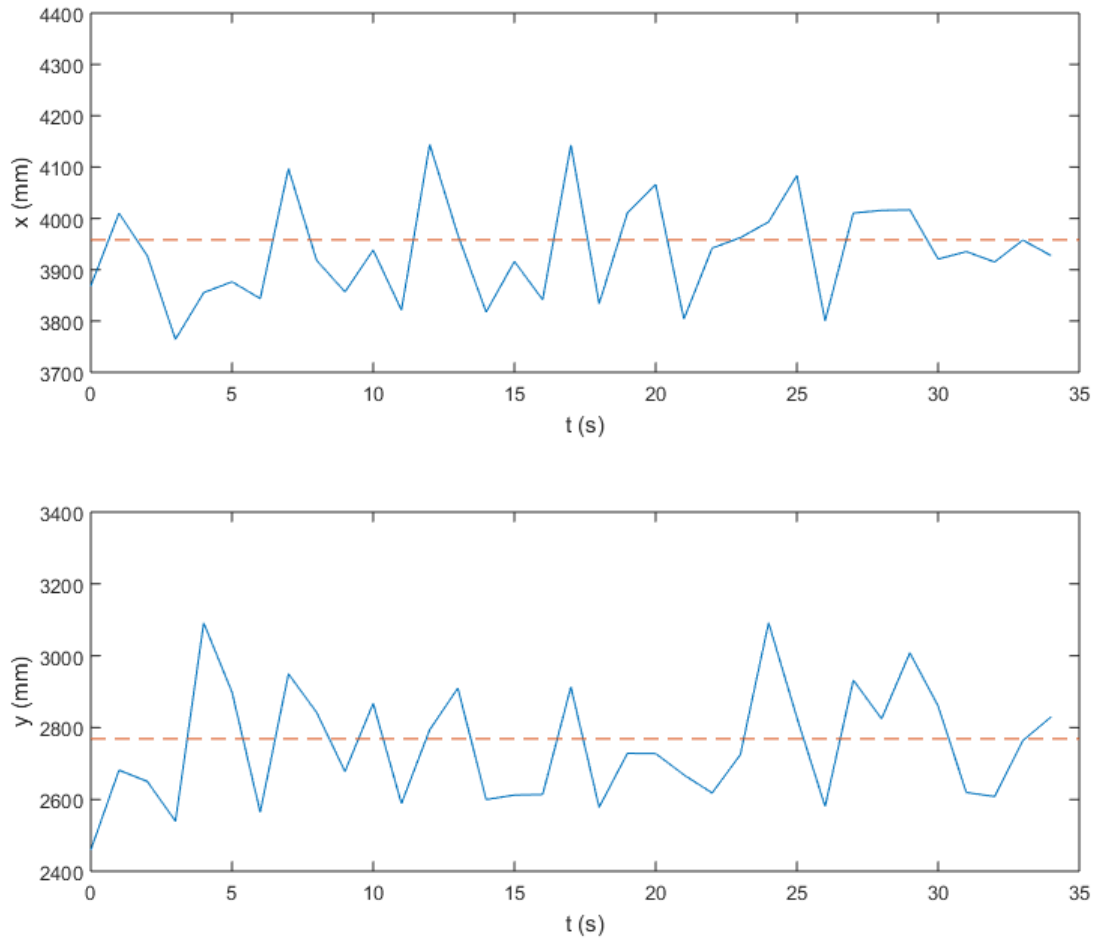


Figura 18: Estimativa de posição ao longo do tempo com um obstáculo em $x = 4566$, $y = 2918$

Repetindo novamente o experimento, porém com a pessoa tendo se deslocado para $x = 3066$, $y = 2918$ mm, foram obtidos os resultados da Figura 19. Os valores médios das estimativas foram $\bar{x} = 4062$, $\bar{y} = 2998$ mm e os desvios-padrão foram $\sigma_x = 88$, $\sigma_y = 145$ mm.

