

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS - UEA
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA - EST

ITALO TONY DA COSTA ALVES

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM CONJUNTO DE ANTENAS PARA *DIRECTION*
FINDING UTILIZANDO BLUETOOTH 5.1**

Manaus

2022

ITALO TONY DA COSTA ALVES

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM CONJUNTO DE ANTENAS PARA *DIRECTION FINDING* UTILIZANDO BLUETOOTH 5.1

Pesquisa desenvolvida durante a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso I, apresentado à banca avaliadora do curso de Engenharia Elétrica da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas, como pré-requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Angilberto Muniz Ferreira Sobrinho

Manaus

2022

Universidade do Estado do Amazonas – UEA
Escola Superior de Tecnologia - EST

Reitor:

André Luiz Nunes Zogahib

Vice-Reitor:

Kátia do Nascimento Couceiro

Diretora da Escola Superior de Tecnologia:

Ingrid Sammyne Gadelha Figueiredo

Coordenador do Curso de Engenharia Elétrica:

Israel Gondres Torné

Banca Avaliadora composta por:

Data da defesa: 25/10/2022.

Prof. Dr. Angilberto Muniz Ferreira Sobrinho (Orientador)

Prof. Dr. Israel Gondres Torné

Prof. Me. Rubens de Andrade Fernandes

CIP – Catalogação na Publicação

ALVES, Italo Tony da Costa

Análise de desempenho de um conjunto de antenas para *Direction finding* utilizando o Bluetooth 5.1 / Italo Tony da Costa Alves; [orientado por] Angilberto Muniz Ferreira Sobrinho. – Manaus: 2022.
67 p.: il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade do Estado do Amazonas, 2022.

1. *Bluetooth Low Energy*. 2. *Antenas AoA*. 3. *Direction Finding*.
4. *Angle of Arrival*

I. Muniz Ferreira Sobrinho, Angilberto.

ITALO TONY DA COSTA ALVES

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM CONJUNTO DE ANTENAS PARA *DIRECTION FINDING* UTILIZANDO O BLUETOOTH 5.1

Pesquisa desenvolvida durante a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II e apresentada à banca avaliadora do Curso de Engenharia Elétrica da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas, como pré-requisito para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

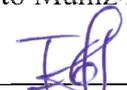
Nota obtida: 9,4 (Nove vírgula quatro -----)

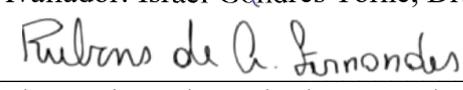
Aprovada em 25 / 10 / 2022.

Área de concentração: Sistemas Embarcados

BANCA EXAMINADORA


Orientador: Angilberto Muniz Ferreira Sobrinho, Dr.


Avaliador: Israel Gondres Torné, Dr.


Avaliador: Rubens de Andrade Fernandes, Me.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, primeiramente, pelo dom da vida e por me guiar até o presente momento.

Agradeço a minha mãe, por ser uma de mulher guerreira e estar ao meu lado com todo o seu amor e carinho.

Agradeço aos meus mestres de capoeira José Neto de Castro e Sidnei Oliveira de Andrade por todos os conselhos e momentos de apoio durante toda esta jornada, pois houve quedas, e assim como na capoeira, nós levantamos sorrindo.

Agradeço a minha família, por todo o apoio, amor e incentivo.

Agradeço ao professor Rubens de Andrade Fernandes, por toda a sua ajuda durante o desenvolvimento deste projeto, pela amizade e pelas oportunidades em que pudemos compartilhar conhecimentos.

Agradeço aos amigos Yago Costa de Oliveira e Lennon Brandão Freitas do Nascimento, por toda ajuda e suporte fornecido durante a realização deste projeto, pelos momentos de apoio e alegria.

Agradeço aos amigos Luís Eduardo Mena Barreto Pereira, Neilson Luniere Vilaça e Ruan Carlos Mota Teixeira, por todos os ensinamentos, pelos momentos de apoio e de alegria. Que venham muitos mais.

Agradeço a todos os amigos, professores e colegas do centro de pesquisa e desenvolvimento HUB - Tecnologia e Inovação, por todo o aprendizado adquirido e pela amizade.

RESUMO

A tecnologia Bluetooth é bastante utilizada nas soluções de proximidade. O *direction finding* é um recurso incorporado na especificação 5.1 da tecnologia Bluetooth, que nos permite desenvolver soluções em rastreamento e monitoramento de ativos com maior precisão. A localização dos dispositivos é feita em um processo de vários estágios, podendo ser utilizado dois métodos para a descoberta de direção. O método *Angle of Arrival (AoA)* nos permite medir o ângulo de chegada de um sinal, transmitido por outro dispositivo, em um receptor que contenha um *array* de antenas. Semelhante ao AoA, o método *Angle of Departure (AoD)*, nos permite realizar a medição do ângulo de partida de um sinal transmitido por um dispositivo que contenha um *array* de antenas, em um receptor de antena única. A antena é parte crucial de qualquer implementação com a tecnologia Bluetooth, sua escolha deve ser feita visando atender alguns requisitos para obter o melhor desempenho possível, ela deve ter alta precisão, alta sensibilidade, imunidade suficiente para ruídos, erros de polarização e propagação *multipath*. Dada a carência de estudos sobre o desempenho das antenas destinadas para o *direction finding* em sistemas de localização interna, neste trabalho, será desenvolvida uma plataforma de *hardware* com seu respectivo *firmware*, afim de comparar o desempenho de um *array* de antenas. O método para descoberta de direção a ser utilizado é o *Angle of Arrival*, assim, trabalharemos apenas nas duas dimensões para encontrar o ângulo a partir do plano do receptor. Com os resultados, discussões e conclusões deste trabalho, espera-se contribuir com um estudo destinado a análise de desempenho das antenas utilizadas em soluções que fazem o uso do recurso *direction finding*.

Palavras-chave: *Bluetooth Low Energy. Antenas AoA. Direction Finding. Angle of Arrival.*

ABSTRACT

Bluetooth technology is widely used in proximity solutions. The direction finding is a feature incorporated in the Bluetooth technology specification 5.1, which allows us to develop solutions in asset tracking and monitoring with higher accuracy. The location of the devices is done in a multi-stage process, and two methods can be used for direction finding. The Angle of Arrival (AoA) method allows us to measure the angle of arrival of a signal, transmitted by another device, at a receiver containing an array of antennas. Similar to AoA, the Angle of Departure (AoD) method allows us to measure the angle of departure of a signal transmitted by a device containing an array of antennas at a single antenna receiver. The antenna is a crucial part of any implementation with Bluetooth technology, its choice must be made aiming to meet some requirements to get the best possible performance, it must have high accuracy, high sensitivity, sufficient immunity to noise, polarization errors and multipath propagation. Given the lack of studies on the performance of antennas intended for direction finding in indoor localization systems, this work will develop a hardware platform with its respective firmware, in order to compare the performance of an antenna array. The direction finding method to be used is Angle of Arrival, so we will work only in two dimensions to find the angle from the receiver plane. With the results, discussions and conclusions of this work, it is expected to contribute with a study aimed at analyzing the performance of the antennas used in solutions that make use of the direction finding resource.

Keywords: *Bluetooth Low Energy. Antenas AoA. Direction Finding. Angle of Arrival.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1	Logotipo <i>Bluetooth Special Interest Group (Bluetooth SIG)</i>	18
2	<i>Piconets</i> com a conexão ponto-a-ponto, somente um escravo (a), a multiponto, com dois escravos (b) e a <i>scatternet</i> (c).	19
3	Formato do pacote Bluetooth BR.	20
4	Formato do pacote Bluetooth EDR.	20
5	Descrição de um cabeçalho Bluetooth.	21
6	<i>Constant Tone Extension</i>	25
7	Valores de fases e distância iguais em relação ao transmissor.	26
8	Valores de fases e distâncias diferentes em relação ao transmissor.	27
9	Representação polar do ângulo de fase ϕ e amplitude Q	28
10	Fases diferentes do sinal transmitido ao atingir antenas de receptores localizados a diferentes distâncias do transmissor.	28
11	Recepção do sinal no localizador utilizando o método AoA.	29
12	Cálculo do ângulo de incidência do sinal de rádio frequência (AoA).	30
13	Posicionamento do dispositivo transmissor com múltiplos <i>arrays</i> de antenas.	31
14	Diferentes tipos de <i>arrays</i> de antenas.	33
15	Representação do ângulo azimute ϕ e de elevação θ com um <i>array</i> de antenas URA.	34
16	Sistema de coordenadas esféricas padrão utilizado em medições de antenas.	35
17	Antenas dipolo são estruturas duais, produzindo padrões de campos idênticos, com as funções de E e H intercambiadas.	37
18	Representação geométrica do dipolo finito.	38
19	Representação de uma antena dipolo e sua distribuição de corrente.	38
20	Dois modelos diferentes de antenas dipolo da fabricante <i>Linx Technologies</i>	39
21	Projeção da perspectiva isométrica e vista lateral de uma antena <i>microstrip</i>	40
22	Formas geométricas de antenas <i>microstrip</i>	40
23	Modelos de antenas planares da fabricante <i>Linx Technologies</i>	41
24	(a) Configuração do campo em uma antena <i>microstrip</i> retangular; (b) Representação do campo magnético e da corrente de distribuição.	42
25	(a) Superfície de uma antena <i>microstrip</i> ; (b) Linhas de campo elétrico; (c) Constante dielétrica eficaz.	42
26	Diagrama dos parâmetros de espelhamento (S).	43
27	Arquitetura do <i>hardware</i> proposto.	44
28	<i>Arrays</i> de antenas 1 e 2, respectivamente, a) da Nordic Semiconductor; b) com antenas propostas por (YANG et al., 2016).	45
29	<i>Arrays</i> de antenas 3 e 4, respectivamente, propostas por a) (GHOSAL; CHAUDHURI, 2013); b) (SILICON LABS, 2020).	45

30	<i>Kit de desenvolvimento nRF52833 DK.</i>	46
31	<i>Software Altium Design.</i>	47
32	a) antena microstrip e b) dimensões da antena do <i>array 1.</i>	48
33	a) antena microstrip e b) dimensões da antena do <i>array 2.</i>	48
34	a) antena microstrip e b) dimensões da antena do <i>array 3.</i>	49
35	a) antena microstrip e b) dimensões da antena do <i>array 4.</i>	49
36	<i>Direction viewer.</i>	50
37	Medição dos parâmetros S22 e S21	52
38	Leiaute do ambiente de teste.	53
39	Posicionamento dos dispositivos BLE para os testes.	54
40	Ambiente de teste real mostrando o posicionamento dos dispositivos.	54
41	Parâmetro S22 para a antena do <i>array 1.</i>	56
42	Parâmetro S22 para a antena do <i>array 2.</i>	57
43	Parâmetro S22 para a antena do <i>array 3.</i>	58
44	Parâmetro S22 para a antena do <i>array 4.</i>	59
45	Parâmetro S21 de referência, obtido da calibragem do VNA com o <i>array 1.</i>	60
46	Parâmetro S21 para a antena do <i>array 2.</i>	60
47	Parâmetro S21 para a antena do <i>array 3.</i>	61
48	Parâmetro S21 para a antena do <i>array 4.</i>	61

LISTA DE TABELAS

1	Comparativo da velocidade do Bluetooth e outras tecnologias.	22
2	Comparativo entre o BLE e o Bluetooth Clássico (BR/EDR).	23
3	Compatibilidade entre os dispositivos de modo único (<i>single-mode</i>), modo duplo (<i>dual-mode</i>) e clássico (<i>classic</i>).	24
4	Ângulos de chegada (ϕ) dos sinais de rádio recebidos nos <i>arrays</i> 1, 2, 3 e 4.	62
5	Ângulos de elevação (θ) dos sinais de rádio recebidos nos <i>arrays</i> 1, 2, 3 e 4.	62
6	Erro médio absoluto dos ângulos de azimute obtidos dos <i>arrays</i> 1, 2, 3 e 4.	63
7	Erro médio absoluto dos ângulos de elevação obtidos dos <i>arrays</i> 1, 2, 3 e 4.	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SIG	<i>Special Interest Group</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indication</i>
Covid	<i>Corona Virus Disease</i>
ILS	<i>Internal Location System</i>
AoA	<i>Angle of Arrival</i>
AoD	<i>Angle of Departure</i>
PDA	<i>Personal Digital Assistant</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
ISM	<i>Industrial Scientific and Medical</i>
BR/EDR	<i>Basic Rate / Enhanced Data Rate</i>
PSK	<i>Phase Shift Keying</i>
DQPSK	<i>Differential Quadrature Phase Shift Keying</i>
DPSK	<i>Differencial Phase Shift Keying</i>
GFSK	<i>Gaussian Frequency Shift Keying</i>
PHY	<i>Physical Layer</i>
PSK	<i>Phase Shift Keying</i>
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i>
FHSS	<i>Frequencyhopping spread spectrum</i>
LE	<i>Low Energy</i>
HADM	<i>High Accuracy Distance Measurement</i>
HCI	<i>Host Controller Interface</i>
LL	<i>Link Layer</i>
IQ	<i>Phase and Quadrature</i>
CTE	<i>Constante Tone Extension</i>

CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
MIC	<i>Message Integrity Check</i>
ULA	<i>Uniform Linear Array</i>
URA	<i>Uniform Retangular Array</i>
UCA	<i>Uniform Circular Array</i>
2D	<i>Duas Dimensões</i>
3D	<i>Três Dimensões</i>
PCB	<i>Placa de circuito Impresso</i>
LSB	<i>Least Significant Bit</i>
MSB	<i>Most Significant Bit</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

μ	Letra grega Mi
φ	Letra grega Varphi
Φ	Letra grega Phi
λ	Letra grega Lambda
π	Letra grega Pi
Δ	Letra grega Delta
θ	Letra grega Teta
h	Altura do localizador em relação ao plano de referência ou comprimento de uma placa de circuito impresso
d	Distância entre duas antenas no <i>array</i> ou comprimento de uma antena dipolo
Q	Amplitude do sinal eletromagnético
a	Raio de uma antena dipolo cilíndrica
\vec{E}	Campo Elétrico
\vec{H}	Campo Magnético
I	Corrente elétrica
r	Distância entre duas antenas no sistema de coordenadas polares
r'	Distância entre duas antenas no sistema de coordenadas polares
L	Largura de antena <i>microstrip</i> retangular
t	Tempo ou comprimento de uma antena <i>microstrip</i> retangular
W	Altura de uma antena <i>microstrip</i>
ϵ_r	Constante dielétrica
ϵ_{ref}	Constante dielétrica eficaz
P	Potência elétrica
V	Tensão elétrica

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	15	
Tema	16	
Problema de pesquisa	16	
Hipótese	17	
Objetivos	17	
Objetivo geral	17	
Objetivos específicos	17	
Justificativa	17	
1	BLUETOOTH	18
1.1	Bluetooth Clássico BR/EDR	19
1.2	Bluetooth <i>Low Energy</i> (BLE)	21
1.2.1	BLE 5.1	24
1.2.1.1	Direction Finding	26
1.2.1.2	Amostragem	27
1.2.1.3	Angle of Arrival	29
2	ANTENAS	32
2.1	Arrays de Antenas	33
2.2	Sistema de Coordenadas	34
2.3	Antena Dipolo	36
2.4	Antena <i>Micostrip</i> Planar	39
2.4.1	Padrão de radiação	41
2.4.2	Ganhos dBi e dBd	42
2.4.3	Parâmetros de espelhamento ou parâmetros "S"	43
3	MATERIAIS E RECURSOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DO TRABALHO	44
3.1	Dispositivo nRF52833-DK	46
3.2	Software Altium Design	47
3.3	Dimensionamento das antenas	47
3.4	Firmware de testes	50
4	METODOLOGIA PROPOSTA PARA AVALIAÇÃO DOS ARRAYS DE ANTENAS	51
4.1	Metodologia para obtenção dos parâmetros S22 e S21	51
4.2	Metodologia para obtenção dos ângulos de chegada (AoA)	52
4.2.1	Ambiente e procedimentos dos testes para obtenção dos ângulos	52
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
5.1	Parâmetros de reflexão S22	55

5.2	Parâmetros S21	59
5.3	Ângulos de chegada	61
6	CONCLUSÃO	64
	REFERÊNCIAS	65

INTRODUÇÃO

A tecnologia Bluetooth viabiliza o surgimento de soluções para localização de objetos móveis (BLUETOOTH SIG, 2021). Nesse contexto, existem soluções baseadas em proximidade que visam estimar a posição de um objeto em relação a outros objetos. Por meio da intensidade do sinal recebido, conhecido em inglês como *Received Signal Strength Indication (RSSI)*, consegue-se avaliar o alcance entre ambos os dispositivos, podendo estimar a distância entre eles.

Apesar da desaceleração no mercado de dispositivos Bluetooth causada pela pandemia da Covid-19, há uma forte demanda por conectividade e soluções de localização. De acordo com a atualização do mercado Bluetooth de 2022, 7 bilhões de dispositivos de serviços de localização Bluetooth serão enviados anualmente até 2026 (BLUETOOTH SIG, 2022c).

Existe um grande benefício em determinar a localização precisa de uma pessoa ou de um dispositivo em ambientes internos, por exemplo, localizar as bagagens de um passageiro no aeroporto, ou a posição de paletes, empilhadoras e trabalhadores em uma fábrica, ou até mesmo os equipamentos e pacientes em um hospital, ajudando a melhorar a segurança e garantir uma otimização do tempo de atendimento. Nesse contexto, existem muitas aplicações a serem consideradas, desde o acompanhamento dos funcionários de uma linha de produção até o monitoramento da evolução dos produtos no processo de fabricação (WOOLLEY, 2019).

Alguns aplicativos de *smartphones* usam a intensidade do sinal (RSSI) para estimar a distância do *smartphone* em uso até um dispositivo Bluetooth ativo, mas sem informações precisas de direções. Segundo (PAU et al., 2021), embora o Bluetooth Received Signal Strength Indicator (RSSI) possa ser empregado para medir o alcance de uma posição reconhecida, frequentemente, esta metodologia não é precisa para fins como um *Indoor Location System (ILS)* e rastreabilidade de recursos. Por outro lado, um recurso de *direction finding* que atualizasse a localização de um dispositivo continuamente permitiria o surgimento de soluções capazes de encontrar, com alta precisão, outros dispositivos ativos com este recurso.

Segundo a (BLUETOOTH SIG, 2021), a versão mais recente do Bluetooth *Core Specification* recebeu aprimoramento para que o cálculo da direção de um sinal de rádio receptado possa ser realizado por um *hardware* que contenha um conjunto de antenas. Este aprimoramento foi denominado *direction finding*. Com isso, as soluções Bluetooth que possuem sistemas de localização e proximidade poderão operar em níveis de precisão a centímetros (BLUETOOTH SIG, 2022c). Dessa forma, novos casos de uso podem ser implementados, como posicionamento interno, orientação de objetos, rastreamento de dispositivos, localização de objetos e descoberta direcional.

A orientação espacial é uma expressão que não tem uma compreensão exata na língua inglesa, onde é denominada "*wayfinding*" (LOCATELLI, 2007, pg-28). Apesar deste conceito já ser bastante difundido, nos dias atuais, há diversas definições que podem ser encontradas em citações realizadas por pesquisadores. Orientação espacial também pode ser a capacidade que o indivíduo tem de situar-se e orientar-se, em relação aos objetos, às pessoas e o seu próprio corpo

em um determinado espaço. É saber localizar o que está à direita ou à esquerda; à frente ou atrás; acima ou abaixo de si, ou ainda, um objeto em relação a outro. É ter noção de longe, perto, alto, baixo, longo e curto (ASSUNÇÃO; COELHO, 1996, pg 91-96).

O termo orientação espacial indica conhecimento sobre onde a pessoa está e como chegar a um determinado lugar de destino (CARPMAN; GRANT, 2002). Numa abordagem mais genérica, argumenta-se que a orientação espacial deveria ser vista como sendo uma interface de decisões navegacionais vinculadas a um plano de viagem (GÄRLING; GOLLEDGE, 1989).

O método, adotado neste trabalho, para a descoberta de direção de um dispositivo foi o *Angle of Arrival (AoA)*. Segundo a (SILICON LABS, 2020), o AoA conta com um sinalizador de transmissão de antena única com extensão de tom contínuo anexado a uma transmissão de pacote Bluetooth e um dispositivo receptor localizador para medir o ângulo de chegada do sinal usando um conjunto de antenas. Nesse contexto, buscou-se fazer a descoberta do ângulo em duas dimensões, visando o ângulo azimutal, correspondente ao horizonte do observador, que neste caso será o receptor.

Há uma carência, no mercado, da disponibilidade de antenas destinadas para o sistema de localização interna que utiliza o recurso *direction finding* contido nas especificações mais recentes da tecnologia Bluetooth. Com isso, fica mais difícil encontrar pesquisas que nos forneçam resultados a respeito do desempenho dessas antenas.

Nesse trabalho, as implementações dos conceitos de *direction finding* e Bluetooth 5.1 estarão restritas ao desenvolvimento de *hardwares* especializados que contenham um conjunto de antenas. O experimento em campo permitirá avaliar o desempenho destes *arrays* de antenas, em termos de ângulo de chegada e dos parâmetros de espelhamento S22 e S21, afim de obter respostas em relação aos seus comportamentos.

TEMA

Análise de desempenho de um conjunto de antenas para *direction finding* utilizando Bluetooth 5.1.

PROBLEMA DE PESQUISA

Há poucos estudos que fazem análises, em ambientes de testes comuns, de desempenho das antenas destinadas ao *direction finding* na especificação do Bluetooth 5.1. Com isso, ainda existem dificuldades para estipular o melhor conjunto de antenas para aplicações práticas neste tema.

HIPÓTESE

Utilizando o método *angle of arrival* de *direction finding* na especificação 5.1 do Bluetooth, é possível analisar o desempenho de um *array* de antenas para esta finalidade através de uma plataforma de *hardware* e seu respectivo *firmware*.

OBJETIVOS

Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho de *arrays* de antenas pelo método *angle of arrival* de *direction finding* da comunicação Bluetooth 5.1.

Objetivos específicos

- a) definir contornos conceituais da tecnologia *Bluetooth Low Energy*;
- b) estudar soluções para o posicionamento interno utilizando *direction finding*;
- c) estudar métodos de posicionamento interno para *direction finding*;
- d) projetar e implementar plataformas que comportem antenas para *direction finding*;
- e) realizar análises dos resultados obtidos, com relação ao ângulo de chegada e os parâmetros de espelhamento S22 e S21, a respeito do desempenho dos *arrays* de antenas para *direction finding*.

JUSTIFICATIVA

Foi perceptível que o Bluetooth *direction finding* poderia ser utilizado para apresentar uma alternativa de um sistema de posicionamento interno. Este sistema pode ser utilizado para o orientação e monitoramento de ativos. Desta forma, é possível rastrear objetos perdidos de usuários e até monitorar produtos nas etapas de produção.

A elaboração de uma plataforma destinada para aplicação do Bluetooth *direction finding* colabora com inserção de estruturas voltadas ao contexto de rastreamentos de ativos em ambientes internos, afim de que esta opere de maneira eficiente e alta precisão nos mais diversos ambientes.

Além disso, esta proposta viabiliza a análise de desempenho das antenas através dos parâmetros de espelhamento S22 e S21 voltados para aplicação do *direction finding* na especificação 5.1 do Bluetooth, utilizando o método *angle of arrival* para a descoberta de direção de dispositivo. Em vista disso, novas aplicações podem ser estudadas ou aprimoradas, aplicações estas que podem ser o rastreamento e o monitoramento de dispositivos pessoais, pacotes de correspondência, produtos na linha de produção, entre outros.

1 BLUETOOTH

O padrão bluetooth vem evoluindo ao longo dos anos. Este padrão surgiu em decorrência de uma necessidade de criar uma conexão sem fio entre computadores e dispositivos. O grupo *Bluetooth Special Interest Group (Bluetooth SIG)*, Figura 1, originou-se por meio de um consócio de empresas para promover e definir a especificação Bluetooth.

O Bluetooth SIG foi fundado em fevereiro de 1998 pelas empresas: Ericsson Mobile, Communications AB, Intel Corporation, IBM Corporation, Toshiba Corporation e Telemóveis Nokia. Em maio de 1998, estas empresas anunciaram publicamente o *SIG global* e convidaram outras empresas a aderir ao SIG como adotantes do Bluetooth em troca de um compromisso de suporte à especificação Bluetooth. Em julho de 1999, foi publicada a versão 1.0 da especificação Bluetooth (BLUETOOTH SIG, 2022b). Em dezembro de 1999, o grupo Bluetooth SIG ampliou com a adição de mais quatro grandes empresas: Microsoft, Lucente, 3COM e Motorola (BRAY; STURMAN, 2001).

Figura 1 – Logotipo *Bluetooth Special Interest Group (Bluetooth SIG)*.



