

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal  
de Campina Grande

JORGE HENRIQUE DOS SANTOS

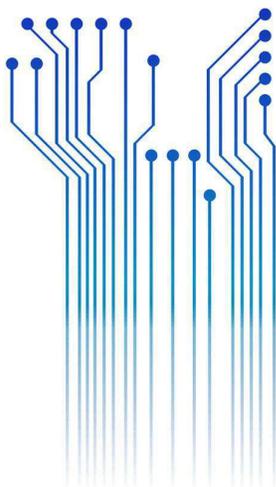


Centro de Engenharia  
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO  
SISTEMA ANTICOLISÃO BASEADO NO PADRÃO IEEE 802.15.4A



Departamento de  
Engenharia Elétrica



Campina Grande  
2017

JORGE HENRIQUE DOS SANTOS

SISTEMA ANTICOLISÃO BASEADO NO PADRÃO IEEE 802.15.4A

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador:

Professor Edmar Candeia Gurjão , D. Sc.

Campina Grande  
2017

JORGE HENRIQUE DOS SANTOS

SISTEMA ANTICOLISÃO BASEADO NO PADRÃO IEEE 802.15.4A

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em     /     /

**Professor Avaliador**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

**Professor Edmar Candeia Gurjão, D. Sc.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho à minha família, namorada e amigos que estiveram ao meu lado desde o começo dessa jornada.

# AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, Edna, por ter me erguido até esse ponto, ultrapassando todas as barreiras possíveis. Sempre disponibilizando o seu melhor para me ajudar a conhecer novos caminhos.

Agradeço também à irmã, Marília, por ter sempre estado ao meu lado, apesar de distante fisicamente.

Agradeço também aos meus avós, Angelo e Madalena, pelo carinho constantemente demonstrado. Além disso, por serem um referencial e sempre me lembrarem das minhas origens e de tudo que me levou a poder desfrutar desse momento.

Agradeço também ao meu tio Edson e à minha tia Gleide, por terem sido uma presença importante durante toda minha vida.

Agradeço também à minha tias, Izailde, Hildete e Zézé, por terem sido uma fonte de carinho durante toda minha vida.

Agradeço também à minha tia e madrinha Ligia (in memoriam), por ter me proporcionado vários momentos de alegria.

Agradeço também à minha avó, Maria (in memoriam), por ter sempre ter sido uma avó carinhosa e atenciosa.

Agradeço também à minha tia, Lucineide, por ter sido uma das minhas primeiras professoras e participado do começo dessa jornada de aprendizado.

Agradeço à minha namorada, Larissa, por ter sido uma fonte de amor e companheirismo durante boa parte da minha graduação.

Agradeço aos meus amigos do Colégio de Aplicação – UFS pelos momentos partilhados nas minhas idas e vindas para Aracaju.

Agradeço aos meus amigos do grupo Jack Daniel's pelo companheirismo nos bons e maus momentos durante a graduação.

Agradeço às minhas amigas, Bruna e Géssica, por pelo companheirismo durante essa passagem por Campina Grande.

Agradeço também ao professor Edmar pela confiança depositada em mim e pela ajuda durante boa parte da minha graduação.

*“ Fazer o que seja é inútil.  
Não fazer nada é inútil.  
Mas entre fazer e não fazer  
mais vale o inútil do fazer.  
Mas não, fazer para esquecer.  
que é inútil: nunca o esquecer  
Mas fazer o inútil, sabendo  
que ele é inútil, e bem sabendo  
que é inútil e que seu sentido  
não será sequer pressentido,  
fazer: porque ele é mais difícil  
do que não fazer...”*

João Cabral de Melo Neto

## RESUMO

Uma das principais áreas de interesse da indústria é a Internet das Coisas. Como algumas aplicações nessa área necessitam conhecer a localização dos elementos pertencentes a elas, o padrão IEEE 802.45.4a foi criado para responder essa necessidade. Esse padrão permite utilizar sinais UWB, que possibilitam uma precisão de  $\pm 10$  cm. Neste trabalho foi implementado um sistema anticolisão baseado nesse padrão. O sistema foi implementado a partir do IC DW1000 da empresa Decawave. Além disso, foram realizados testes com o IC e um estudo sobre área de localização *indoor*.

**Palavras-chave:** UWB, IEEE 802.15.4a, Localização indoor

# ABSTRACT

One of focus areas of the industry is the Internet of Things. As some applications in this field need to know their elements localizations, the IEEE 802.15.4a standard was created to give a response to this demand. This standard enables to use UWB signals, which can give distances measures with 10 cm of precision. In this work was implemented an anticollision system following the IEEE 802.15.4a standard. The system was developed with the IC DW1000 of DECAWAVE. Moreover, it was done some tests with the IC and a study about the indoor localization field.

**Keywords:** UWB, IEEE 802.15.4a, Indoor Localization

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Região de provável localização dada pelo RSS .....	16
Figura 2 – Desvio padrão mínimo do método RSS (Sahinoglu, Gezici e Guvenc, 2008) .....	17
Figura 3 – Desvio padrão mínimo do método TOA(Sahinoglu, Gezici e Guvenc, 2008).....	18
Figura 4 – Região de provável localização dada pelo TDOA .....	19
Figura 5 – Desvio padrão mínimo do método AOA em relação ao SNR e à banda passante (Sahinoglu, Gezici e Guvenc, 2008).....	22
Figura 6 – Desvio padrão mínimo do método AOA em relação ao ângulo de chegada ( (Sahinoglu, Gezici e Guvenc, 2008).....	22
Figura 7 – Banda passante do sinal UWB .....	27
Figura 8 – Potência do sinal UWB em comparação com outros padrões .....	28
Figura 9 – TW - TOA.....	31
Figura 10 – Efeito da derivação de relógio.....	32
Figura 11 – SDS – TW-TOA.....	33
Figura 12 – Erro devido a derivação de relógio no TW-TOA.....	34
Figura 13 – Erro devido a derivação de relógioj no SDS-TW-TOA .....	34
Figura 14 - DW1000.....	35
Figura 15 – Kit de avaliação EVK1000.....	35
Figura 16 –DWM1000 .....	36
Figura 17 – Teste de derivação de relógio.....	37
Figura 18 - Teste de rejeição .....	38
Figura 19 – Situação NLOS 1 .....	38
Figura 20 - Situação NLOS 2 .....	39
Figura 21 – Arquitetura dos nós .....	40
Figura 22 - Topologia da rede .....	41
Figura 23 - Diagrama de camdas da rede .....	41
Figura 24 – Erro em função da derivação de relógio.....	43
Figura 25 – Rejeição.....	43
Figura 26 – Hardware implementado .....	45
Figura 27 - Ciclo de medição .....	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo do padrão IEEE 802.15.4a .....	29
Tabela 2 – Especificação do DW1000.....	36
Tabela 3 – Consumo de potência.....	44
Tabela 4 – Tempo de utilização estimado por bateria .....	44

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UWB	<i>Ultra Wide Band</i>
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i>
ToA	<i>Time of Arrival</i>
TDoA	<i>Time Difference of Arrival</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
RFID	<i>Radio-Frequency Identification</i>
RF	Rádio Frequência
CI	Circuito Integrado
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
CCS	<i>Chirp Spread Spectrum</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>

# SUMÁRIO

1	Introdução.....	13
1.1	Objetivos.....	14
2	Revisão Bibliográfica.....	14
2.1	Técnicas de localização.....	14
2.1.1	Intensidade do Sinal Recebido (RSS).....	15
2.1.2	Tempo de Chegada - ToA.....	17
2.1.3	Diferença de Tempo de chegada – TDOA.....	19
2.1.4	Ângulo de Chegada – AoA.....	19
2.2	Tecnologias para sistemas de localização.....	23
2.2.1	RFID.....	24
2.2.2	Wifi.....	24
2.2.3	GPS.....	25
2.2.4	Bluetooth Low Energy (BLE).....	26
2.2.5	UWB.....	26
2.2.5.1	Padrão IEEE 802.15.4a.....	29
3	Material e Métodos.....	35
3.1	DECAWAVE: DW1000.....	35
3.2	Testes.....	37
3.2.1	Derivação de relógio.....	37
3.2.2	Rejeição.....	37
3.2.3	Consumo de potência.....	38
3.2.4	Precisão NLOS.....	38
3.3	Desenvolvimento do sistema.....	39
3.3.1	Hardware.....	39
3.3.2	Firmware.....	40
4	Resultados.....	42
4.1	Testes.....	42
4.1.1	Derivação de relógio.....	42
4.1.2	Rejeição.....	43
4.1.3	Consumo de potência.....	44
4.1.4	Precisão NLOS.....	44
4.2	Sistema.....	44
5	Conclusão.....	46
	Referências.....	48

# 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, um grande percentual dos esforços em pesquisa e desenvolvimento se concentraram sobre a Internet das Coisas. Dentre dos seus vários campos de pesquisa, os sistemas de localização *indoor* tiveram uma grande importância. A principal justificativa desse esforço reside no fato de que os seres humanos passam mais de 70% do dia nesse tipo de ambiente (Dardari, Closas e Djurić, 2015). Uma outra justificativa, é incompatibilidade das tecnologias utilizadas em ambientes externos, como o GPS, com aplicações *indoors* (Song, Jiang e Huang, 2011).

Sendo assim, diferentes soluções surgiram para viabilizar aplicações que necessitassem de alguma noção de localização em ambientes fechados. Dentre as tecnologias disponíveis se encontram a infravermelho, a ultrassônica, a visão computacional e a rádio frequência (Song, Jiang e Huang, 2011). Cada uma dessas soluções apresenta vantagens e desvantagens, não só do ponto de vista econômico, mas também de precisão.

Dentre das soluções listadas anteriormente, os sistemas que utilizam sinais *Ultra Wide Band* (UWB), que é uma tecnologia RF, apresentam os melhores desempenhos em termo precisão, em torno de  $\pm 10$  cm (Malajner, Planinšič e Gleich, 2015). Além disso, esse tipo de sistema apresenta um grau elevado de robustez em relação a problemas como o de múltiplos trajetos e desvanecimento (Arslan, Chen e Di Benedetto, 2006).

Levando em conta a demanda por sistemas de localização indoor e a capacidade dos sistemas UWB, o IEEE criou o padrão IEEE 802.15.4a. Onde a camada física utiliza sinais UWB. Além disso, o IEEE definiu a camada de acesso ao meio (MAC) e algoritmos de localização compatíveis com esse tipo de sistema.