Tabela 4: Comparação entre os ensaios sem e com obstáculo ao sinal (valores em mm)

Ensaio	x_o	y_o	$\bar{x}$	$\bar{y}$	σ_x	σ_y	e
1	-	-	3993	2834	92	155	88
2	4566	2918	3958	2769	110	163	149
3	3066	2918	4062	2998	88	145	125

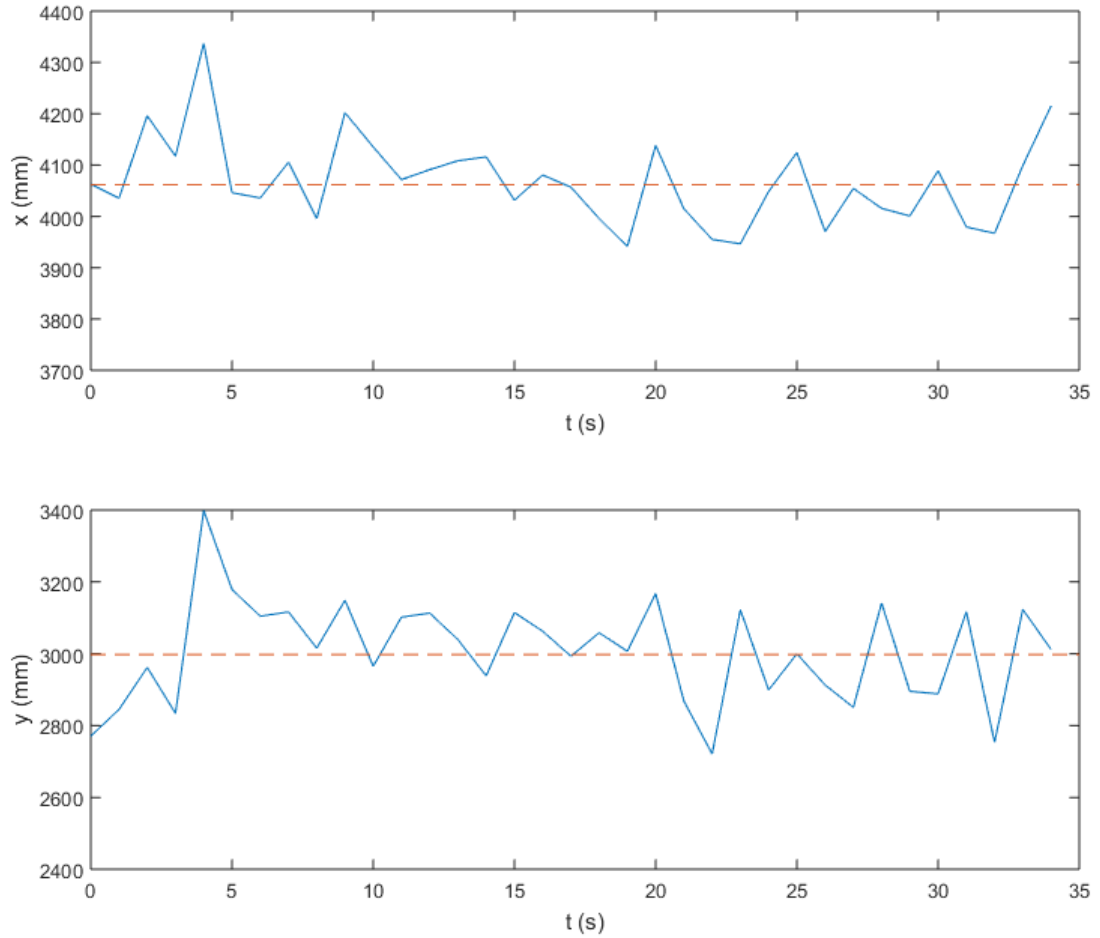


Figura 19: Estimativa de posição ao longo do tempo com um obstáculo em $x = 3066, y = 2918$

6.5.2 Análise

A Tabela 4 reúne os dados obtidos nos experimentos, onde x_o, y_o indicam as coordenadas do obstáculo quando presente e e indica o erro médio da estimativa.