Fonte: (WOOLLEY, 2019)

O Bluetooth é uma norma para comunicações sem fios de curto alcance, baixa potência e baixo custo, que utiliza tecnologia de rádio. A capacidade incorporada do Bluetooth está a se tornar generalizada em numerosos tipos de dispositivos. Estes incluem dispositivos inteligentes (*Personal Digital Assistant (PDA)*), telemóveis, Computadores, etc.), periféricos de dados (mouses, teclados, joysticks, câmeras, canetas digitais, impressoras, pontos de acesso LAN, etc.), periféricos de áudio (fones de ouvidos, alto-falantes, receptores estéreo, etc.) e aplicações incorporadas (fechaduras de automóveis, sistemas industriais, instrumentos musicais, etc.) (MCDERMOTT-WELLS, 2005).

As soluções habilitadas para o Bluetooth agora serão capazes de aproximá-lo dos itens que você está procurando. As soluções atuais de localização de itens, como os *Tile Trackers*, que são dispositivos alimentados por baterias, muitas vezes referidos como etiquetas de propriedade pessoal, que podem ser anexadas a objetos móveis como um conjunto de chaves ou uma carteira. Essas soluções ajudam os consumidores a localizar itens extraviados. Caso o item esteja conectado a uma *tag* Bluetooth, um aplicativo em seu *smartphone* pode avisá-los se o item está próximo. (BLUETOOTH SIG, 2021).

Com os novos recursos de busca de direção Bluetooth, as soluções de busca de itens podem ser aprimoradas para fornecer informações direcionais. Com o suporte de localização de direção, além de identificar o quão perto está um item extraviado, um aplicativo de localização de

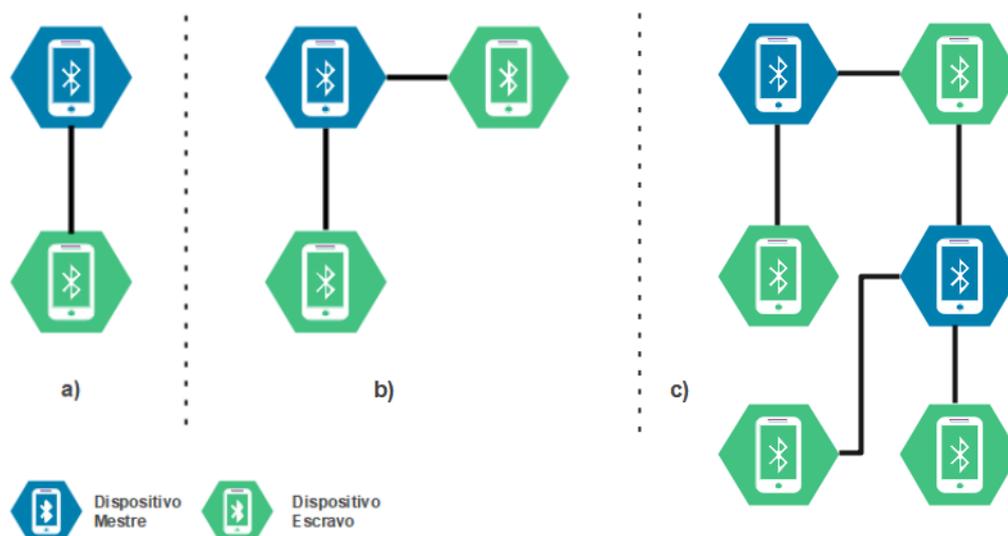
itens em um *smartphone* também poderia determinar a direção do item, melhorando a experiência do usuário (BLUETOOTH SIG, 2021).

1.1 BLUETOOTH CLÁSSICO BR/EDR

O Bluetooth Clássico, também conhecido como Bluetooth *Basic Rate/Enhanced Data Rate* (BR/EDR), é um rádio de baixa potência que transmite dados em 79 canais na banda de frequência Industrial, Científica e Médica (ISM) não licenciada de 2,4 GHz. Suportando comunicação de dispositivo ponto a ponto, o Bluetooth Clássico é usado principalmente para permitir *streaming* de áudio sem fio e se tornou o protocolo de rádio padrão por trás de alto-falantes sem fio, fones de ouvido e sistemas de entretenimento no carro (BLUETOOTH SIG, 2022a).

O sistema Bluetooth fornece uma conexão ponto-a-ponto (*point-to-point*) ou multiponto (*point-to-multipoint*). Uma rede *piconet* é formada quando dois ou mais dispositivos compartilham o mesmo canal físico, um dos dispositivos atua como mestre (*master*), enquanto que os demais atuam como escravo (*slave*). Neste contexto, mestre é um dispositivo que coordena as atividades dos dispositivo escravo, e escravo é um dispositivo simples, geralmente de propósito único, que funciona de acordo com o controle do mestre. Uma *scatternet* é formada por *piconets* que possuem dispositivos em comum. Na Figura 2, é possível observar que na conexão ponto-a-ponto, o canal físico é compartilhado entre dois dispositivos Bluetooth. Na conexão multiponto, o canal físico é compartilhado entre vários dispositivos Bluetooth (BLUETOOTH SIG, 2019).

Figura 2 – *Piconets* com a conexão ponto-a-ponto, somente um escravo (a), a multiponto, com dois escravos (b) e a *scatternet* (c).



Fonte: Adaptado (BLUETOOTH SIG, 2019)

Dois modos de transmissão de dados são definidos: *Basic Rate* (BR) que usa uma modulação de frequência binária (FM) moldada para minimizar a complexidade do transceptor e *Enhanced Data Rate* (EDR) que usa a modulação *Phase Shift Keying* (PSK) e tem duas variantes adicionais: $\pi/4$ - Codificação de Deslocamento de Fase em Quadratura Diferencial (DQPSK) e Codificação de Deslocamento de Fase Diferencial (DPSK) (ZEADALLY; SIDDIQUI; BAIG, 2019).

O modo *Basic Rate* (BR) é uma parte obrigatória da especificação Bluetooth. A modulação é GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*) com produto de período de largura de banda $BT=0,5$. O índice de modulação é 0,32. Você pode ver o formato do pacote Bluetooth BR na Figura 3 (MIKULKA; HANUS, 2008).

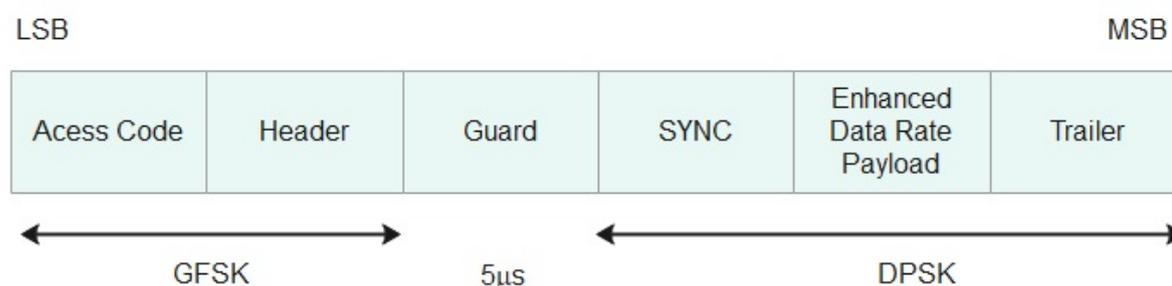
Figura 3 – Formato do pacote Bluetooth BR.



Fonte: Adaptado (MIKULKA; HANUS, 2008)

Segundo (MIKULKA; HANUS, 2008), uma característica chave do modo *Enhanced Data Rate* é que o esquema de modulação é alterado dentro do pacote, Figura 4. O código de acesso e o cabeçalho do pacote, Figura 5, são transmitidos com o esquema de modulação GFSK de taxa básica de 1 Mbit/s, enquanto a sequência de sincronização subsequente (SYNC), *payload* e trailer são transmitidas usando o esquema de modulação PSK do *Enhanced Data Rate*.

Figura 4 – Formato do pacote Bluetooth EDR.



Fonte: Adaptado (MIKULKA; HANUS, 2008)

Figura 5 – Descrição de um cabeçalho Bluetooth.



Fonte: Adaptado (MIKULKA; HANUS, 2008)

A taxa máxima de bits do símbolo físico para a modulação de *Enhanced Data Rate* (EDR), que usa DPSK, é de 3 Mbps PHY. O EDR também suporta 2 Mbps PHY. No total, existem três taxas PHY em Bluetooth: 1 Mbps (GFSK), 2 Mbps (2-EDR, 4-DPSK), e 3 Mbps (3-EDR, 8-DPSK) (BHALLA; HAGGAI, 2021). PHY é a camada física que define os meios de transmissão de um fluxo de bits por meio de enlaces de dados. Alguns dispositivos específicos que exigem alta taxa de transferência de dados continuam fazendo o uso do Bluetooth Clássico, por exemplo, o fone de ouvido Bluetooth. Para estes dispositivos, o Bluetooth *Low Energy* não oferece muitos benefícios.

Segundo (CHADHA; SINGH; PARDESHI, 2013), todos os dispositivos que estão envolvidos numa conversação eletrônica são necessários para saber sobre o significado de bits recebidos e transmitidos e a integridade da mensagem recebida, quer seja a mesma que a mensagem enviada. Isto implica no desenvolvimento de uma grande coleção de comandos e respostas que é conhecida como protocolo. Alguns tipos de produtos têm um protocolo padrão que é utilizado, virtualmente, por todas as empresas, por isso os comandos de um produto tenderá a causar o mesmo efeito em outro produto.

1.2 BLUETOOTH *LOW ENERGY* (BLE)

O Bluetooth *Low Energy* (BLE), também comercializado como Bluetooth *Smart*, começou como parte do Bluetooth 4.0 *Core Specification*, em junho de 2010. A especificação já estava sendo feita há vários anos e a maioria das decisões controversas foram, finalmente, tomadas pelas empresas envolvidas no processo de desenvolvimento, com algumas preocupações adicionais a serem tratadas em atualizações subsequentes. Originalmente, concebido pela Nokia como Wibree antes de ser adotado pelo Grupo de Interesse Especial (SIG), os autores não estavam tentando propor outra solução *wireless*, que amplamente resolveria todos os problemas possíveis, mas sim, um padrão de rádio com o mais baixo consumo de energia possível. (TOWNSEND et al., 2014).

O objetivo do BLE era estabelecer um padrão de rádio contendo baixo consumo de energia, custo, largura de banda e complexidade. Numa direção diferente do Bluetooth Clássico, o BLE foi otimizado para o consumo energético de baixa potência. Isto significa que, prova-

velmente, não obteria taxas de dados elevadas, ou manteria sua conexão durante muitas horas ou dias. Isto é interessante, uma vez que as tecnologias de comunicação *wireless* ou cabeadas, buscam aumentar a velocidade da informação, o BLE trouxe uma proposta diferente, reduzindo a velocidade para a operação em baixo consumo, como podemos visualizar na Tabela 1 (HEYDON; HUNN, 2012).

Tabela 1 – Comparativo da velocidade do Bluetooth e outras tecnologias.

Bluetooth	Wi-Fi	Ethernet	Modems
V1.1: 1 Mbps	802.11: 2 Mbps	802.3i: 10 Mbps	V.21: 0.3 kbps
V2.0: 3 Mbps	802.11b: 11 Mbps	802.3u: 100 Mbps	V.22: 1.2 kbps
V3.0: 54 Mbps	802.11g: 54 Mbps	802.3ab: 1000 Mbps	V.32: 9.6 kbps
V4.0: 1 Mbps	802.11n: 135 Mbps	802.3an: 10000 Mbps	V.34: 28.8 kbps

Fonte: Adaptado (HEYDON; HUNN, 2012)

Na Tabela 2, podemos visualizar as características que diferem o Bluetooth *Low Energy* do Bluetooth Clássico. Para viabilizar um produto de baixo custo, como no caso do BLE, é necessário reduzir os materiais utilizados na fabricação. A substituição de uma bateria custa dinheiro, pois para o consumidor, futuramente, haverá a necessidade de realizar uma troca por outra bateria nova. Se este dispositivo integrar algum sistema mantido por terceiro, por exemplo, um sistema de alarme, haverá custos, adicionais, de mão-de-obra referentes as substituições das baterias. Logo, a concepção do BLE em torno do baixo consumo de energia também gera uma redução nos custos.

Segundo (TOWNSEND et al., 2014), o BLE teve uma taxa de adoção rápida, e o número de *designs* de produtos, que incluíram o BLE, colocaram-o bem à frente de outras tecnologias *wireless* no mesmo período de lançamento. Em comparação com outras tecnologias *wireless*, o rápido crescimento do BLE estava relacionado ao fato de que seu destino estava intimamente ligado ao constante crescimento dos *smartphones*, *tablets* e *notebooks*.