Embora, esse tipo de tecnologia, que era restrita a uso militar, fosse um pouco inacessível economicamente, algumas empresas começaram a disponibilizar soluções economicamente viáveis. As empresas DECAWAVE e Bespoon são as que atualmente se colocam no mercado como protagonistas. Cada uma oferece soluções que possibilitam aplicações finais em larga escala e à um custo razoável (Jiménez e Seco, 2016). Nesse trabalho será utilizado um o CI DW1000 da empresa DECAWAVE.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo do trabalho foi implementar um protótipo de um sistema anticollisão, ou ao menos, um detector de proximidade compatível com o padrão IEEE 802.15.4a. Ver-se-á neste documento que o projeto foi dividido em três etapas: a análise do estado da arte da área de sistemas de localização indoor, testes sobre o *hardware* escolhido e o desenvolvimento do sistema proposto.

A primeira etapa comportou um estudo sobre as principais aspectos e soluções para sistemas de localização *indoor*. Foram analisados os principais métodos aplicados para determinar distancias e proximidades entre objetos. E em seguida, foi realizado um estudo sobre as principais tecnologias disponíveis para implementação desses métodos.

Na segunda parte, foram realizados testes sobre o IC DW1000 da empresa DECAWAVE. Por ser baseado em sinais UWB, esse CI possibilita uma alta precisão na determinação de distancias entre objetos e surge como umas das principais soluções para a problemática de localização *indoor*.

Por fim, o sistema em si foi implementado. Foi criada uma rede de sensores baseada no IEEE 802.15.4a. Onde existiam elementos capazes de fazer a medição das distancias, emitir alertas de proximidade e gerenciar a rede.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO

O primeiro aspecto abordado durante a fase de pesquisa desse projeto foi a identificação das técnicas mais utilizadas na determinação de distancias. Ver-se-á nesta secção uma análise das seguintes técnicas:

- Intensidade do Sinal Recebido (*Receivend Signal Strength* - RSSI)
- Tempo de Chegada (*Time of Arrival* - TOA)
- Diferença de Tempo de chegada (*Time Difference of Arrival* - TDOA)
- Angulo de Chegada (*Angle of Arrival* - AOA)

Todavia, antes de partir para a análise das técnicas, um conceito importante da área estatística necessita ser revisitado: a desigualdade de Cramer-Rao. Essa desigualdade será empregada como estimativa de eficiência na análise de cada técnica.

Dois conceitos são importantes para entender o significado dessa desigualdade:

- Estimador não polarizado: Um estimador  $\hat{T}$  cuja média é igual ao valor verdadeiro  $\theta$ .

$$E[\hat{T}] = \theta \quad (1)$$

- MSE – Erro Quadrático Médio

$$e = E[(\hat{T} - \theta)^2] \quad (2)$$

Logo o MSE de um estimador não polarizado é sua própria variância.

$$e = E[(\hat{T} - \theta)^2] = E[(\hat{T} - E[\hat{T}])^2] = VAR[\hat{T}] \quad (3)$$

- Desigualdade Cramer-Rao

Sendo  $\hat{T}$  um estimador não polarizado de  $\theta$  a partir de  $X$ , com pdf  $f(x|\theta)$ . Então, a variância desse estimador deve obedecer a seguinte desigualdade (Leon-Garcia, 2008)

$$VAR[\hat{T}] \geq \frac{1}{N \times E \left[ \left( \frac{d \ln(f(x|\theta))}{d\theta} \right)^2 \right]} \quad (4)$$

Portanto, a desigualdade de Cramer Rao estabelece um limite mínimo para o erro quadrático médio de um estimador.

### 2.1.1 INTENSIDADE DO SINAL RECEBIDO (RSSI)

Essa técnica utiliza a intensidade do sinal recebido para inferir a distância entre dois objetos. Um objeto, denominado aqui nesse trabalho como unidade de referência, transmite um sinal com um nível de potência conhecido e um outro objeto utiliza a atenuação sobre o sinal para determinar a distância entre eles (Yassin *et al.*, 2016).

Embora seja uma técnica de fácil implementação, ela necessita de um modelo de propagação do sinal bastante preciso para fornecer resultados aceitáveis. Esse modelo é utilizado em conjunto com a atenuação no sinal recebido para determinar a distância entre a unidade de referência e o objeto. Essa necessidade confere ao RSSI uma alta imprecisão em ambientes fechados, pois esse tipo de ambiente impõe um alto grau de dificuldade na elaboração de um modelo preciso. Tal dificuldade é justificada por fenômenos como múltiplos trajetos e sombreamento.

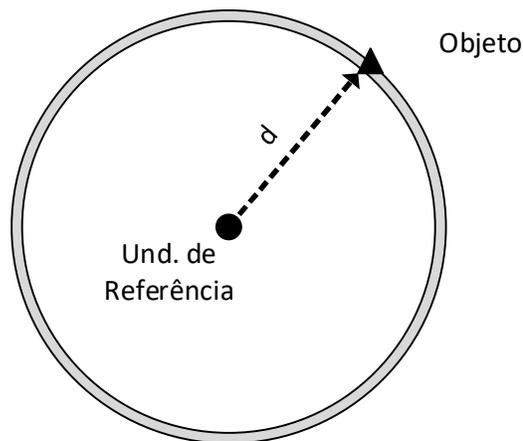


Figura 1 – Região de provável localização dada pelo RSSI

As principais vantagens dessa técnica são a disponibilidade de medições de RSSI na maioria dos sistemas de comunicação e a prescindibilidade de sincronização temporal entre os elementos do sistema (Yavari e Nickerson, 2014).

Como afirmado anteriormente, essa técnica apresenta alta sensibilidade em relação aos parâmetros do canal (expoente de perda de percurso e variância do sombreamento). A partir da desigualdade de Cramer Rao é possível ter uma ideia da influência desses parâmetros na eficiência dessa técnica. A desigualdade para essa técnica está representada na seguinte equação (Arslan, Chen e Di Benedetto, 2006):

$$VAR[\hat{\theta}] \geq \left( \frac{d\sigma_{sh}^2 \ln 10}{10n_p} \right)^2. \quad (5)$$

Sendo  $\hat{\theta}$  é um estimador da distância ( $d$ ) entre os elementos,  $n_p$  é o expoente de perda de percurso e  $\sigma_{sh}^2$  é a variância do sombreamento, modelado com uma distribuição log – normal. A partir da equação e do gráfico é possível constatar a dependência dessa técnica dos parâmetros do canal ( $n_p$  e  $\sigma_{sh}^2$ ) e da distância.

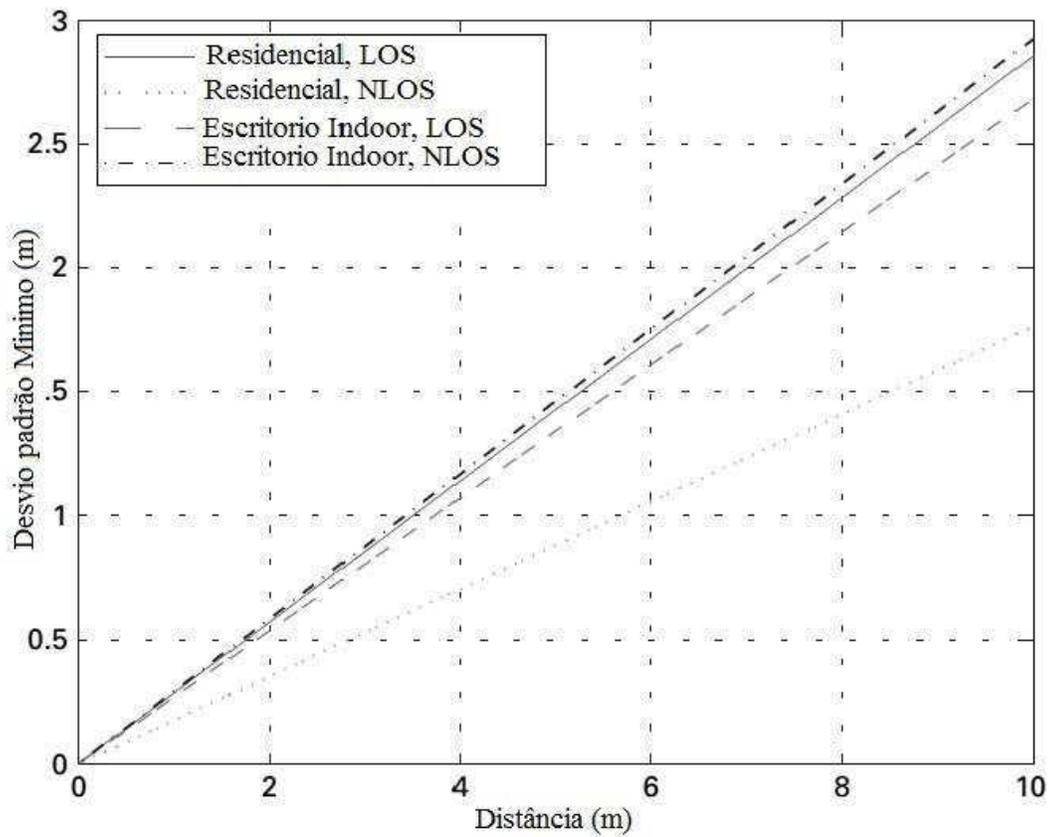


Figura 2 – Desvio padrão mínimo do método RSSI (Sahinoglu, Gezici e Guvenc, 2008)

### 2.1.2 TEMPO DE CHEGADA - TOA

Essa técnica é baseada na expressão

$$d = v \times ToF. \quad (6)$$

Se  $d$  é a distância entre dois objetos,  $v$  a velocidade de propagação do sinal e TOF o tempo de propagação do sinal entre os objetos, ou seja, a distância entre dois objetos é determinada a partir do tempo de propagação do sinal entre a unidade de referência e objeto a ser localizado.

De modo diferente do RSSI, essa técnica necessita que os elementos estejam sincronizados, pois é imprescindível conhecer o tempo de emissão do sinal e o tempo de chegada no receptor. A partir da diferença entre esses dois tempos é determinado o tempo de propagação TOF.

A desigualdade de Cramer-Rao para essa técnica pode ser observada na seguinte equação (Arslan, Chen e Di Benedetto, 2006)

$$VAR[\hat{\theta}] \geq \frac{c}{2\sqrt{2}\pi\sqrt{SNR}\beta}. \quad (7)$$

Como na análise do método anterior,  $\hat{\theta}$  é um estimador da distância,  $d$ , entre os elementos. SNR é a relação sinal ruído e  $\beta$  é banda passante efetiva.

A Eq. 7 demonstra a dependência da eficiência desse estimador em relação a banda passante efetiva do sinal. Desse modo sinais com alta banda passante, como o UWB, apresentam um menor erro quadrático médio.