No ensaio 2, o obstáculo se encontrava a 600 mm do *beacon* e o resultado foi um aumento dos desvios-padrão e do erro de posicionamento em relação ao ensaio 1. Já no ensaio 3, o obstáculo se encontrava a 900 mm do *beacon* e o resultado foi uma redução dos desvios-padrão e um aumento do erro em relação à situação 1, porém menor que o

aumento do erro no ensaio 2.

Esses resultados indicam que a presença de obstáculo ao sinal pode interferir nas estimativas de posição, provavelmente por atenuar e atrasar a propagação das ondas eletromagnéticas. Entretanto, os requisitos de precisão do projeto ainda são seguidos.

6.6 Localização simultânea de dois *beacons*

6.6.1 Experimento

Para avaliar a capacidade de localização de múltiplos *beacons*, foi realizado um experimento com dois *beacons* transmitindo pulsos simultaneamente. Os resultados encontram-se na Tabela 5, onde n é o número de medições obtidas, x, y são as coordenadas reais dos beacons, $\bar{x}, \bar{y}$ são as estimativas médias de posição, σ_x, σ_y são os desvios-padrão dos testes e e é o erro médio da estimativa de posicionamento.

Tabela 5: Experimento realizado com a localização simultânea de dois *beacons* (valores em mm)

Beacon	n	x	y	$\bar{x}$	$\bar{y}$	σ_x	σ_y	e
1	42	3966	2918	3999	2852	106	205	73
2	35	4866	2618	4775	2613	132	178	91

6.6.2 Análise

Nota-se que, provavelmente devido a colisões ou interferências, o número de estimativas realizadas não foi igual para os dois *beacons*, apesar da duração do teste e dos intervalos de envio de pulsos ser o mesmo. Entretanto, os resultados obtidos estão compatíveis com os obtidos anteriormente e demonstram a capacidade do sistema de localizar de múltiplos beacons.

6.7 Simulação de erros devido a desvios na altura do *beacon*

6.7.1 Simulação

Os experimentos anteriores foram realizados no plano $z = 1,5$ m, já que os modelos utilizados consideram um problema de localização em duas dimensões. Entretanto, em um contexto de aplicação prática, é possível que ocorra um desvio na altura do beacon em relação ao restante dos dispositivos. Assim, é importante que a relação entre um desvio de altura e um possível erro na estimativa de posicionamento seja caracterizada. Para isso será adotado um procedimento semelhante ao realizado na seção 6.3.2. Valores teóricos de TDOA serão calculados para diferentes variações de altura em relação ao plano bidimensional modelado. Os resultados encontram-se na Figura 20. Os triângulos

representam a posição real do beacon e as linhas representam uma variação da estimativa em função de uma variação positiva ou negativa de altura com a magnitude indicada.