Tabela 2 – Comparativo entre o BLE e o Bluetooth Clássico (BR/EDR).

	Bluetooth <i>Low Energy</i> (BLE)	Bluetooth Clássico (BR/EDR)
Faixa de frequência	Banda ISM de 2,4 GHz (2,402 – 2,480 GHz utilizada)	Banda ISM de 2,4 GHz (2,402 – 2,480 GHz utilizada)
Canais	40 canais com espaçamento de 2 MHz (3 canais de publicidade/ 37 canais de dados).	79 canais com espaçamento de 1 MHz
Uso do canal	Espectro de propagação de salto de frequência (FHSS)	Espectro de propagação de salto de frequência (FHSS)
Modulação	GFSK	GFSK, $\pi/4$ DQPSK, 8DPSK
Taxa de dados	LE 2M PHY: 2 Mb/s LE 1M PHY: 1 Mb/s LE Codificado PHY (S=2): 500 Kb/s LE Codificado PHY (S=8): 125 Kb/s	EDR PHY (8DPSK): 3 Mb/s EDR PHY ($\pi/4$ DQPSK): 2 Mb/s BR PHY (GFSK): 1 Mb/s
Potência Tx	≤ 100 mW (+20 dBm)	≤ 100 mW (+20 dBm)
Sensibilidade Rx	LE 2M PHY: ≤ -70 dBm LE 1M PHY: ≤ -70 dBm LE codificado PHY (S=2): ≤ -75 dBm LE codificado PHY (S=8): ≤ -82 dBm	≤ -70 dBm
Transportes de dados	Conexão assíncrona - orientada Conexão isócrona - orientada <i>Asynchronous connectionless</i> <i>Synchronous connectionless</i> <i>Isochronous connectionless</i>	Conexão assíncrona - orientada Conexão síncrona - orientada
Topologias de comunicação	<i>Point-to-Point</i> (incluindo <i>piconet</i>) <i>Broadcast</i> <i>Mesh</i>	<i>Point-to-Point</i> (incluindo <i>piconet</i>)
Recursos de posicionamento	<i>Presence: Advertising</i> Direção: RSSI, HADM (<i>Coming</i>) Distância: <i>Direction Finding (AoA/AoD)</i>	Nenhum

Fonte: Adaptado (BLUETOOTH SIG, 2022a)

Dois tipos de dispositivos podem ser construídos com a tecnologia BLE: Modo duplo (*dual mode*) e modo único (*single mode*). O dispositivo Bluetooth de modo duplo comporta tanto o Bluetooth Clássico como o BLE. O dispositivo de modo único suporta apenas o BLE. Ainda existe um terceiro dispositivo, que embarca exclusivamente o Bluetooth Clássico. A maioria dos

controladores dos dispositivos de modo duplo são peças de substituição para os controladores dos dispositivos que embarcam apenas o Bluetooth clássico. Isto permite a substituição, rapidamente, dos controladores Bluetooth Clássico existentes por controladores de modo duplo.

Na Tabela 3, podemos visualizar quais os tipos de dispositivos podem realizar a comunicação entre si. Um dispositivo de modo único se comunicaria, em baixo consumo, com outros dispositivo de modo único e de modo duplo. Um dispositivo de modo duplo se comunicaria, em baixo consumo, apenas com o dispositivo de modo único, enquanto que com os dispositivos clássicos, a comunicação seria usando BR/EDR. Um dispositivo clássico se comunicaria, apenas, com outro dispositivo clássico.

Tabela 3 – Compatibilidade entre os dispositivos de modo único (*single-mode*), modo duplo (*dual-mode*) e clássico (*classic*).

	Modo Único	Modo Duplo	Clássico
Modo Único	LE	LE	Nenhum
Modo Duplo	LE	Clássico	Clássico
Clássico	Nenhum	Clássico	Clássico

Fonte: Adaptado (HEYDON; HUNN, 2012)

1.2.1 BLE 5.1

A atualização para a especificação 5.1 do Bluetooth Low Energy introduziu modificações em seu protocolo, bem como outras características. O recurso de detecção de direção (*direction finding*), foi adicionado, tornando possível determinar a direção de um sinal de rádio transmitido por um outro dispositivo.

O *direction finding* introduzido nesta especificação pode ser explorado por meio de dois métodos diferentes. O primeiro é o *Angle of Arrival (AoA)*, conhecido como ângulo de chegada e o segundo é o *Angle of Departure (AoD)*, conhecido como ângulo de partida.

Segundo (WOOLLEY, 2019), a funcionalidade *direction finding* utiliza a amostragem em fase e em quadratura (IQ) para medir o ângulo de fase das ondas de rádio que incidem sobre uma antena num momento específico. No método AoA, a amostragem é aplicada a cada antena do *array*, uma de cada vez, e em alguma sequência adequada, dependendo do desenho da matriz.

Segundo (SILICON LABS, 2022), para poder encontrar a direção do sinal transmitido por uma antena a partir das diferenças de fase, um sinal não modulado deve ser transmitido pelo emissor-transmissor. A transmissão de um sinal de onda contínua durante muito tempo não é recomendada fora dos ambientes de teste, porque tem um espectro muito agudo e pode causar interferências graves com outros dispositivos que funcionam na gama de frequências de 2,4 GHz.

As camadas de *Host Controller Interface (HCI)* e de *Link Layer (LL)* sofreram mudanças

para viabilizar a amostragem IQ. Na camada *Link Layer* foi definido um novo campo, Figura 6, denominado *Constant Tone Extension (CTE)*, que tem por objetivo fornecer a frequência e comprimento de onda constantes para que a amostragem IQ possa ser realizada.

Figura 6 – *Constant Tone Extension*.



Fonte: Adaptado (WOOLLEY, 2019)

O CTE consiste, unicamente, de uma série de símbolos, cada um representado pelo número binário 1. O número de símbolos contidos no CTE podem ser configurados por camadas superiores da pilha de protocolos para que uma quantidade adequada de dados e tempo esteja disponível para a amostragem IQ a ser realizada pelo receptor, cujas capacidades de amostragem pode variar (WOOLLEY, 2019).

As frequências que o Bluetooth utiliza, dentro de um canal de rádio selecionado, são obtidas adicionando ou subtraindo um valor conhecido como o desvio de frequência para a frequência central do canal. A alteração da frequência, também, altera o comprimento de onda, que é um fator crítico no cálculo de uma direção a partir de amostras IQ.

Todos os pacotes BLE incluem um campo conhecido como verificação de redundância cíclica ou, em inglês, *Cyclic Redundancy Check (CRC)*. O CRC é um valor utilizado para a detecção de erros. O dispositivo transmissor calcula um valor CRC a partir do restante do pacote a ser transmitido, adiciona-o ao fim do pacote e envia-o. O dispositivo receptor executa o mesmo cálculo e compara o CRC calculado com o CRC no final do pacote recebido. Se houver diferenças entre os cálculos é porque ocorreu um erro de comunicação que mudou um ou mais bits durante a transmissão. No final, o pacote recebido é ignorado pelo receptor.

Se uma conexão for encriptada e autenticada, a camada *link layer PDU* inclui uma *Message Integrity Check (MIC)*. O MIC é utilizado para autenticar o remetente do PDU. O CTE em pacotes de *direction finding* não está incluído no cálculo do MIC.

Os sistemas de radiocomunicações baseados em chaves de desvio de frequência, incluindo Bluetooth, utilizam, frequentemente, um processo conhecido como *whitening* para codificar os bits, de modo a evitar sequências longas de zeros no fluxo de bits transmitido. Isto é feito porque existe o risco destas sequências causarem a perda do bloqueio de frequência do receptor, podendo ocorrer o deslocamento da frequência central para cima ou para baixo. O BLE usa o *whitening* para codificar os campos PDU e CRC de todos os pacotes da camada *link layer*.

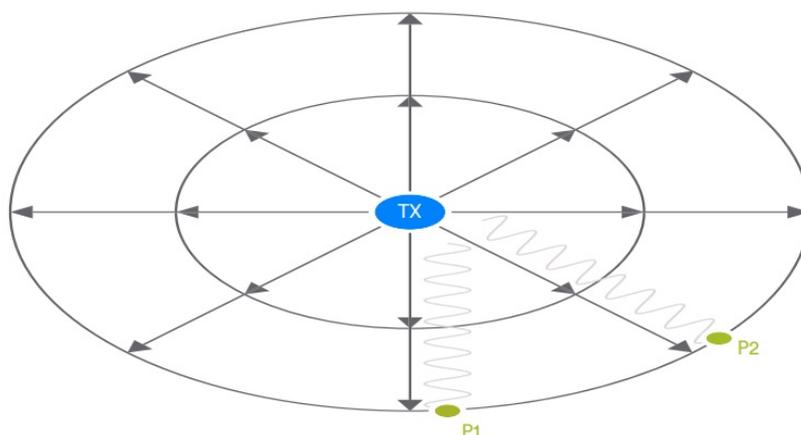
1.2.1.1 Direction Finding

O recurso *direction finding* explora algumas propriedades fundamentais das ondas de rádio ao adquirir dados que serão utilizados no cálculo da descoberta de direção dos dispositivos. Estes dados são aplicados nos cálculos de trigonometria e nos que envolvem o dimensionamento do *array* de antenas.

As ondas de rádio, transmitidas por um transmissor, podem viajar na velocidade da luz em três dimensões. A frente de onda do sinal que propaga possui uma amplitude que se reduz, progressivamente, à medida que a energia contida na transmissão se espalha por uma área de superfície cada vez maior.

Na Figura 7, é possível visualizar a propagação de ondas emitidas por um transmissor até os pontos p1 e p2. A mesma onda passa por p1 e p2, e estes pontos possuem a mesma distância em relação ao transmissor, a fase medida em p1 deverá ser igual a de p2, se esta medição ao mesmo intervalo de tempo em ambos os pontos.

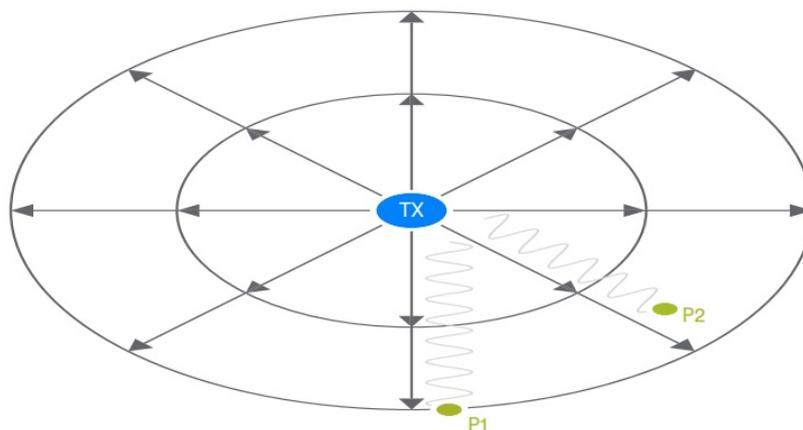
Figura 7 – Valores de fases e distância iguais em relação ao transmissor.



Fonte: (WOOLLEY, 2019)

Se movermos o ponto p2, com o objetivo de aproximá-lo do transmissor, Figura 8, de modo que as distâncias entre os pontos p1 e p2 até o transmissor não sejam um múltiplo exato do comprimento de onda, as fases medidas em p1 e p2 no mesmo intervalo de tempo terão valores diferentes.

Figura 8 – Valores de fases e distâncias diferentes em relação ao transmissor.



Fonte: (WOOLLEY, 2019)

Segundo (WOOLLEY, 2019), o ângulo do sinal pode ser calculado por meio da trigonometria, se soubermos a distância entre p_1 e p_2 em linha reta, a diferença entre suas fases e o comprimento de onda do sinal transmitido.

Existem dois métodos para descoberta de direção de um dispositivo. No primeiro método, denominado *Angle of Arrival (AoA)*, o dispositivo a ser localizado transmite um sinal que será recebido por localizadores, desta forma, os localizadores calculam a direção relativa do dispositivo. No segundo método, denominado *Angle of Departure (AoD)*, o dispositivo a ser localizado recebe sinais transmitidos por localizadores, desta forma, esses dispositivos calculam a direção relativa do localizador (SILICON LABS, 2022).