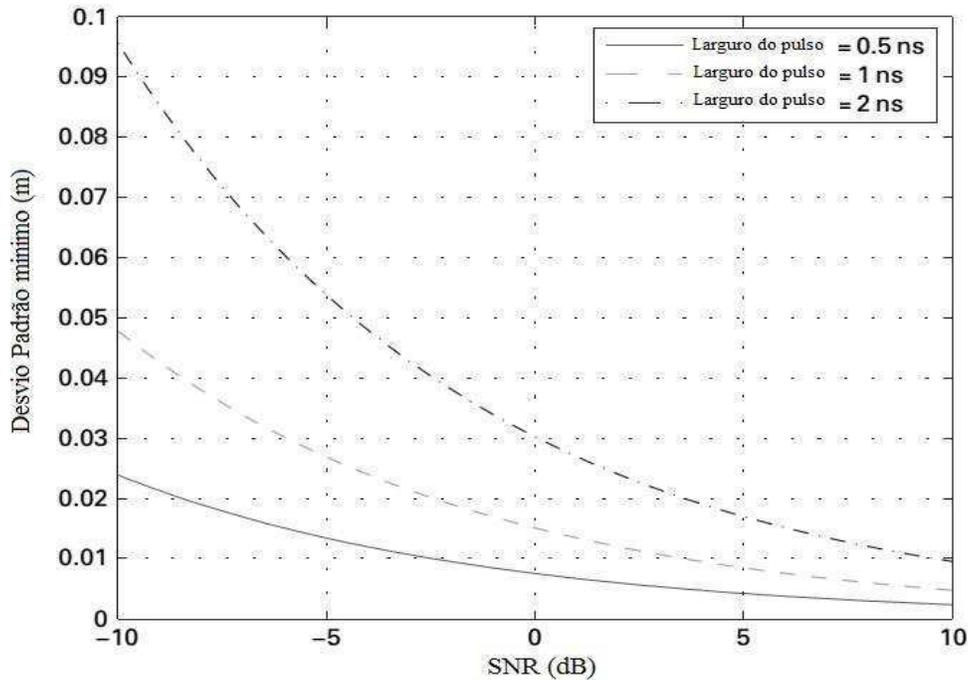


Figura 3 - - Desvio padrão mínimo do método TOA(Sahinoglu, Gezici e Guvenc, 2008)

### 2.1.3 DIFERENÇA DE TEMPO DE CHEGADA – TDOA

Esse método permite resolver o problema de sincronização entre a unidade de referência e o objeto. Ele funciona por meio da determinação da diferença entre os tempos de chegada de um sinal, que foi emitido por um objeto, em duas unidades de referência diferentes. Entretanto, ele necessita de sincronização entre as unidades.

Uma vez que  $\tau_1$  e  $\tau_2$  são os tempos de chegada de um sinal em cada uma das unidades de referência, logo o  $\tau_{TDOA}$  pode ser expresso como se segue:

$$\tau_{TDOA} = \tau_1 - \tau_2. \quad (8)$$

A multiplicação do  $\tau_{TDOA}$  resultará em um região de provável localização do objeto na forma de uma hipérbole. Portanto, esse método apresenta maior dificuldade na implementação na detecção de sistemas anticolisão ou de detecção de proximidade. Sendo assim, os métodos discutidos anteriormente, que fornecem um raio de provável localização em torno da unidade de referência, são mais compatíveis com esses tipos de aplicação.

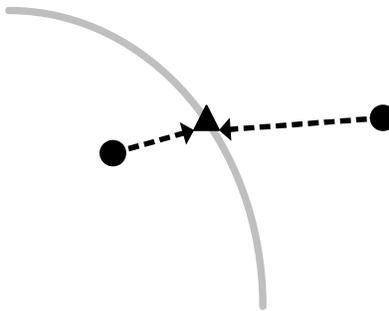


Figura 4 – Região de provável localização dada pelo TDOA

A discussão sobre a desigualdade de Cramer Rao para esse método é semelhante ao do método anterior, inclusive sua dependência em relação à banda passante (Yavari e Nickerson, 2014).

### 2.1.4 ÂNGULO DE CHEGADA – AOA

Essa técnica utiliza os ângulos entre um objeto e as unidades de referência para poder determinar sua localização. Para se obter a informação dos ângulos, usualmente são utilizados arranjos de antenas. Neste método, o ângulo de chegada de um sinal é determinado a partir da medição dos diferentes tempos de chegada do sinal, que é emitido pelo objeto, em cada elemento de um arranjo (Sahinoglu, Gezici e Guvenc, 2008).

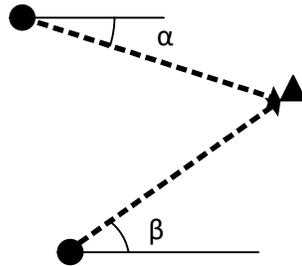


Figura 5 – AOA

Para ilustrar o funcionamento dessa técnica, na Figura 6 observamos o sinal emitido por um objeto incidindo sobre um arranjo linear uniforme.

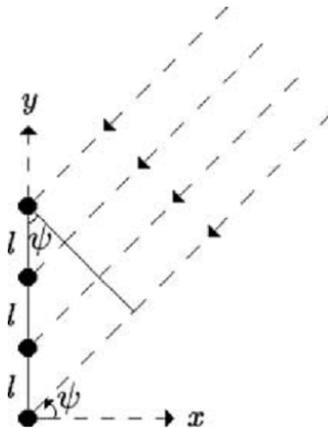


Figura 6 – Sinal sobre um arranjo de antenas (Sahinoglu, Gezici e Guvenc, 2008)

Quando a distância entre o objeto e o arranjo for grande, é possível considerar que o sinal como uma frente de onda planar (Sahinoglu, Gezici e Guvenc, 2008), que se propaga como um plano perpendicular à direção de propagação da onda. Logo a distância percorrida pela frente de onda para chegar à um outro elemento do arranjo, que está separado por uma distância  $l$ , será expressa por:

$$d_{\Delta} = l \sin \varphi. \quad (9)$$

E a diferença de tempo de chegada do sinal em cada elemento do arranjo de antenas:

$$t = \frac{l \sin \varphi}{c}. \quad (10)$$

Embora a estimativa do ângulo forneça a direção em que o objeto se encontra, ela não fornece a localização do objeto e nenhuma noção de distância. Logo para se determinar a posição 2D de um objeto é necessário utilizar um segundo arranjo de antenas.

Como na análise das técnicas anteriores, a desigualdade de Cramer-Rao, que está expressa na equação 10, também será utilizada para analisar a precisão de um estimador baseado no AOA (Sahinoglu, Gezici e Guvenc, 2008):

$$VAR[\hat{\varphi}] \geq \left[ \frac{\sqrt{3}c}{\sqrt{2}\pi\sqrt{SNR}\beta\sqrt{N_a(N_a^2-1)l \cos\varphi}} \right]^2. \quad (10)$$

Na equação 10, podemos identificar que o erro quadrático médio de um estimador  $\hat{\varphi}$  baseado no AOA é dependente do número de antenas presentes no arranjo ( $N_a$ ), da distância entre os elementos do arranjo ( $l$ ) e do próprio ângulo de chegada ( $\varphi$ ).

Além disso, a precisão também depende da banda passante eficaz  $\beta$ , como no método TOA. O comportamento do erro quadrático médio em relação a banda passante pode ser observado na Figura 7 - - Desvio padrão mínimo do método AOA em relação ao SNR e à banda passante (Sahinoglu, Gezici e Guvenc, 2008). Onde o erro decresce com a diminuição do comprimento do pulso, que é inversamente proporcional a banda passante, e com o crescimento da relação sinal ruído.

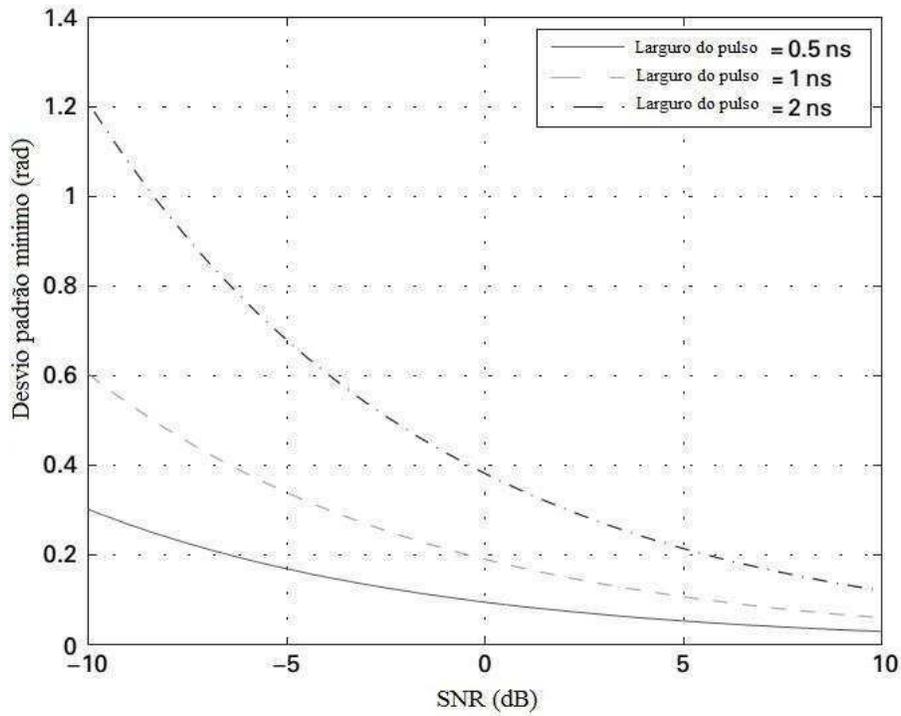


Figura 7 -- Desvio padrão mínimo do método AOA em relação ao SNR e à banda passante (Sahinoglu, Gezici e Guvenc, 2008)

Já na Figura 8 é apresentado o comportamento da variância mínima em relação ao ângulo de chegada. Portanto, para ângulos obtusos a eficácia desse método tende a decair.