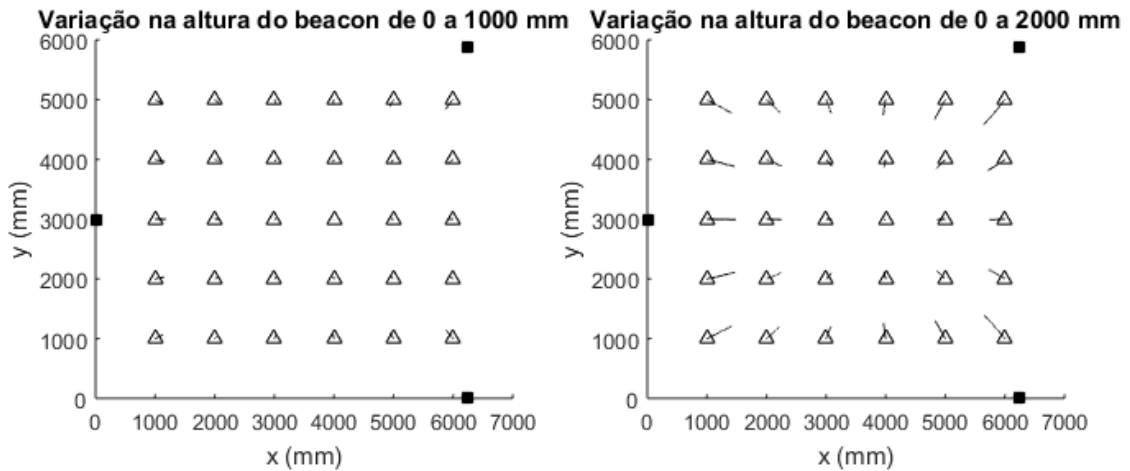


Figura 20: Simulação do efeito de variações de altura dos beacons

6.7.2 Análise

Observa-se que até 1 metro de diferença, os erros são pouco significativos – o maior erro observado com diferença de 1000 mm é de 200 mm, que mesmo considerando os outros erros de estimativa, ainda se encontra dentro dos requisitos do projeto. Entretanto, para uma variação de altura de 2 m, o maior erro observado é de 550 mm, que somado aos demais desvios das estimativas certamente ultrapassaria os limites estabelecidos.

7 Conclusões

Após o estudo das tecnologias disponíveis, selecionou-se a localização por rádio *Ultrawide-band* (UWB) baseada em tempo de propagação devido às características bastante favoráveis à execução do projeto. Foram analisadas duas técnicas que podem ser implementadas junto ao UWB para estimativa da posição: *time of flight* (TOF) ou *time difference of arrival* (TDOA), sendo que o TDOA foi escolhido por permitir menor consumo de energia.

A arquitetura do sistema foi definida, sendo composta pelos seguinte componentes: *beacons*, que realizam transmissão de sinais UWB e são alvo da localização; *nodes*, que permanecem em posições fixas conhecidas e recebem pacotes UWB; sincronizador, que envia pulsos para sincronizar os *clocks* dos *nodes*; e a central de processamento, que recebe as informações coletadas pelos nodes e executa os algoritmos necessários para estimar posições.

Para o projeto de *hardware*, foram avaliados e selecionados os componentes dos dispositivos *beacon* e *node*. Protótipos desses dispositivos foram produzidos e testados.

O projeto do *software* de cada um dos componentes do sistema foi especificado e detalhado. Os programas foram então desenvolvidos, implementados e suas funções básicas foram verificadas. Os métodos matemáticos principais utilizados foram a sincronização de *clocks* dos nodes por interpolação linear e a estimativa de posição por TDOA pelo método de Chan; Ho (1994).

Um procedimento experimental foi definido para a execução dos testes de desempenho do sistema. Os primeiros experimentos indicaram a necessidade de calibração do sistema, que possibilitou erros médios de posicionamento na ordem de 130 mm. O desvio-padrão das estimativas de posição foi inferior a 200 mm, com potencial para redução com a aplicação de filtros nos dados.

Assim, conclui-se que os requisitos especificados para o projeto foram atendidos e os resultados obtidos foram satisfatórios.