Ambos os métodos estabelecem uma estrutura padrão para posicionamento em ambientes internos. A aplicação destes métodos baseiam em encontrar os ângulos de chegada e partida dos sinais de radiofrequência. Os sistemas de estimativa angular dependem de antenas e processamento de fase. a organização de múltiplas antenas (ou seja, elementos de matriz) resulta em fase atrasos, que podem ser utilizados para o cálculo das direções do sinal (WIELANDT; STRYCKER, 2017).

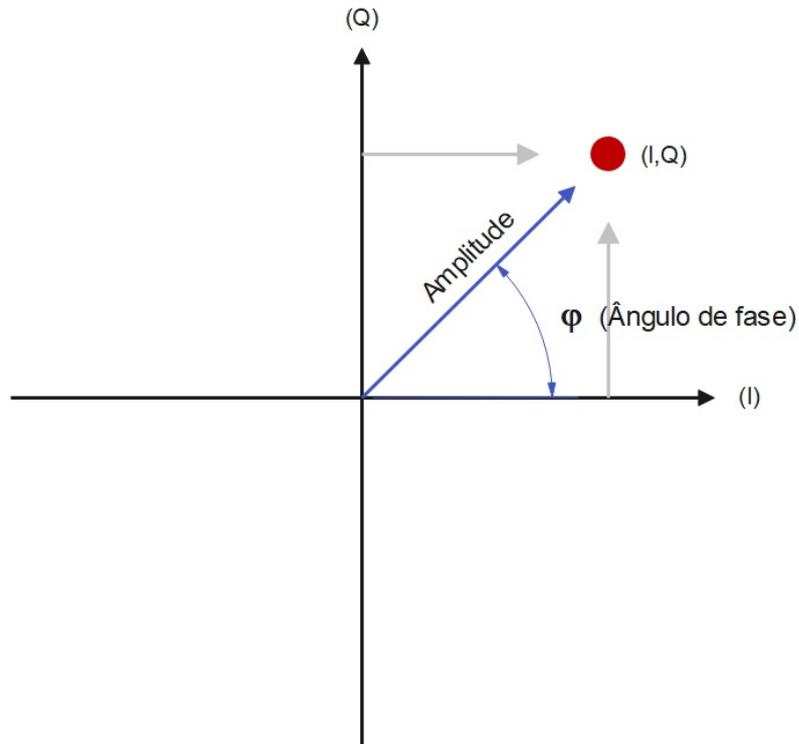
1.2.1.2 Amostragem

O *direction finding* faz o uso da amostragem IQ para medir o ângulo de fase (φ) e a amplitude (Q) do sinal transmitido que chega em um receptor. Uma única amostra IQ é composta pela amplitude e o ângulo de fase da onda senoidal representada por um conjunto de coordenadas cartesianas, Figura 9. Dessa maneira, a representação cartesiana pode ser transformada numa representação polar, composta pelo ângulo de fase e o valor de amplitude.

As amostras IQ obtidas por um localizador que comporta um array de antenas, no método AoA, são atribuídas a cada uma das antenas localizadas no *array*. Esta amostragem

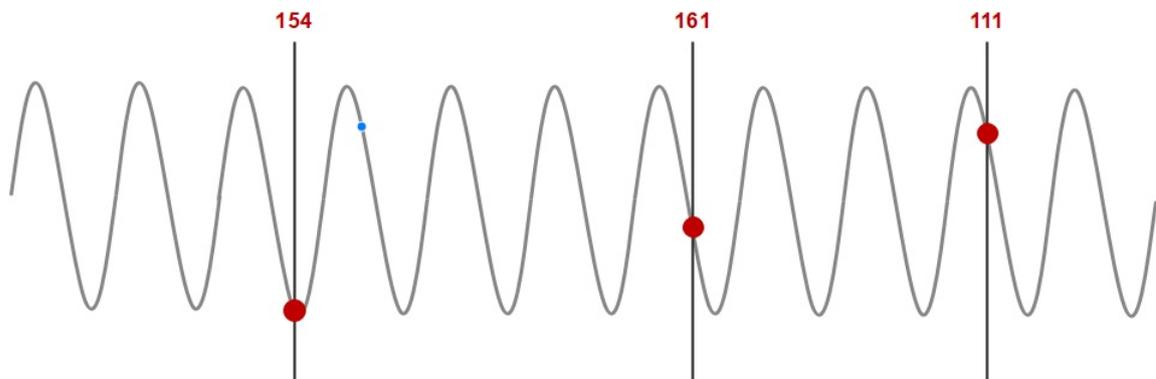
é realizada seguindo uma determinada sequência. Segundo (WOOLLEY, 2019), o dispositivo receptor continua realizando a amostragem IQ, independentemente do método de descoberta de direção escolhido.

Figura 9 – Representação polar do ângulo de fase φ e amplitude Q.



Fonte: Adaptado (WOOLLEY, 2019)

Figura 10 – Fases diferentes do sinal transmitido ao atingir antenas de receptores localizados a diferentes distâncias do transmissor.

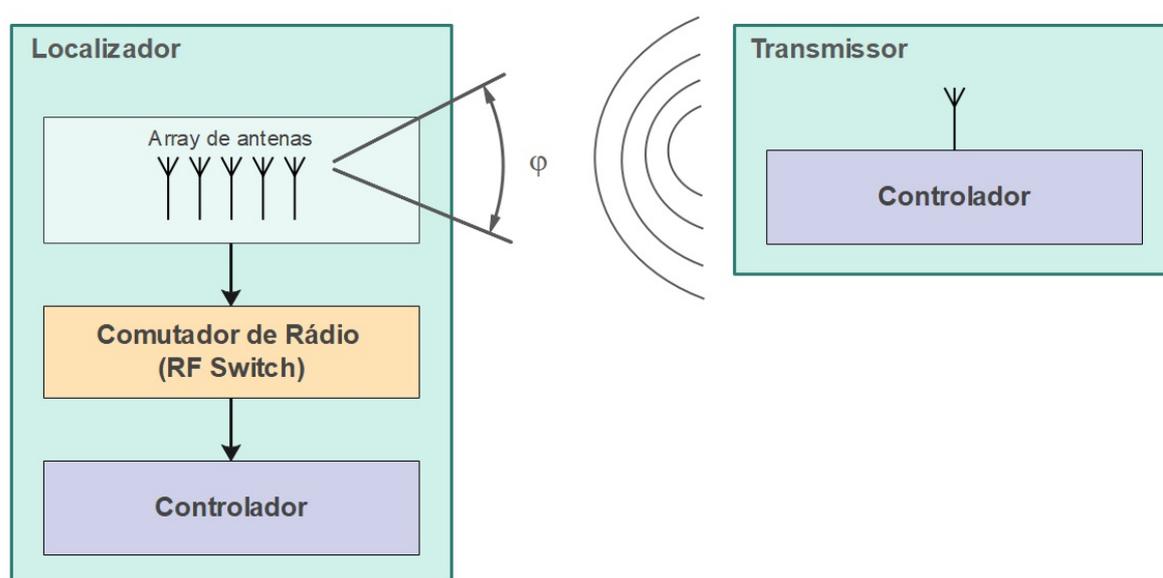


Fonte: Adaptado (WOOLLEY, 2019)

1.2.1.3 Angle of Arrival

Um dispositivo BLE pode fornecer a sua direção a um localizador, transmitindo pacotes de dados e usando uma única antena (WIELANDT; STRYCKER, 2017). O *hardware* do localizador contém um *array* de antenas e um comutador de rádio frequência para a recepção dos pacotes, desta forma, há a comutação entre as antenas que compõe o *array* durante a recepção dos pacotes e a captura das amostras de fase I e quadratura Q. As amostras IQ podem ser utilizadas para calcular a diferença de fase do sinal receptado por cada uma das antenas que compõe o *array*, sendo possível estimar o ângulo de chegada do sinal. Na Figura 11, é possível visualizar como o sinal de rádio transmitido é receptado pelo localizador no método AoA.

Figura 11 – Recepção do sinal no localizador utilizando o método AoA.



Fonte: Adaptado (PAU et al., 2021)

O transmissor contém uma única antena responsável pela transmissão do sinal. Seja o localizador, responsável pela recepção das ondas de rádio transmitidas, provido de um *array* de antenas, e estas antenas separadas por uma distância "d", como mostrado na Figura 12. É possível traçar uma linha perpendicular que se estende da frente de onda do sinal transmitido até as antenas do localizador. Desta forma, pode-se visualizar um triângulo retângulo e então aplicar, trivialmente, propriedades trigonométricas para encontrar a diferença de fase ω do sinal que chega nas duas antenas. A frente de onda se propaga na velocidade da luz, e necessita de mais tempo para alcançar a antena mais distante.

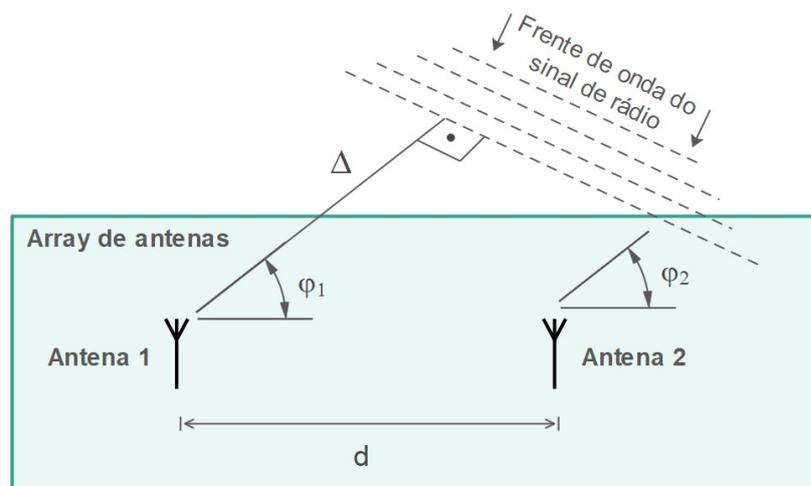
$$\omega = \frac{2 \times \pi \times d \times \text{sen}(\varphi)}{\lambda} \quad (1)$$

Para (SILICON LABS, 2022), se o receptor estiver, suficientemente, longe do transmissor a

pelos menos 4 comprimentos de onda, assume-se que a frente de onda é planar. Neste caso, o ângulo de incidência pode ser prontamente determinado a partir da distância (Δ), usando funções trigonométricas.

$$\varphi = \arccos\left(\frac{\Delta}{d}\right) \quad (2)$$

Figura 12 – Cálculo do ângulo de incidência do sinal de rádio frequência (AoA).



Fonte: Adaptado (PAU et al., 2021)

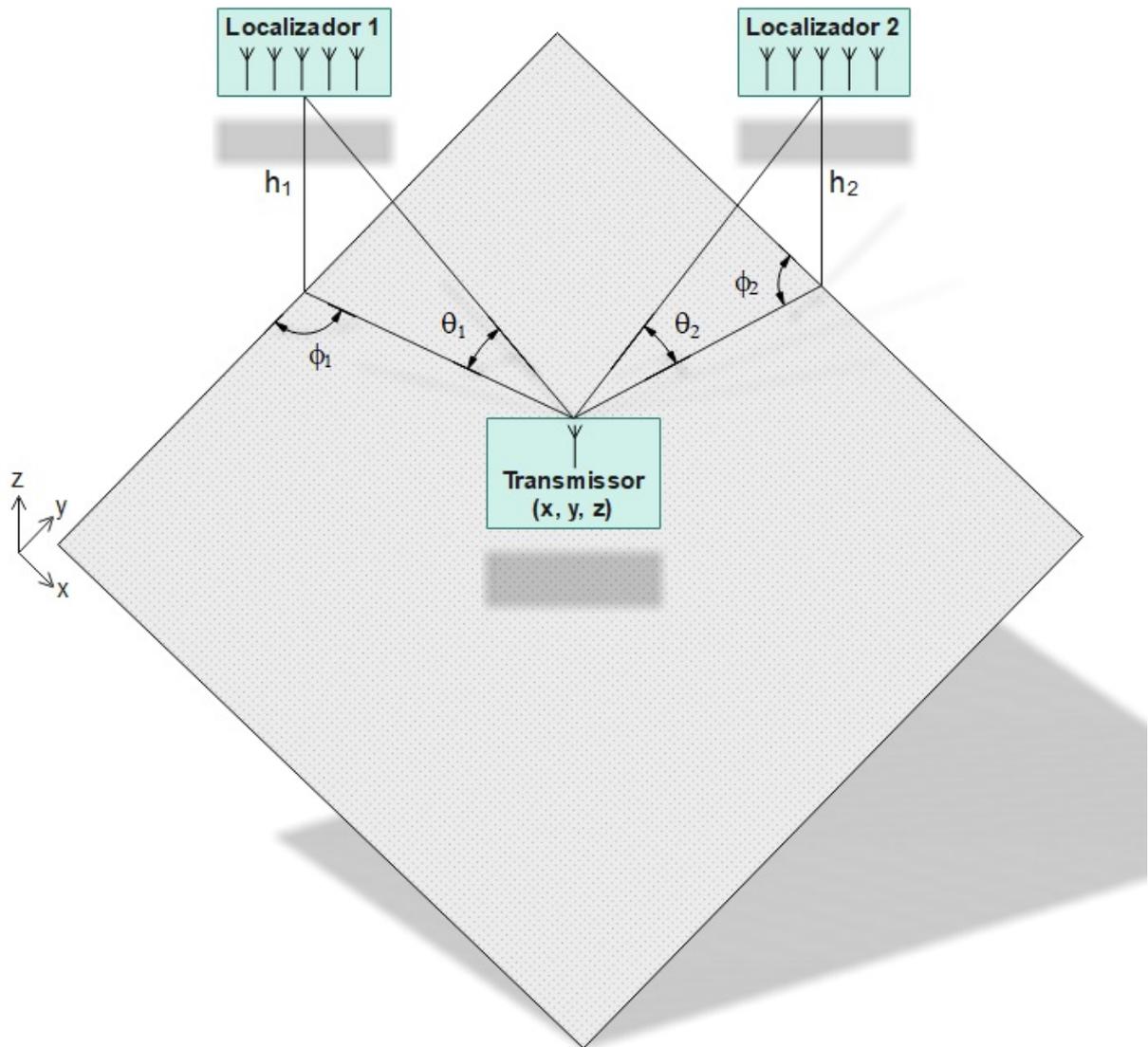
Onde (φ) é o ângulo de chegada da onda de rádio, (Δ) é a distância da antena até a frente de onda do sinal transmitido e (d) é a distância, em linha reta, entre duas antenas do *array*.