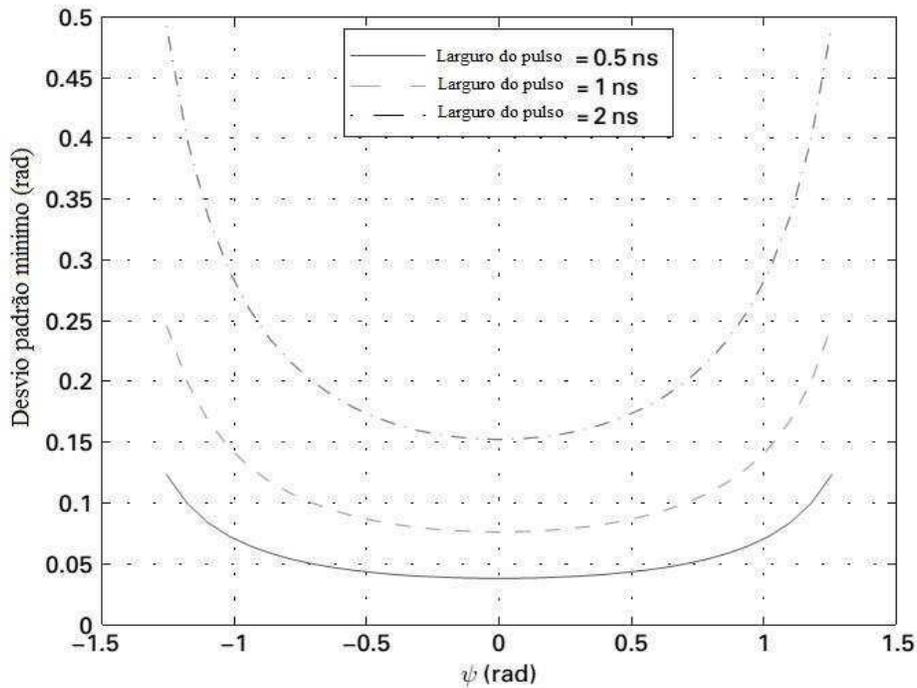


Figura 8 -- Desvio padrão mínimo do método AOA em relação ao ângulo de chegada (Sahinoglu, Gezici e Guvenc, 2008)

## 2.2 TECNOLOGIAS PARA SISTEMAS DE LOCALIZAÇÃO

Após a fase de pesquisas sobre as técnicas de localização, foi realizado um estudo sobre as tecnologias disponíveis para implementação delas. Na Figura 9, podemos observar algumas das principais tecnologias utilizadas em sistemas de localização *indoor*. No gráfico estão destacadas a precisões e a cobertura de cada tipo de tecnologia, parâmetros utilizados durante a fase de escolha da tecnologia mais compatível com alguma aplicação visada.

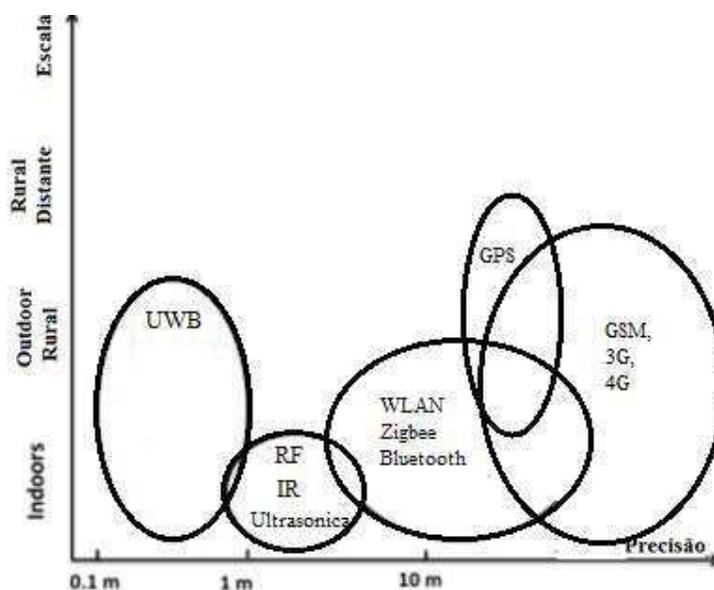


Figura 9 – Tecnologias sem fio para localização (Yassin *et al.*, 2016)

Apesar da grande diversidade de tecnologias disponíveis, somente serão abordadas, por questão de coerência com o objetivo principal do trabalho, algumas tecnologias baseadas em rádio frequência:

- RFID
- Wifi
- GPS
- Bluetooth Low Energy
- UWB

Neste ponto é importante salientar que as quatro primeiras tecnologias serão analisadas de forma sucinta. Uma análise mais detalhada será reservada a tecnologia UWB, pelo mesmo motivo da escolha das tecnologias analisadas.

### 2.2.1 RFID

Essa tecnologia geralmente é utilizada em sistemas de detecção de proximidade. Utiliza-se leitores RFID para detectar a presença de pessoas ou objetos que estiverem portando uma tag RFID. O desempenho dos sistemas baseados nessa tecnologia é fortemente dependente de dois parâmetros: densidade de tags e alcance dos leitores. Técnicas como o RSS podem ser utilizadas em alguns sistemas para melhorar suas precisões. Entretanto, a dependência de um bom modelo do canal, como discutido na análise sobre o RSS, acaba limitando a precisão desse tipo de sistema em torno de 2m (Yassin *et al.*, 2016).

Uma outra metodologia que utiliza RFID é a distribuição de tags em um determinado espaço com o objetivo de construir um banco de dados com suas localizações. A partir do “mapa” com as localizações das tags é possível localizar ou orientar objetos que portarem um leitor (Mautz, 2012).

Uma das principais vantagens do RFID é o fato de cada tag possuir uma identificação única. Essa característica possibilita a implementação de sistemas de segurança e de controle de estoque (Mautz, 2012). É possível controlar o acesso de pessoas à ambientes restritos ou controlar a utilização de estoques de medicamentos em hospitais, entre outras coisas.

### 2.2.2 WIFI

Devido à grande disponibilidade de dispositivos, principalmente smartphones, que utilizam esse tipo de rede, essa é a tecnologia mais utilizada nas aplicações de localização *indoor*. Tal abrangência se justifica pela utilização de estruturas já existentes, não sendo necessário realizar nenhuma alteração na rede tanto em hardware quanto em software (Yassin *et al.*, 2016). Por exemplo, é possível utilizar a rede de um *shopping* para implementar soluções de *marketing*, como apresentar promoções a um cliente que esteja dentro ou próximo de uma loja, sem necessitar realizar nenhuma alteração na

infraestrutura da rede (“In Loco Media”, [s.d.]). É importante ressaltar que esse tipo de rede está disponível em vários ambientes compatíveis com aplicações de localização *indoor*: hospitais, aeroportos, universidades e indústrias.

Existem três abordagens diferentes para se utilizar uma rede Wifi/WLAN nesse tipo de aplicação : Célula de origem, RSS e *Fingerprinting* (Mautz, 2012). A primeira é a mais simples e compatível com as aplicações que necessitam detectar a presença ou não de objetos em uma determinada área coberta pela rede. A segunda técnica, que já foi discutida neste trabalho, utiliza a atenuação sofrida pelo sinal e o modelo de propagação para localizar objetos.

A terceira técnica funciona como uma RSS empírica. São realizadas medições da potência do sinal em toda área de cobertura da aplicação e criada um banco de dados, que mapeia cada ponto da área de cobertura com uma respectiva potência. A partir desse mapeamento um objeto pode ser localizado comparando a potência do sinal recebido por ele com os dados da tabela. Essa é a técnica mais aplicada com esse tipo de tecnologia, pois não é dependente do modelo do canal. Entretanto, ela ainda é sensível a variação do canal ao longo do tempo. Apesar disso, é possível atingir precisões de 1m utilizando essa técnica. A eficiência dela vai depender no número de unidades de referência (roteadores) e do número de pontos tomados durante a fase de criação do banco de dados.

### 2.2.3 GPS

É a tecnologia de localização mais popular. Está presente na maior parte dos smartphones e dos sistemas de navegação. Entretanto, utiliza sinais que são transmitidos por satélites, o que torna quase impossível a localização em ambientes fechados, pois a potência do sinal recebido dentro desses ambientes tem a tendência de ser bastante pequena.

Apesar dessa incompatibilidade, existem algumas adaptações que tornam possível utilizar o sistema GPS dentro de ambientes fechados;

- Pseudosatélites

Essa adaptação permite utilizar dispositivos compatíveis com o sinal GPS por meio de pseudosatélites localizados no solo que emitem o mesmo tipo de sinal que o sistema GPS tradicional. Entretanto, não é aconselhável utilizar esse tipo de sistema em

ambientes com muito compartimento, pois ele é bastante sensível ao fenômeno dos múltiplos trajetos.

- Repetidores GPS

Esse tipo de tecnologia permite que o sinal GPS original seja utilizado para localizar objetos em ambientes fechados. Geralmente é colocada uma antena do lado de fora do ambiente que pode se comunicar com satélite GPS. O sinal recebido pela antena é retransmitido via cabo e repetido dentro do ambiente fechado.

- Receptores mais sensíveis

Outra possibilidade de se utilizar o GPS em aplicações de localização indoor é utilizar receptores GPS com uma melhor sensibilidade. Existem, por exemplo, receptores com -160dBm de sensibilidade. É possível obter precisões da ordem de 2m.

#### 2.2.4 BLUETOOTH LOW ENERGY (BLE)

Geralmente essa tecnologia é utilizada em sistemas que detectam a proximidade de objetos. A maioria das aplicações existentes são voltadas para o comércio. Por exemplo, clientes podem receber a lista de artigos em venda dentro de uma loja ao entrarem nela. Esses sistemas são facilmente implementados usando técnicas de RSSI ou fingerprinting (Yassin *et al.*, 2016) e permitem uma precisão de 1m. Essa tecnologia começou a ser bastante utilizada em aplicações de localização depois da Apple lançar o iBeacon, que pode identificar smartphones por proximidade em três zonas (Zafari *et al.*, 2017): imediata (<1m), próxima (1-3m), distante (>3m).

#### 2.2.5 UWB

A tecnologia *Ultra Wide Band* apresenta algumas propriedades interessantes para aplicações de localização indoor:

- Alta precisão (10 cm)

- Robustez em relação a múltiplos trajetos e desvanecimento
- Baixo consumo de potência.

Como, de fato, o objetivo desse trabalho foi desenvolver um sistema baseado nessa tecnologia, será apresentada nessa secção uma abordagem mais precisa sobre alguns aspectos necessários ao entendimento dela: regulação, principais características e padronização.