Referências

- BHARADWAJ, R.; ALOMAINY, A.; PARINI, C. **Experimental Investigation of Efficient Ultra Wideband Localisation Techniques in the Indoor Environment**. In *Antennas and Propagation Conference (LAPC), 2013 Loughborough*, number November, pages 486–489, Loughborough, 2013. ISBN 9781479900916.
- BOSCH SENSORTEC. **BMP280**, 2015. Disponível em: <http://www.bosch-sensortec.com/en/homepage/products_3/environmental_sensors_1/bmp280/bmp280>. Acesso em: 2015-06-18.
- CHAN, Y. T.; HO, K. C. **Simple and efficient estimator for hyperbolic location**, 1994. ISSN 1053587X.
- DECAWAVE. **DecaWave**, 2015. Disponível em: <<http://www.decawave.com/>>. Acesso em: 2015-02-24.
- GAFFNEY, B. **Considerations and Challenges in Real Time Locating Systems Design**. 2008. Disponível em: <http://www.decawave.com/sites/default/files/resources/decawave_paper_on_rtls_0.pdf>.
- GEZICI, S.; POOR, H. V. **Position estimation via ultra-wide-band signals**. *Proceedings of the IEEE*, 97(2):386–403, 2009.
- HAVERINEN, J.; KEMPPAINEN, A. **Global indoor self-localization based on the ambient magnetic field**. *Robotics and Autonomous Systems*, 57(10):1028–1035, 2009.
- IJAZ, F.; YANG, H. K.; AHMAD, A. W.; LEE, C. **Indoor Positioning: A Review of Indoor Ultrasonic Positioning systems**. In *Advanced Communication Technology (ICACT), 2013 15th International Conference on*, pages 1146–1150, 2013. ISBN 9788996865018.
- INTEL. **Intel Edison Product Brief**, 2015. Disponível em: <<http://www.intel.com/support/edison/sb/CS-035277.htm>>. Acesso em: 2015-06-18.
- INTEL IOT. **intel-iot-devkit/mraa**, 2015. Disponível em: <<https://github.com/intel-iot-devkit/mraa>>. Acesso em: 2015-11-10.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/IEC 7810:2003(en)**, 2003. Disponível em: <<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:7810:ed-3:v1:en>>. Acesso em: 2015-11-10.
- LIU, H. **Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems**. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, 37(6):1067–1080, 2007.

- McELROY, C.; NEIRYNCK, D.; McLAUGHLIN, M. **Comparison of wireless clock synchronization algorithms for indoor location systems**. *2014 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*, pages 157–162, 2014. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6881189>>.
- MICROCHIP TECHNOLOGY. **PIC16F1709**, 2015. Disponível em: <<http://www.microchip.com/PIC16F1709>>. Acesso em: 2015-06-18.
- SAHINOGLU, Z.; GEZICI, S.; GÜVENC, I. *Ultra Wideband Positioning Systems Theoretical Limits Ranging Algorithms And Protocols*. Cambridge University Press, Cambridge, 2008. ISBN 9780521187831.
- STMICROELECTRONICS. **LSM9DS1**, 2015. Disponível em: <http://www.st.com/web/en/catalog/sense_power/FM89/SC1448/PF259998>. Acesso em: 2015-11-10.
- SUBBU, K.; ZHANG, C.; LUO, J.; VASILAKOS, A. **Analysis and status quo of smartphone-based indoor localization systems**. *IEEE Wireless Communications*, 21(4):106–112, 2014.
- TIME DOMAIN. **Time Domain**, 2015. Disponível em: <<http://www.timedomain.com/>>. Acesso em: 2015-04-13.
- WU, Y.-C.; CHAUDHARI, Q.; SERPEDIN, E. **Clock Synchronization of Wireless Sensor Networks**. *IEEE Signal Processing Magazine*, 28(1):124–138, 2011.
- YAVARI, M.; NICKERSON, B. G. **Ultra Wideband Wireless Positioning Systems**. (506), 2014. Disponível em: <http://www.decawave.com/sites/default/files/resources/uwb_wireless_positioning_systems_technical_report.pdf>.
- ZEBRA. **Dart UWB**, 2015. Disponível em: <<https://www.zebra.com/us/en/products/location-solutions/dart-uwb.html>>. Acesso em: 2015-04-13.
- ZWIRELLO, L.; JANSON, M.; ZWICK, T. **Ultra-wideband based positioning system for applications in industrial environments**. *Wireless Technology Conference (EuWIT), 2010 European*, (September):165–168, 2010.