A descoberta de direção é diferente da localização de um dispositivo BLE. As soluções que visam a aplicação do *direction finding* para descoberta de direção buscam trabalhar no plano 2D. Para encontrar a localização de um dispositivo, é necessário a utilização de múltiplos *arrays* de antenas, ou seja, utiliza-se mais do que um conjunto de antenas (localizadores) durante a captura de amostras IQ do transmissor. Dessa maneira, é possível, por meio da triangulação de sinais, determinar a localização exata do dispositivo transmissor.

No método AoA, é possível determinar a direção do dispositivo transmissor por meio do localizador. A localização pode ser determinada, se as posições dos localizadores e a direção do dispositivo forem conhecidas em relação a cada localizador.

Todavia, para estimar a localização do transmissor, é necessário concentrar os dados dos localizadores em um dispositivo central, responsável pelos cálculos. Na Figura 13, é possível observar o posicionamento do dispositivo transmissor e dos localizadores, onde (θ) é ângulo de elevação, (ϕ) é o ângulo azimute e (h) é a altura do localizador em relação ao plano xy.

Figura 13 – Posicionamento do dispositivo transmissor com múltiplos *arrays* de antenas.



Fonte: Adaptado (PAU et al., 2021)

2 ANTENAS

As antenas transmitem e recebem as ondas de rádio que a tecnologia Bluetooth utiliza em sua comunicação, por essa razão, a escolha ou a concepção da antena é uma parte importantíssima de qualquer implementação que envolva esta tecnologia.

O conceito de antena é bastante difundido, há décadas, pelos pesquisadores. A palavra antena é definida pelo dicionário (WEBSTER, 2022) como: Um dispositivo, geralmente, metálico (como uma haste ou fio) para radiar ou receber as ondas de rádio. Podemos encontrar, alguns destes conceitos em literaturas que abordam sobre a teoria das antenas:

A antena é a estrutura de transição entre o espaço livre e um dispositivo de orientação. (BALANIS, 2016)

Uma antena pode ser um dispositivo recíproco, linear e passivo. Por conseguinte, esta definição implica o uso da antena no ato de transmissão e recepção. (IEEE, 1983)

Os dispositivos Bluetooth exigem antenas que radiam em um padrão o mais próximo possível de uma esfera, para que possam se conectar em qualquer direção e ângulo. As antenas podem assumir diferentes formas para atender as necessidades dos projetos. A sua concepção pode amenizar os requisitos de um sistema, além melhorar o seu desempenho geral. Para (BALANIS, 2016), a antena serve para um sistema de comunicação com o mesmo propósito que os olhos servem para um humano, ambos captam ondas eletromagnéticas.

Segundo (BRAY; STURMAN, 2001), os tipos de antenas mais populares para dispositivos Bluetooth são: Dipolo, plana e microfita. Outros tipos de antenas são possíveis na banda ISM, como dipolos de elementos múltiplos, pratos parabólicos, antenas com fenda e Yagis. No entanto, as antenas mais complexas são menos propensas a serem usadas em sistemas Bluetooth. Isso ocorre devido ao custo, estrutura da antena ou porque seus padrões de radiação são fortemente direcionais, o que tende a não se adequar às aplicações Bluetooth.

A antena isotrópica radia as ondas eletromagnéticas na mesma intensidade e em todas as direções numa esfera perfeita, com o ganho unitário, desta maneira, a potência de saída é igual a potência de entrada (BRAY; STURMAN, 2001).

Em sua obra, (GREGSON; MCCORMICK; PARINI, 2007) afirma que as antenas não radiam por igual em todas as direções, o conceito da radiação isotrópica é útil como padrão ao qual o desempenho de qualquer outra antena possa ser quantificada, mas na teoria e na prática a sua concepção é impossível. Portanto, a variação na relação da potência radiada, como uma função dos ângulos β e α em relação ao ponto fixo, mecanicamente, de qualquer antena, é um parâmetro importante.

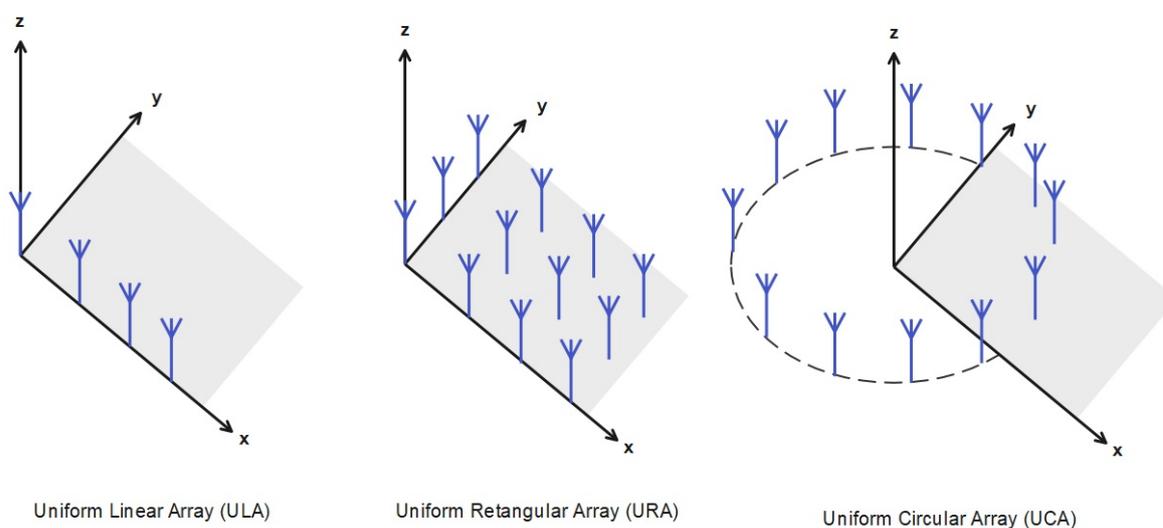
2.1 ARRAYS DE ANTENAS

Os *arrays* de antenas destinados para as soluções que utilizam o recuso *direction finding* estão divididos em três categorias: *Uniform Linear Array (ULA)*, *Uniform Retangular Array (URA)* e *Uniform Circular Array (UCA)*. Na Figura 14, é possível observar a representação desses diferentes tipos de *arrays* de antenas.

Os *arrays* de antenas ULA possuem uma matriz linear unidimensional, desta maneira, todas as antenas posicionam-se em uma linha única linha. Os *arrays* URA e UCA possuem uma matriz bidimensional (2D), desta forma, todas as antenas localizam-se espalhadas dentro de um plano.

Estas configurações de matrizes permitem calcular um único ângulo a partir de um sinal. Porém, configurações mais complexas são capazes de derivar dois ou mesmo até três ângulos, desta forma, torna-se comum o cálculo tanto do ângulo azimute como o de elevação, em relação a uma referência. Para (WOOLLEY, 2019), a intersecção das linhas descritas por estes ângulos pode ser utilizada para identificar a localização do dispositivo receptor com um elevado grau de precisão, medido em centímetros.

Figura 14 – Diferentes tipos de *arrays* de antenas.

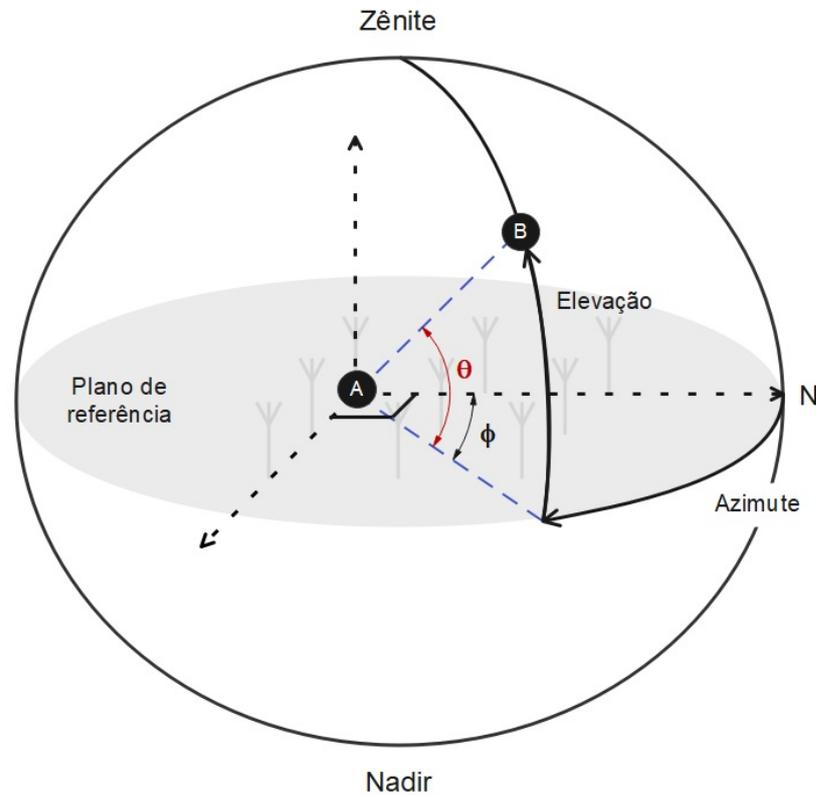


Fonte: Adaptado (SILICON LABS, 2022)

Segundo (SILICON LABS, 2022), utilizando um conjunto de antenas unidimensionais, é possível medir de forma confiável apenas o ângulo azimute ϕ , assumindo que o dispositivo com lagartas se move de forma consistente no mesmo plano. Além disso, a medição do ângulo azimute é limitada a uma gama de ângulos de 180 graus, devido a razões de simetria. Já com os *arrays* de antenas bidimensionais, é possível medir com confiabilidade tanto o ângulo azimute ϕ como o de elevação θ no semiespaço 3D, como se mostra na Figura 15.

Ainda para (SILICON LABS, 2022), se a matriz de antenas for alargada a uma matriz 3D completa, ou seja, antenas espalhadas nas três coordenadas cartesianas, então será possível medir o espaço 3D completo.

Figura 15 – Representação do ângulo azimute ϕ e de elevação θ com um *array* de antenas URA.