A FCC define como UWB um sistema com uma banda passante superior à 500 MHz com frequência central,  $f_c$ , maior que 2,5 GHz ou um sistema com uma banda fracionaria,  $B_{frac}$ , superior à 0,2 com frequência central menor que 2,5 GHz. A frequência central é aquela com a máxima densidade espectral de potência. A banda passante é definida pelas frequências  $f_H$  e  $f_L$ , que são aquelas onde a densidade espectral de potência está 10dBm à abaixo da máxima.

$$B_{frac} = \frac{B}{f_c} \quad (11)$$

$$B = f_H - f_L \quad (12)$$

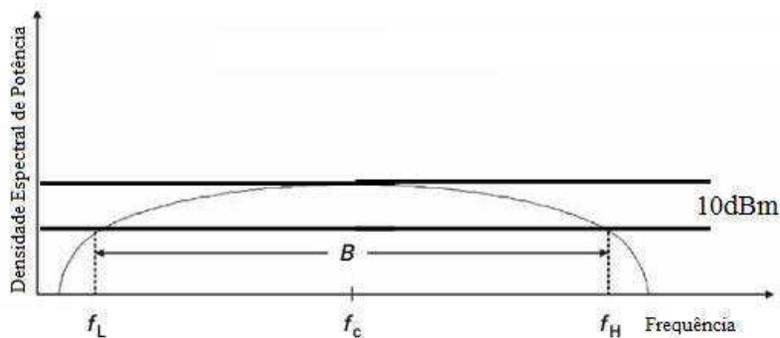


Figura 10 – Banda passante do sinal UWB

A FCC também definiu que a potência emitida deve ficar abaixo de -41,3dBm/MHz. Sendo assim, por exemplo, um sinal com banda passante de 500 MHz irá possuir uma potência total de -14,3dBm. Por esse baixo nível de emissão de potência, o sinal UWB se comporta como ruído para os outros sistemas e pode coexistir com outros sistemas. A Figura 11 evidencia essa característica.

É possível extrair duas vantagens importantes dos sistemas UWB a partir da equação 13. Essa equação fornece a capacidade máxima de transmissão,  $C$ , de um canal gaussiano com banda passante limitada,  $B$ , com potência do ruído,  $N$ , e potência do

sinal,  $P$ . A primeira é a alta capacidade de transmissão, pois a capacidade é proporcional a banda passante. A segunda é que se a banda passante for mantida alta e não houver necessidade de uma alta taxa de transmissão, é possível operar com um baixo consumo de potência, pois é possível balancear a potência do sinal e a banda passante.

$$C = B \log \left[ 1 + \frac{P}{N} \right] \quad (13)$$

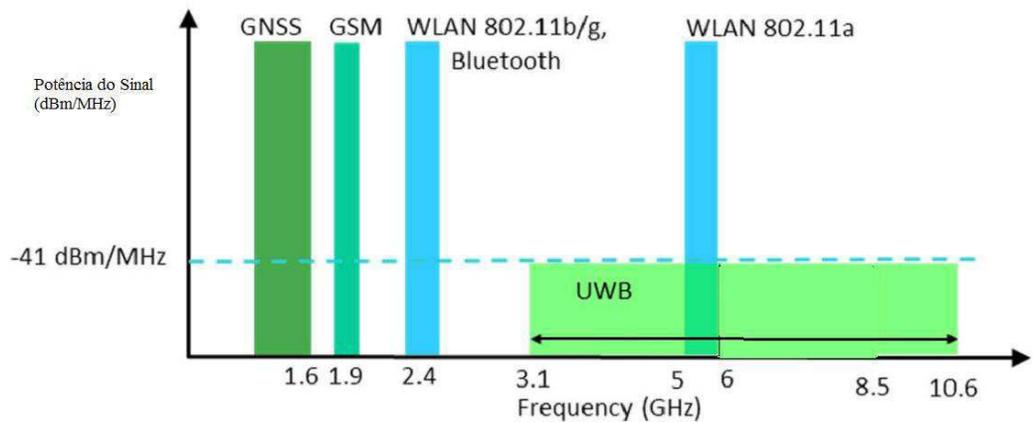


Figura 11 – Potência do sinal UWB em comparação com outros padrões

A banda passante larga ainda concede a esse tipo de sistema um grau elevado de robustez em relação a múltiplos trajetos e ao desvanecimento. Devido a dualidade entre frequência e tempo, um sinal com alta banda passante se comporta como um pulso no domínio do tempo, acarretando que o trajeto mais atrasado de um sinal emitido não ultrapassa o intervalo entre a emissão deste e do próximo sinal. Logo a interferência causada por múltiplos trajetos é reduzida.

Como a resposta em frequência de um canal geralmente não é plana, podendo existir regiões de frequência com maior atenuação que outras (Alencar e Da Rocha, 2005), um sinal com uma banda passante mais larga sofre menos influência do que outro com uma faixa mais estreita. Além disso, o coeficiente de atenuação de uma onda é proporcional a sua frequência, ou seja, quanto maior a sua frequência, maior é seu coeficiente de atenuação (Sadiku, 2014). Logo um sinal com componentes espectrais de baixa frequência sofre um menor grau de atenuação. Portanto, o sinal UWB é menos sensível ao desvanecimento devido a essas duas características citadas anteriormente.

### 2.2.5.1 PADRÃO IEEE 802.15.4A

O IEEE 802.15.4a foi o primeiro padrão internacional a definir uma camada física e camada de acesso ao meio para a localização sem fio (Karapistoli *et al.*, 2010). O padrão define dois tipos de camadas físicas: UWB e CCS. O primeiro é o utilizado para aplicações de localização.

O padrão foi criado para responder a necessidade, que foi imposta por algumas aplicações, de conhecer com melhor precisão a localizações dos nós que compõem uma rede de sensores sem fio. De modo geral, é possível dizer que esse padrão possui as seguintes características principais:

- Localização com alta precisão
- Alcance de comunicação razoável
- Baixo consumo de potência

Tabela 1 – Resumo do padrão IEEE 802.15.4a

PHY	UWB PHY	CCS PHY
Bandas de frequência	250-750 Mhz 3244-4742 Mhz 5944 - 10234 Mhz	2400-2483.5 Mhz
Número de canais	16	14
Taxa de dados	110 Kb/s; 851 Kb/s; 6.81 Mb/s; 27.24 Mb/s	1 Mb/s; 250 Kb/s
Localização	SIM	NÃO
Alcance	10 - 100m	11 - 100m
MAC	ALOHA ou CSMA/CA	

O padrão define três técnicas de medição, que são baseadas na ToA : TW-TOA, SDS-TW-TOA, private ranging.

- TW-TOA

1. O objeto envia uma requisição de localização ,  $RFRAME_{req}$ , para a unidade de referência e registra o tempo de transmissão,  $T_1$  .
2. A unidade de referência responde a requisição com a mensagem  $RFRAME_{rep}$ .
3. O objeto registra o tempo de chegada  $T_2$  do sinal  $RFRAME_{rep}$ .
4. Como existe um atraso  $T_{ta}^B$  entre o tempo de chegada da  $RFRAME_{req}$  e o tempo de  $RFRAME_{rep}$ . A unidade de referência envia uma mensagem com o valor do atraso.
5. Então, o tempo de voo  $T_{TW}$  é calculado por :

$$T_{TW} = \frac{T_r - T_{ta}^B}{2} \quad (14)$$

e

$$T_r = T_2 - T_1 . \quad (15)$$

E a distância é dada por

$$d = c \times T_{TW} \quad (16)$$

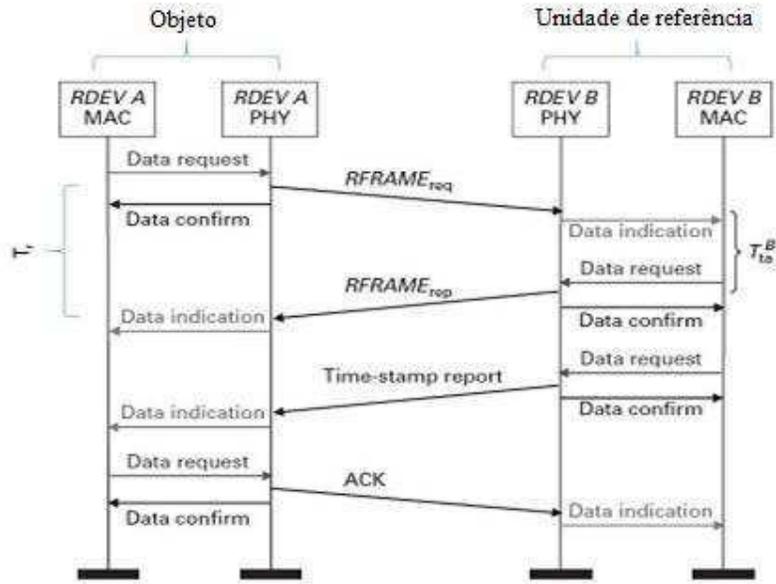


Figura 12 – TW – TOA (Yavari e Nickerson, 2014)

- SDS –TW-TOA

Na realidade um *clock* dificilmente irá operar na sua frequência nominal, ou seja, sempre existirá uma diferença entre a frequência de operação real e a nominal. Esse fenômeno é chamado de derivação de relógio (*clock drift*). Como o *clock* será utilizado por um timer ou contador que realiza a medição dos intervalos de tempo descritos anteriormente, essa derivação de relógio pode ser uma fonte de erro importante.

Na Figura 13 está representado o valor do contador em um determinado instante para circuitos com *clocks* com derivação diferentes. Podemos observar que cada circuito apresenta uma medida diferente da nominal. Cada circuito tem seu erro de frequência,  $e_a$  e  $e_b$ , pois ele depende de variáveis como de temperatura e potência fornecida.

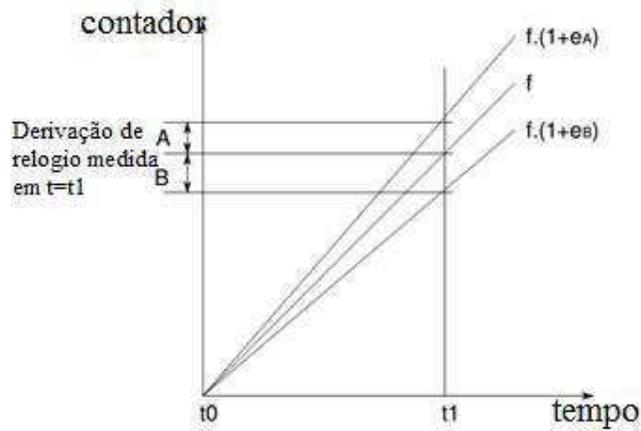


Figura 13 – Efeito da derivação de relógio

Tendo em consideração esse fenômeno, o padrão IEEE 802.15.4a definiu uma técnica de medição, SDS-TW-TOA, para diminuir seu efeito sobre a precisão do sistema, que pode ser considerada como uma versão modificada da discutida anteriormente.

1. Após receber a  $RFRAME_{rep}$ , o objeto envia uma outra mensagem de requisição  $RFRAME_{req}$  para a unidade de referência. Então, cada elemento irá possuir uma estimacão do tempo de voo,  $T_r^A$  e  $T_r^B$ , e do tempo de atraso,  $T_{ta}^A$  e  $T_{ta}^B$ .
2. A unidade de referência envia uma mensagem com os tempos  $T_r^B$  e  $T_{ta}^B$  para o objeto
3. Então, o tempo de voo é calculado como se segue

$$T_{SDS} = \frac{(T_r^A - T_{ta}^A) + (T_r^B - T_{ta}^B)}{4} \quad (17)$$

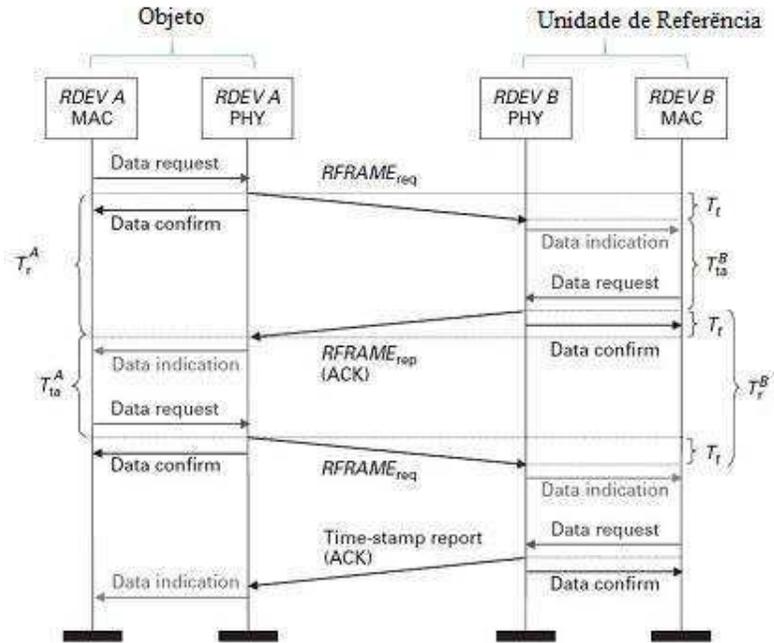


FIGURA 14 – SDS – TW-TOA

A partir das figuras 15 e 16, podemos observar a influência da derivação de relógio sobre a precisão de cada método e concluir que o método SDS-TW-TOA é mais robusto. Nas equações 18 e 19 estão expressos analiticamente os erros gerados pela derivação. Como Como  $(T_{ta}^B - T_{ta}^A) \ll T_{ta}^B$ , o erro gerado no SDS será menor.

$$Erro = \frac{1}{2} T_{ta}^B (e_b - e_a) \quad (18)$$

$$Erro = \frac{1}{4} (T_{ta}^B - T_{ta}^A) (e_b - e_a) \quad (19)$$

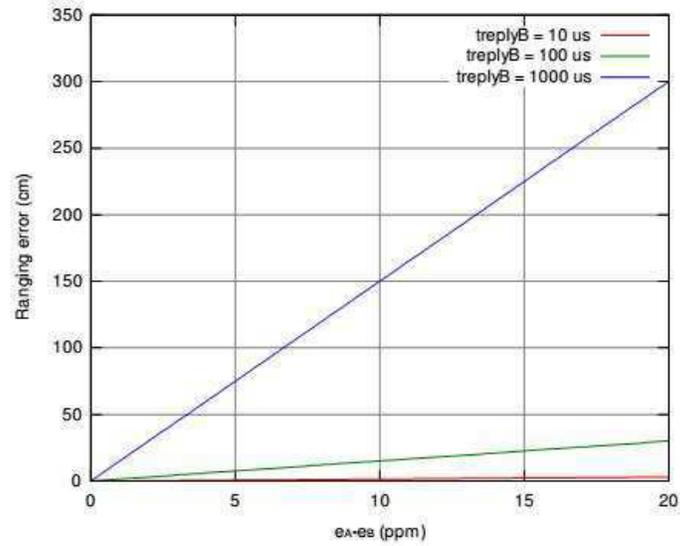


Figura 15 – Erro devido a derivação de relógio no TW-TOA

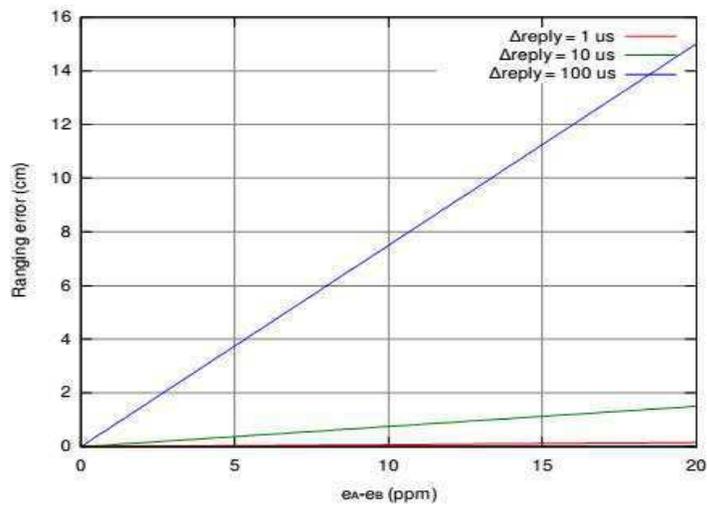


Figura 16 – Erro devido a derivação de relógio no SDS-TW-TOA

- *Private Raging*

É um protocolo com algumas ferramentas de segurança contra ataques de *hackers*. Uma dessas é a encriptação das mensagens. Uma outra é uma seleção dinâmica de preambulo que muda constantemente o preambulo das mensagens antes de começar o processo de localização para proteger o sistema contra “*reply attacks*”.

## 3 MATERIAL E MÉTODOS

### 3.1 DECAWAVE: DW1000

O IC DW1000 da empresa Decawave foi o primeiro circuito integrado UWB compatível com aplicações em larga escala, pois possui baixo custo em relação aos antigos ICs UWB. Além disso, ele é compatível com o padrão IEEE 802.14.4a e possibilita medir distâncias com precisão em torno de 10 cm usando técnicas como o TW-TOA. Basicamente ele detecta o primeiro trajeto que chega de um sinal enviado e salva o valor do tempo de chegada em um registro que pode ser acessado via SPI.

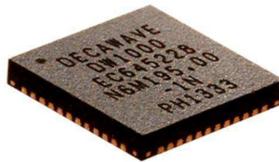


Figura 17 - DW1000

Durante a fase de testes foi utilizado um kit de avaliação do IC, o EVK1000. Esse kit é composto por duas placas EVB1000 que possuem comunicação serial com PC, onde é possível visualizar, por meio de um software disponibilizado pela fabricante, a distância medida e configurar as placas. Além disso, é possível visualizar a distância medida por meio de um visor LCD.



Figura 18 – Kit de avaliação EVK1000

Para implementar o sistema visado por esse trabalho foi utilizado um outro produto da DECAWAVE, o modulo DWM1000. Esse modulo é composto pelo IC DW1000 , por uma antena UWB e por um circuito de *clock*.

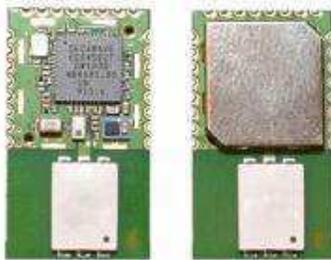


Figura 19 –DWM1000

Na Tabela 2 estão apresentadas algumas características importantes do IC DW1000.

Tabela 2 – Especificação do DW1000

<b>Taxa de transmissão</b>	6.8 Mbit/s
<b>Alcance de comunicação</b>	290m(LOS) / 45m(NLOS)
<b>Consumo de potência</b>	Tx – 31mA Rx – 64mA
<b>Faixa de frequência</b>	3244-6999Mhz
<b>Banda passante dos Canais</b>	500Mhz – Channel 1,2,3,5 900Mhz – Channel 4 et 7
<b>Densidade espectral de potência de saída</b>	-39/-35 dBm/Mhz
<b>In-Band blocking level</b>	30 dBc
<b>Out-of-Band blocking level</b>	55 dBc
<b>Velocidade relativa entre receptor e transmissor</b>	5 m/s (4096 preamble 110k, 128 bytes) 500 m/s (64 preamble, 6.8M, 12 bytes)
<b>Sensibilidade do Receptor</b>	-107/-93 dBm/500 MHz
<b>Preço</b>	14.75 USD

Outro ponto relevante sobre esse IC é que ele contém algumas funcionalidades para facilitar a implementação da camada de acesso ao meio: CRC, frame filtering, ACK automático e entrar automaticamente em modo de recepção após transmitir. Essas quatro funcionalidades foram bastantes utilizadas no sistema que foi implementado.

## 3.2 TESTES

### 3.2.1 DERIVAÇÃO DE RELÓGIO

Foi realizado um teste para observar a influência da derivação de relógio sobre a precisão das medidas de distância. Para realizar esse teste, o sinal de clock proveniente de um cristal presente nas placas EVB1000, foi substituído por um sinal com frequência ajustável gerado por gerador de sinais.

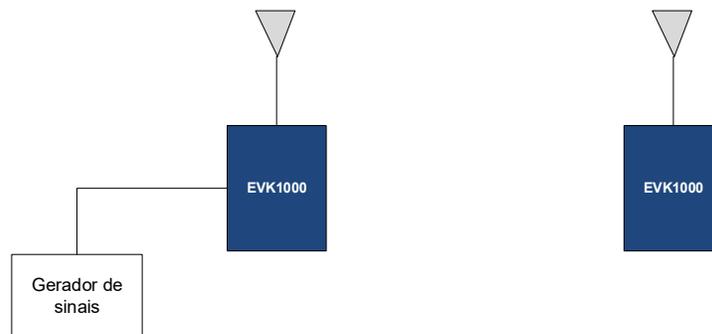


Figura 20 – Teste de derivação de relógio

### 3.2.2 REJEIÇÃO

Também foi realizado um teste para observar a capacidade de rejeição do IC DW1000 à interferência de sinais externos. Esse teste se consistiu em colocar uma das placas EVB1000 em uma câmara anecoica e conecta-la via cabo coaxial à saída de um acoplador. Os sinais de entrada do acoplador eram o sinal transmitido pela outra placa EVB1000 e o sinal de interferência gerado por um gerador de sinais. Essa segunda placa foi colocada em uma caixa para diminuir a interferência de outros sinais. Foi também utilizado um atenuador para controlar a potência de saída da segunda placa e torna-la compatível com potência limite de recepção da placa que estava dentro da câmara.