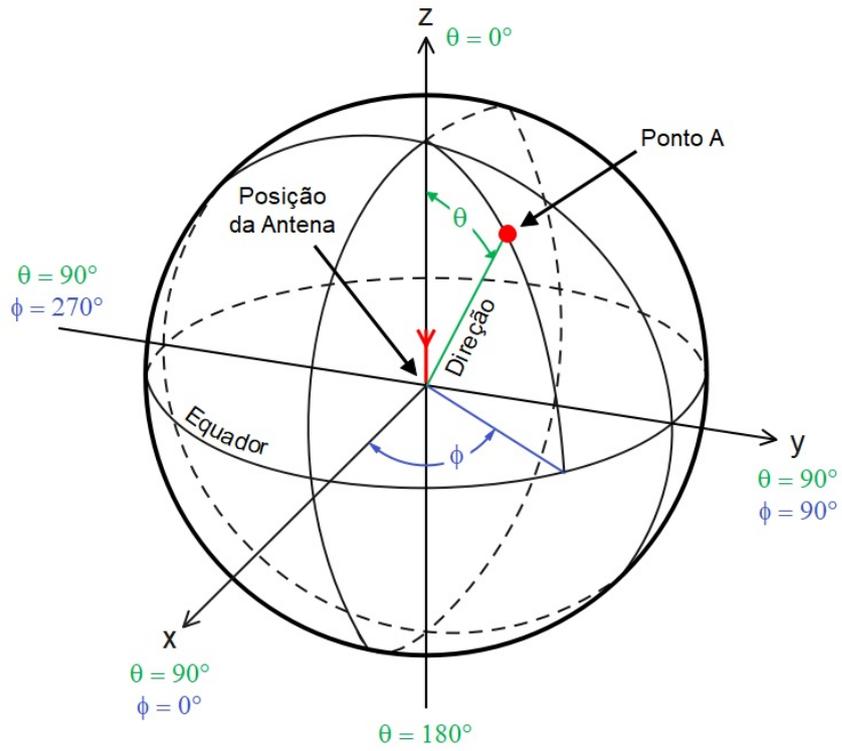


Fonte: Adaptado (SILICON LABS, 2022)

2.2 SISTEMA DE COORDENADAS

O sistema de coordenadas, geralmente representado por uma esfera, é definido pelo sistema em que a antena é utilizada. Para (IEEE, 1979), o sistema de coordenadas de uma antena é, tipicamente, definida em função de uma referência mecânica na estrutura da antena. Na Figura 16, é possível observar o sistema padrão de coordenadas esféricas utilizado em uma antena.

Figura 16 – Sistema de coordenadas esféricas padrão utilizado em medições de antenas.



Fonte: Adaptado (IEEE, 1979)

2.3 ANTENA DIPOLO

Segundo (JR; BUCK, 2013), a antena dipolo magnética, na Figura 17, consiste em uma espira de corrente circular de raio "a" centrado na origem do plano xy. A corrente elétrica na espira é senoidal, dada pela Equação 3. Para (BRAY; STURMAN, 2001), a antena dipolo magnética é cilíndrica, com o sinal sendo alimentado, geralmente, pela parte inferior.

$$I(t) = I_0 \times \cos(\omega \times t) \quad (3)$$

Segundo (JR; BUCK, 2013), a corrente elétrica que percorre um fio cria um campo elétrico circulante que o sobrepõe. Em decorrência disso, pode-se substituir o fio por um campo elétrico \vec{E} circular caracterizado, matematicamente, pela Equação 4. Dessa forma, substitui-se a corrente de condução pela corrente de deslocamento, que não terá efeito nas soluções dos campos \vec{E} e \vec{H} no meio.

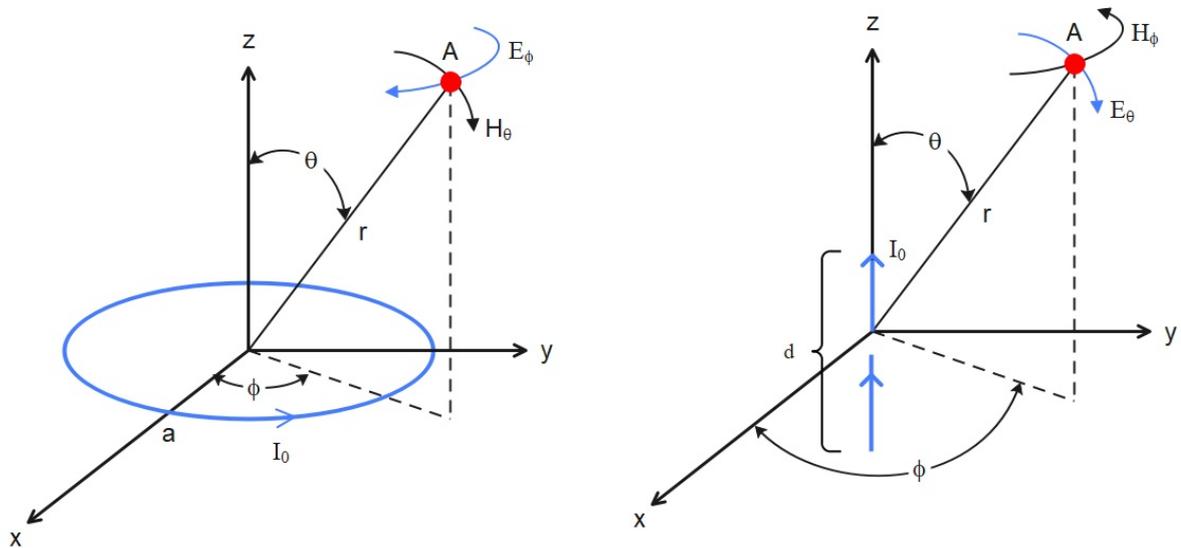
$$E_\phi(a, t) = E_0 \times a \times \cos(\omega \times t) \quad (4)$$

O campo magnético \vec{H} gerado pela antena dipolo de raio "a" é caracterizado pela Equação 5. Para (JR; BUCK, 2013), o campo \vec{H} permite obter a solução para a corrente na espira.

$$H_\phi(a, t) = H_0 \times \cos(\omega \times t) \quad (5)$$

Na Figura 17, é possível observar os vetores dos campos atuando no ponto A, localizado a uma distância "r" da antena que está servindo como referência para os sistemas de coordenadas polares e cartesianas xyz.

Figura 17 – Antenas dipolo são estruturas duais, produzindo padrões de campos idênticos, com as funções de E e H intercambiadas.

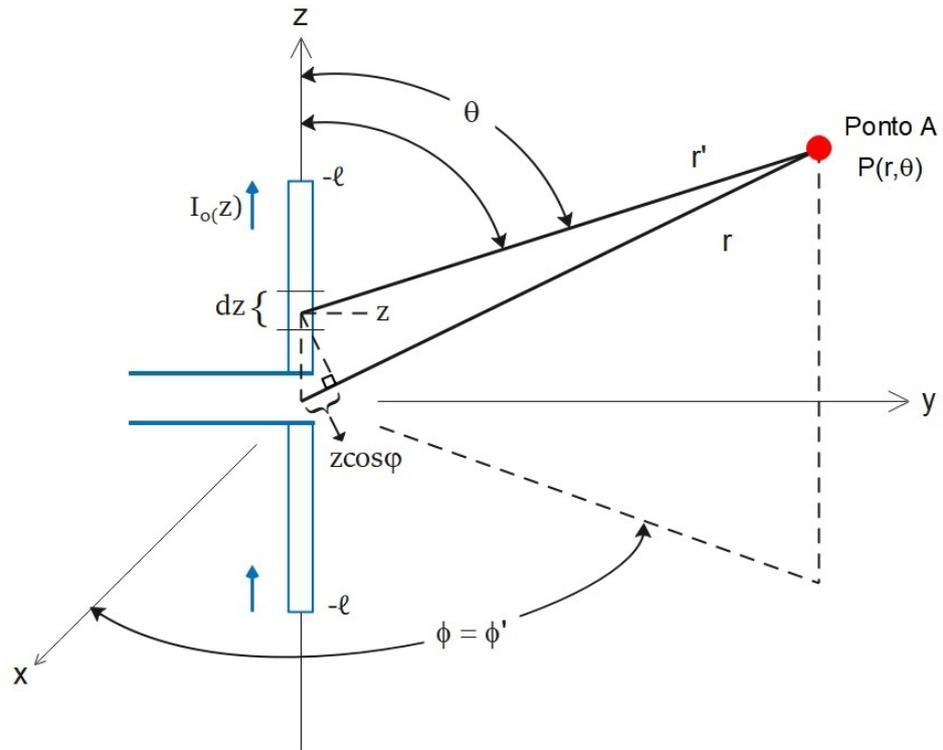


Fonte: Adaptado (JR; BUCK, 2013)

Para (BALANIS, 2016), a disposição geométrica mais conveniente para a análise de um dipolo é, normalmente, tê-lo posicionado simetricamente sobre a origem com o seu comprimento dirigido ao longo do eixo z, como se mostra Figura 18.

Na Figura 18, é possível observar que uma antena dipolo pode ser representada como uma pilha de dipolos Hertzianos, cujos fasores individuais de corrente são dados por $I_0(z)$. Um dipolo Hertziano é mostrado na localização z e tem comprimento dz. Quando o ponto de observação A está na região distante, as linhas de distância r e r' são aproximadamente paralelas, de tal forma que diferem em comprimento por $z\cos(\theta)$.

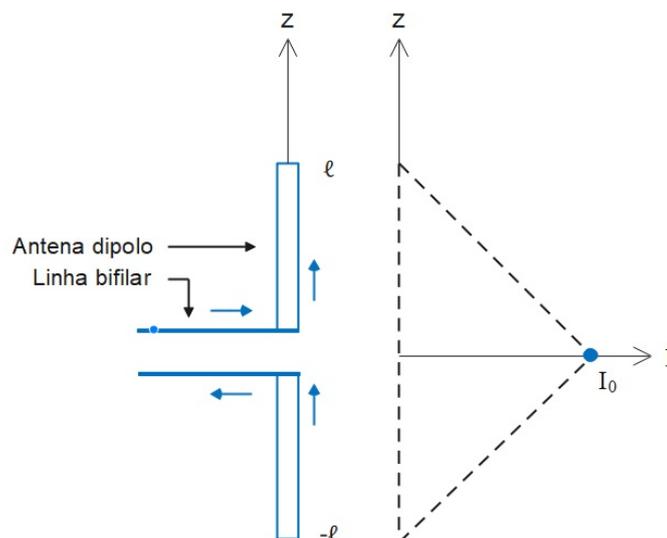
Figura 18 – Representação geométrica do dipolo finito.



Fonte: Adaptado (JR; BUCK, 2013)

Na Figura 19, é possível observar uma antena dipolo fina alimentada senoidalmente por uma linha bifilar, a distribuição da amplitude da corrente, mostrada no desenho, é aproximadamente linear se o comprimento total da antena for suficientemente menor que a metade do comprimento de onda. A amplitude da corrente é máxima no ponto central.

Figura 19 – Representação de uma antena dipolo e sua distribuição de corrente.



Fonte: Adaptado (JR; BUCK, 2013)

O comprimento de uma antena dipolo deve estar relacionado ao comprimento de onda do sinal que ela está transportando. As antenas dipolo estão disponíveis em vários modelos. A Figura 20 ilustra dois modelos diferentes disponíveis. Ambas são antenas dipolo de meia onda.

Figura 20 – Dois modelos diferentes de antenas dipolo da fabricante *Linx Technologies*.



Fonte: Adaptado (LINX TECHNOLOGIES, 2022a)

2.4 ANTENA MICROSTRIP PLANAR

Segundo (CHEN; CHIA, 2006), todas as antenas que possuem radiação de superfície plana ou curvada e pelo menos uma alimentação são designadas por antenas planares.

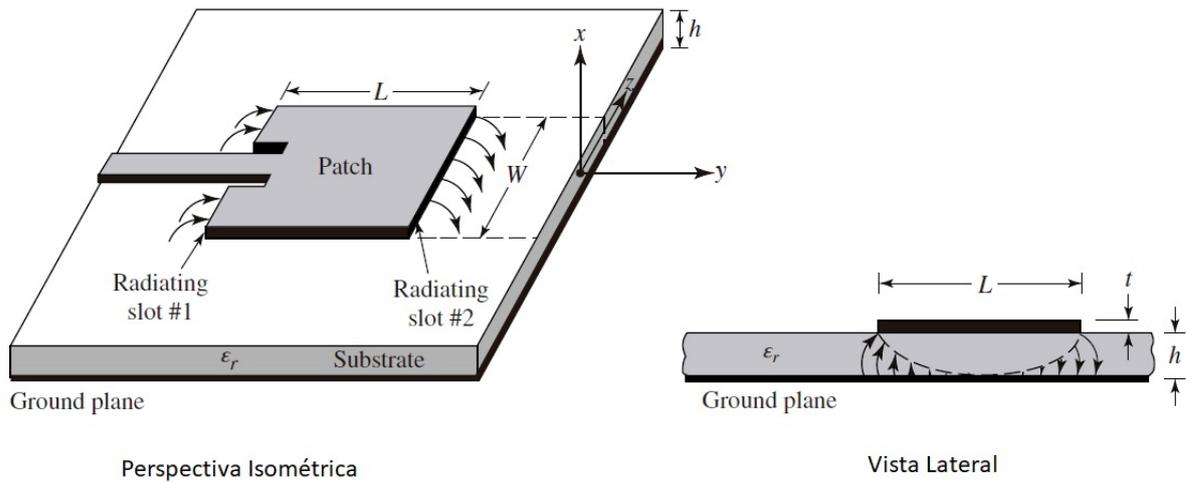
A antena *microstrip* ou *patch* é um tipo de antena planar, desenvolvida em placas de circuito impresso (PCB), bastante utilizada em soluções que envolvem o uso da tecnologia Bluetooth. Para (BALANIS, 2016), a antena *microstrip*, além de ser de perfil baixo, é simples e possui um custo de fabricação baixo, também, mecanicamente, é robusta e muito versátil em termos de frequência ressonante, polarização e impedância.