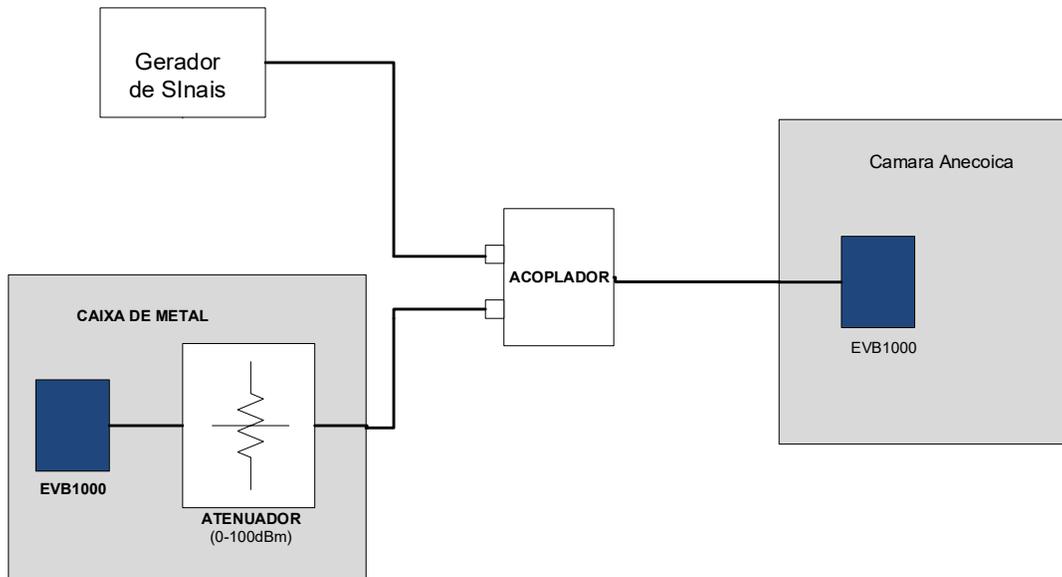


Figura 21 - Teste de rejeição

### 3.2.3 CONSUMO DE POTÊNCIA

Foi utilizado um osciloscópio para observar o consumo de potência do IC durante um ciclo de medição. É um teste interessante para dimensionar a bateria que deve ser utilizada no protótipo implementado nesse trabalho.

### 3.2.4 PRECISÃO NLOS

A precisão em condições de NLOS foi testada em duas condições:

- Situação 1



Figura 22 – Situação NLOS 1

- Situação 2



Figura 23 - Situação NLOS 2

### 3.3 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA

#### 3.3.1 HARDWARE

Além do modulo DWM1000, foram utilizados os seguintes circuitos e componentes na implementação do hardware dos nós do sistema:

- Microcontrolador STM32105 (ARM Cortex-M3 )
- Circuito para carregar a bateria
- Interface USB/USART
- LCD de 7 segmentos
- Outros periféricos: LEDs, switches e buzzer

Para fazer a comunicação do microcontrolador com o DWM1000 é utilizado o protocolo SPI e com o PC é utilizado a protocolo USART. Essa interface USART foi muito importante no processo de desenvolvimento do software do sistema, pois foi um meio de fazer debug e achar erros. Além disso interfaces, existe uma J-TAG para fazer o download e o debug, por meio da IDE IAR Workbench, do código implementado.

Após o esquema elétrico dos nós ter sido implementado, ele foi enviado para um técnico o design da PCB. E por fim, o projeto foi enviado à uma empresa especializada na confecção. Na Figura 24 podemos observar a arquitetura do hardware desenvolvido.

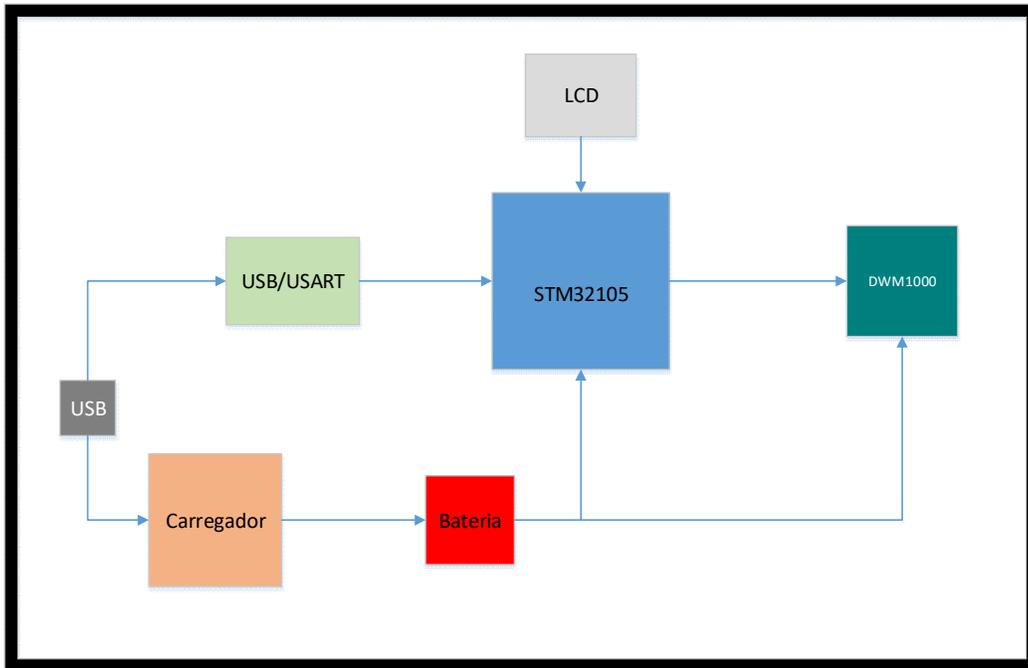


Figura 24 – Arquitetura dos nós

### 3.3.2 FIRMWARE

O desenvolvimento do firmware teve com um dos seus principais desafios a implementação de uma rede com dois tipos de nós: unidades de referências e objetos. Os primeiros são aqueles capazes de fazer o cálculo da distância e administrar a rede. Os segundos são aqueles que deve ser detectado pelas unidades de referência

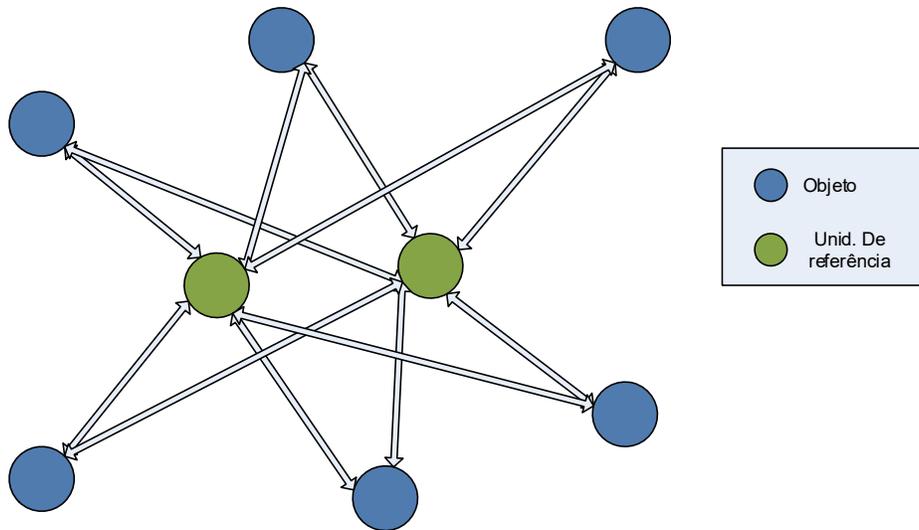


Figura 25 - Topologia da rede

A primeira tarefa foi determinar a arquitetura da rede. Depois de fazer um estudo sobre as redes compatíveis com esse tipo de aplicação, foi escolhido implementar a rede baseada no protocolo de acesso ao meio ALOHA. Para a topologia da rede, foi escolhido utilizar uma topologia multi-estrela, onde não existe comunicação direta entre elementos do mesmo tipo, como pode ser visto na Figura 25.

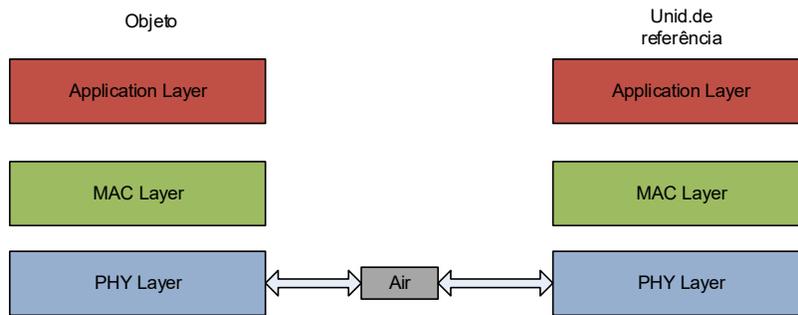


Figura 26 - Diagrama de camadas da rede

O diagrama de camadas da rede que foi implementada está ilustrado na Figura 26. A camada de aplicação é responsável por realizar a medição da distância entre os componentes da rede e por gerenciar a rede. Com esse objetivo, a unidade de referência foi implementada para possuir uma lista dinâmica de objetos, que podem ser inseridos ou removidos. Todo novo objeto encontrado é inserido na lista. Se um objeto presente na lista não for detectado por duas vezes seguidas, ele é removido. Do lado do objeto, ele deve sempre emitir “blinks”, mensagem de presença, até receber uma mensagem de

inicialização de medição com a unidade de referência. Depois de finalizar o processo de medição seguindo o método SDS – TW – TOA, ele deve recomeçar a emitir blinks para ser detectado novamente por a mesma ou por outras unidades de referência.

A camada de acesso ao meio, MAC, é baseada no protocolo ALOHA. Nesse protocolo as mensagens são enviadas no momento em que estão disponíveis, ou seja, não há nenhum mecanismo de controle de acesso ao meio para verificar se ele está sendo utilizado e diminuir as chances de colisão entre mensagens. Essa transmissão imediata é responsável pelo baixo delay de transmissão do ALOHA.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 TESTES

#### 4.1.1 DERIVAÇÃO DE RELÓGIO

A partir do teste descrito no capítulo anterior, foi possível observar que o comportamento do erro em função da derivação de relógio. O resultado encontrado é bastante condizente com o especificado pelo datasheet do produto. Além disso, foi observado que o sistema parava de funcionar a partir de uma derivação maior que 120ppm.

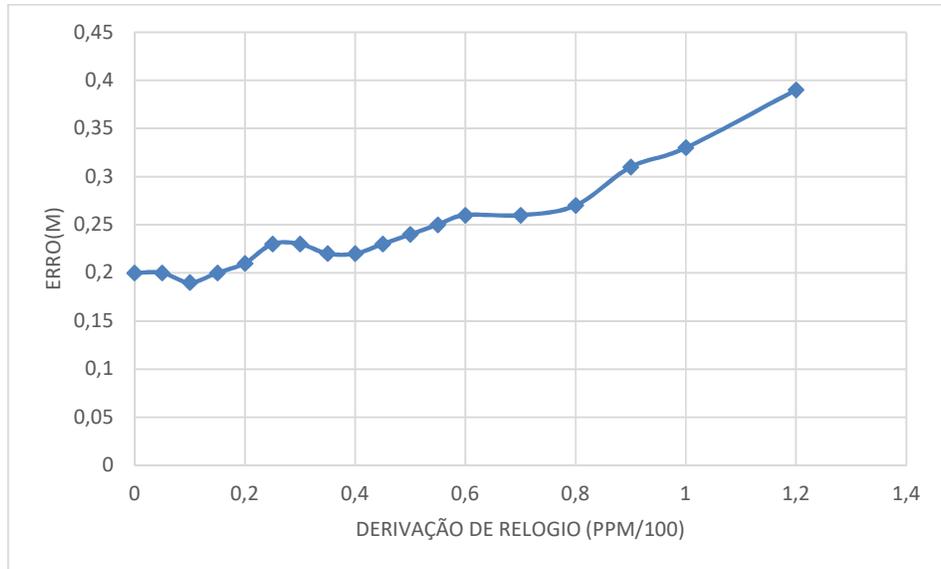


Figura 27 – Erro em função da derivação de relógio

#### 4.1.2 REJEIÇÃO

Foi observado que a rejeição medida no teste destoa da especificada no datasheet do produto em alguns pontos. Na Figura 28, observa – se que em torno das frequências 3,8028 GHz, 3,91728 GHz, 4.06992 e 4,1844GHz existem pontos de baixíssima rejeição. Tais pontos podem ser vulnerabilidades importantes em um sistema baseado neste IC.

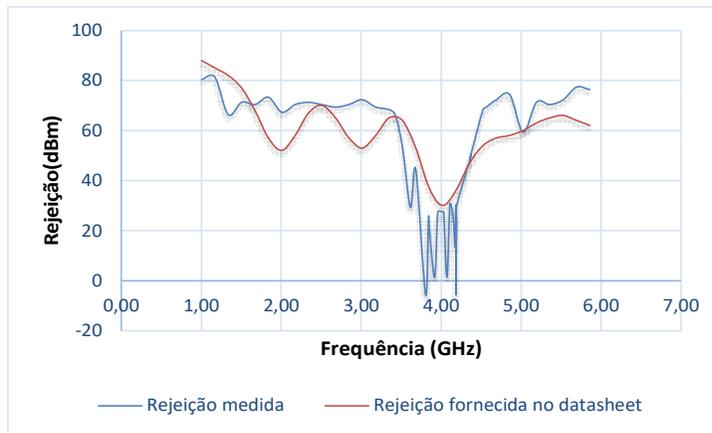


Figura 28 – Rejeição

### 4.1.3 CONSUMO DE POTÊNCIA

Nas tabelas xx e xx estão representadas o consumo de potência durante um ciclo de medição e o tempo de utilização estimado para algumas baterias comerciais.

Tabela 3 – Consumo de potência

<b>Consumo total (mAs)</b>	11,07064
<b>Consumo médio (mA)</b>	13,8383

Tabela 4 – Tempo de utilização estimado por bateria

<b>Capacidade nominal da bateria (mAh)</b>	<b>Capacidade utilizável (mAh)</b>	<b>Tempo provável de utilização (horas)</b>
<b>4000</b>	3200	231,2422769
<b>2400</b>	1920	138,7453661
<b>1500</b>	1200	86,71585383
<b>1300</b>	1040	75,15373998
<b>800</b>	640	46,24845537
<b>150</b>	120	8,671585383
<b>5000</b>	4000	289,0528461
<b>2000</b>	1600	115,6211384
<b>1200</b>	960	69,37268306

### 4.1.4 PRECISÃO NLOS

Foram obtidos erros aceitáveis nas situações descritas no capítulo anterior:

- Situação 1: 40–50 cm
- Situação 2: 70-80 cm

## 4.2 SISTEMA

Na Figura 29, podemos observar o hardware desenvolvido. A funcionalidade, objeto ou unidade de referência, é selecionada a partir de um dos switches. Além disso, existem elementos responsáveis por realizar a interface homem – máquina: leds, switches, buzzer e LCD. Os leds sinalizam qual a funcionalidade selecionada. O switch ativa ou

desativa os nós. O buzzer emite um alerta de proximidade. O LCD apresenta a distância medida em metros.



Figura 29 – Hardware implementado

A Figura 30 representa o ciclo de medição. Observou – se que o tempo necessário para se realizar um ciclo era de 4.48ms. Esse tempo é bastante compatível com sistemas em tempo real e possibilita a implementação de uma rede com um número grande de elementos.

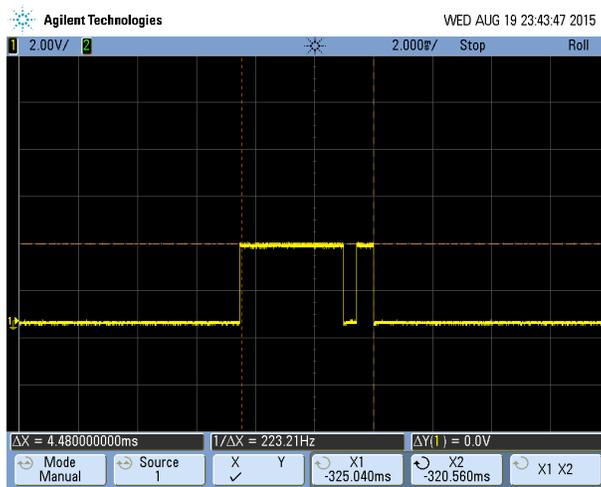


Figura 30 - Ciclo de medição

Neste ponto é importante ressaltar que o sistema funcionou de modo de desejado. Foram testadas diferentes configurações da rede:

- 1 unidade de referência – 1 Tag

- 1 unidade de referência – n Tags
- n unidade de referência - n Tags

Devido à alguns problemas enfrentados no desenvolvimento do firmware, que demandaram um tempo interessante, não foi possível realizar mais testes, como os realizados com o kit de avaliação. Entretanto, se verificou um funcionamento bastante aceitável.

## 5 CONCLUSÃO

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver um sistema de anticolisão baseado no padrão IEEE 802.15.4a. Esse padrão foi criado para possibilitar a implementação de sistemas de localização indoor utilizando sinais UWB como camada física. Entretanto, antes de realizar esse objetivo principal, foi necessário cumprir outras etapas. Em uma primeira etapa, foi realizado um estudo sobre técnicas e tecnologias de localização. Na segunda etapa, foram realizados testes no IC DW1000 da empresa Decawave, que foi escolhido para servir de base para implementar o sistema. E por fim, o sistema foi implementado.

Durante a primeira etapa foram estudadas as seguintes técnicas de localização: ToA, RSSI, AoA e TDoA. Observou – se que a precisão da técnica ToA é diretamente proporcional à banda passante do sinal e que essa técnica fornece como informação a distância entre os dois pontos. Tendo em consideração, a grande banda passante dos sinais UWB e a necessidade de se conhecer a distância entre os objetos, concluiu – se que essa técnica é a mais compatível com o sistema visado. Além disso, foram analisadas diferentes tecnologias para sistemas de localização: RFID, Wifi, GPS, Bluetooth e UWB. Observou-se que cada uma dessas tecnologias tem suas vantagens e desvantagens. Portanto, a escolha de uma dessas tecnologias não só depende da aplicação visada, mas também dos recursos disponíveis.

Na segunda etapa foram realizados os seguintes testes no IC DW1000: efeito da derivação de relógio, rejeição, consumo de potência e precisão NLOS. Apesar do resultado positivo encontrado nos outros testes, o teste de rejeição não apresentou um

resultado satisfatório. Foram encontrados pontos em que a rejeição possuía um nível muito baixo, em torno de -5dBm.

O sistema foi implementado utilizando o modulo DWM1000, pois este modulo possui o IC DW1000 já integrado com uma antena UWB. Foi criada uma rede com vários nós de dois tipos diferentes. Onde um primeiro tipo era responsável por fazer a medição da distancia e gerenciar a rede. Apesar da não disponibilidade tempo para realização de mais teste sobre sistema implementado, concluiu-se que o desempenho do sistema é satisfatório em relação aos objetivos do trabalho.

# Referências

ALENCAR, M. S.; DA ROCHA, V. C. **Communication systems**. [s.l.] Springer Science & Business Media, 2005.

ARSLAN, H.; CHEN, Z. N.; DI BENEDETTO, M.-G. **Ultra wideband wireless communication**. [s.l.] John Wiley & Sons, 2006.

DARDARI, D.; CLOSAS, P.; DJURIĆ, P. M. Indoor tracking: Theory, methods, and technologies. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 64, n. 4, p. 1263–1278, 2015.

**In Loco Media**. Disponível em: <<https://www.inlocomedia.com/>>. Acesso em: 9 abr. 2017.

JIMÉNEZ, A. R.; SECO, F. **Comparing Decawave and Bespoon UWB location systems: Indoor/outdoor performance analysis** Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2016 International Conference on. **Anais...IEEE**, 2016 Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7743686/>>. Acesso em: 5 abr. 2017

KARAPISTOLI, E. *et al.* An overview of the IEEE 802.15. 4a standard. **IEEE Communications Magazine**, v. 48, n. 1, 2010.

LEON-GARCIA, A. **Probability, Statistics, and Random Processes for Electrical Engineering**. [s.l.] Prentice Hall, 2008.

MALAJNER, M.; PLANINŠIČ, P.; GLEICH, D. **UWB ranging accuracy** 2015 International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP). **Anais... In: 2015 INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS, SIGNALS AND IMAGE PROCESSING (IWSSIP)**. set. 2015

MAUTZ, R. **Indoor positioning technologies**. [s.l.] ETH Zurich, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering, Institute of Geodesy and Photogrammetry Zurich, 2012.

SADIKU, M. N. **Elements of electromagnetics**. [s.l.] Oxford university press, 2014.  
SAHINOGLU, Z.; GEZICI, S.; GUVENC, I. Ultra-wideband positioning systems. **Cambridge, New York**, 2008.

SONG, Z.; JIANG, G.; HUANG, C. A survey on indoor positioning technologies. *In: Theoretical and Mathematical Foundations of Computer Science*. [s.l.] Springer, 2011. p. 198–206.

YASSIN, A. *et al.* Recent Advances in Indoor Localization: A Survey on Theoretical Approaches and Applications. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, 2016.

YAVARI, M.; NICKERSON, B. G. Ultra wideband wireless positioning systems. **Dept. Faculty Comput. Sci., Univ. New Brunswick, Fredericton, NB, Canada, Tech. Rep. TR14-230**, 2014.

ZAFARI, F. *et al.* An iBeacon based Proximity and Indoor Localization System.  
**arXiv:1703.07876 [cs]**, 22 mar. 2017.