Em sua obra, (BALANIS, 2016) afirma que a antena *microstrip*, como mostrado na Figura 21, consiste num metal de comprimento t muito fino ($t \ll \lambda_0$, onde λ_0 é o comprimento de onda no vácuo) colocado numa placa de circuito impresso de comprimento ($h \ll \lambda_0$), normalmente ($0.003\lambda_0 \leq h \leq 0.05\lambda_0$).

Existem diferentes materiais que podem ser utilizados na fabricação das antenas *microstrip*. Segundo (BALANIS, 2016), as suas constantes dielétricas situam-se normalmente na gama de $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$. Quanto maior for a constante dielétrica, maior será o desempenho da antena, porém, esses aumentos requerem uma maior quantidade de materiais durante a fabricação. Para se obter uma maior eficiência, largura de banda e campos soltos durante a radiação no espaço, é necessário que o material dessa constante dielétrica esteja posicionado abaixo da antena.

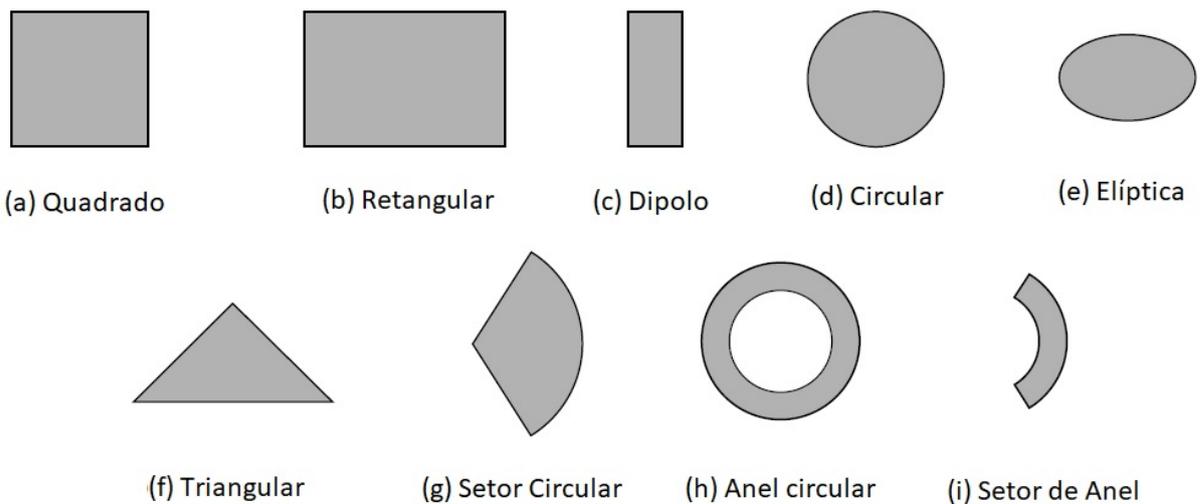
O leiaute da antena *microstrip* pode conter diferentes formas geométricas para atender os parâmetros do projeto. Em sua obra, (BRAY; STURMAN, 2001) afirma que o fato de que as trilhas numa PCB possam ser transformadas em uma antena útil, ilustra o cuidado que os projetistas devem ter no projeto de um produto para não produzir, inadvertidamente, componentes radiantes onde não as desejam. Na Figura 22, é possível encontrar algumas formas de representar uma antena *microstrip*.

Figura 21 – Projeção da perspectiva isométrica e vista lateral de uma antena *microstrip*.



Fonte: (BALANIS, 2016)

Figura 22 – Formas geométricas de antenas *microstrip*.



Fonte: (BALANIS, 2016)

Na figura 23, é possível visualizar dois modelos de antenas planares utilizadas em aplicações que possuem o uso da tecnologia Bluetooth, ambas produzidas em placas de circuito impresso, pela fabricante *Linx Technologies*.

Figura 23 – Modelos de antenas planares da fabricante *Linx Technologies*.



Fonte: Adaptado (LINX TECHNOLOGIES, 2022b)

2.4.1 Padrão de radiação

O campo de radiação de uma antena é caracterizado pelos resultados das medições da sua amplitude relativa, fase relativa, polarização e ganho de potência na superfície de uma esfera com seu centro localizado na antena. O padrão de radiação exprime a representação dessas propriedades em função das coordenadas esféricas.

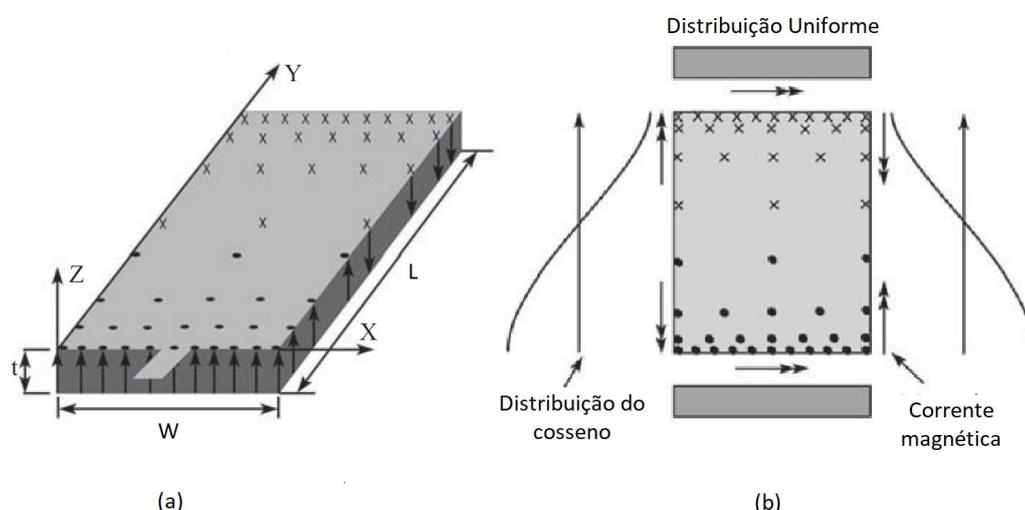
A antena *microstrip* retangular, por exemplo, pode ser considerada como uma parede ou ranhura magnética. Este é um modelo aproximado, que em princípio, conduz uma impedância de entrada reativa e não radia ondas de qualquer potência (FANG, 2017).

A distribuição do campo, mostrado na Figura 24, nos mostra que a corrente de magnetização nos eixos y , de $x = 0$ até $x = W$, é pequena e aquelas ao longo dos eixos x , de $y = 0$ até $y = L$, são responsáveis pela radiação. Consequentemente, a radiação proveniente da antena pode ser considerada como sendo uma radiação proveniente de duas ranhuras (FANG, 2017).

As linhas de campo elétrico de uma antena *microstrip*, como mostrado na Figura 25, se apresentam de forma não homogênea de dois dielétricos, usualmente o material da PCB e o ar. A maior parte das linhas do campo elétrico incidem na PCB e o restante se dispersam no ar. Como $W/h \gg 1$ e $\epsilon_r \gg 1$, as linhas do campo elétrico concentram-se principalmente na PCB. Uma vez que algumas das ondas viajam no meio material da PCB e outras no ar, uma constante dielétrica eficaz ϵ_{ref} é introduzida para dar conta da propagação das linhas do campo, inclusive nas bordas da antena (BALANIS, 2016).

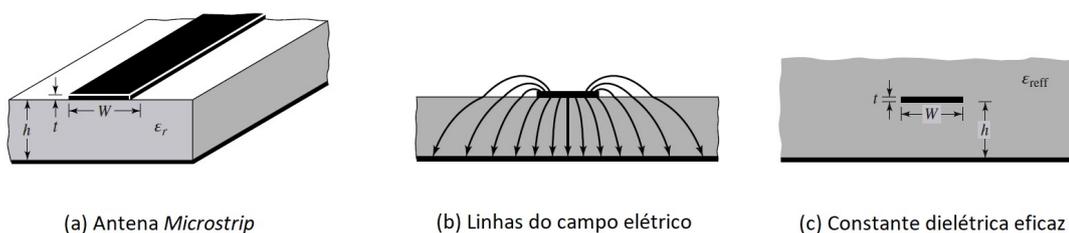
Segundo (BALANIS, 2016), a constante dielétrica eficaz ϵ_{ref} é definida como uma constante dielétrica uniforme do material da PCB, como visto na Figura 25, de modo que as características elétricas sejam idênticas, particularmente, as linhas de propagação do campo elétrico. Ainda para (BALANIS, 2016), à medida que a frequência de operação aumenta, a maior parte das linhas do campo elétrico concentram-se no material da PCB. Portanto, as linhas de campo comportam-se mais homogeneamente, e a constante dielétrica eficaz aproxima-se do valor da constante dielétrica do material da PCB.

Figura 24 – (a) Configuração do campo em uma antena *microstrip* retangular; (b) Representação do campo magnético e da corrente de distribuição.



Fonte: (FANG, 2017)

Figura 25 – (a) Superfície de uma antena *microstrip*; (b) Linhas de campo elétrico; (c) Constante dielétrica eficaz.



Fonte: (BALANIS, 2016)

2.4.2 Ganhos dBi e dBd

O ganho de uma antena é uma indicação da redistribuição espacial da potência disponível. Segundo (MENSO, 1993), o Decibel, é definido, em princípio, como uma grandeza de relação de parâmetros (potência P, tensão V, corrente I, etc.), pode ser utilizado como unidade de medida quando lhe são atribuídos dois parâmetros de referência, um valor unitário ou um valor constante.

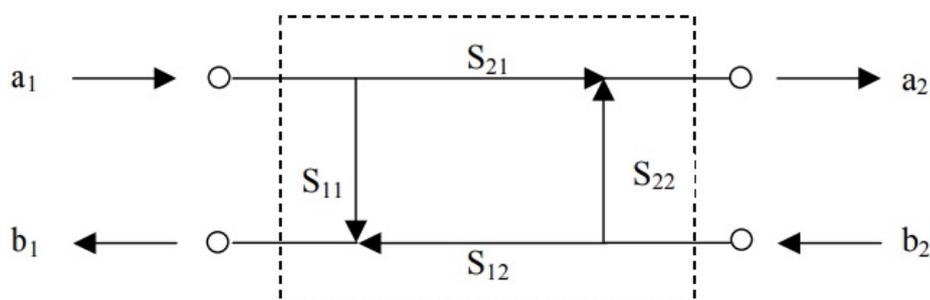
Segundo (BRAY; STURMAN, 2001), o ganho de uma antena é a relação de potência de entrada e saída. Normalmente, o ganho da antena é medido em dBi, este é o ganho em relação a uma antena isotrópica, que possui o ganho unitário. Contudo, o ganho da antena, também, pode ser medido em dBd, neste caso, toma-se como referência uma antena dipolo.

2.4.3 Parâmetros de espelhamento ou parâmetros "S"

Os problemas práticos que podem ser encontrados quando o conceito da antena *microstrip* é transformada em realidade e fabricada abrangem tanto o controle das tolerâncias mecânicas como a radiação indesejada da dispersão das ondas na superfície do substrato, ou seja, na ranhura da antena impressa na placa de circuito impresso (JAMES; HALL; WOOD, 1986).

Segundo (POZAR, 2011), os parâmetros de espalhamento, ou parâmetros S, representam uma relação entre as ondas incidentes e as ondas refletidas nas portas de uma linha de transmissão. Já para (PEREIRA et al., 2006), os parâmetros S₁₁ e S₂₂ representam a energia refletida, respectivamente, nas antenas 1 e 2. Os parâmetros S₂₂ e S₂₁ representam a energia transmitida, onde a₁ e b₂ representam as ondas incidentes e b₁ e a₂ representam as ondas refletidas, de acordo com a Figura 26.

Figura 26 – Diagrama dos parâmetros de espelhamento (S).



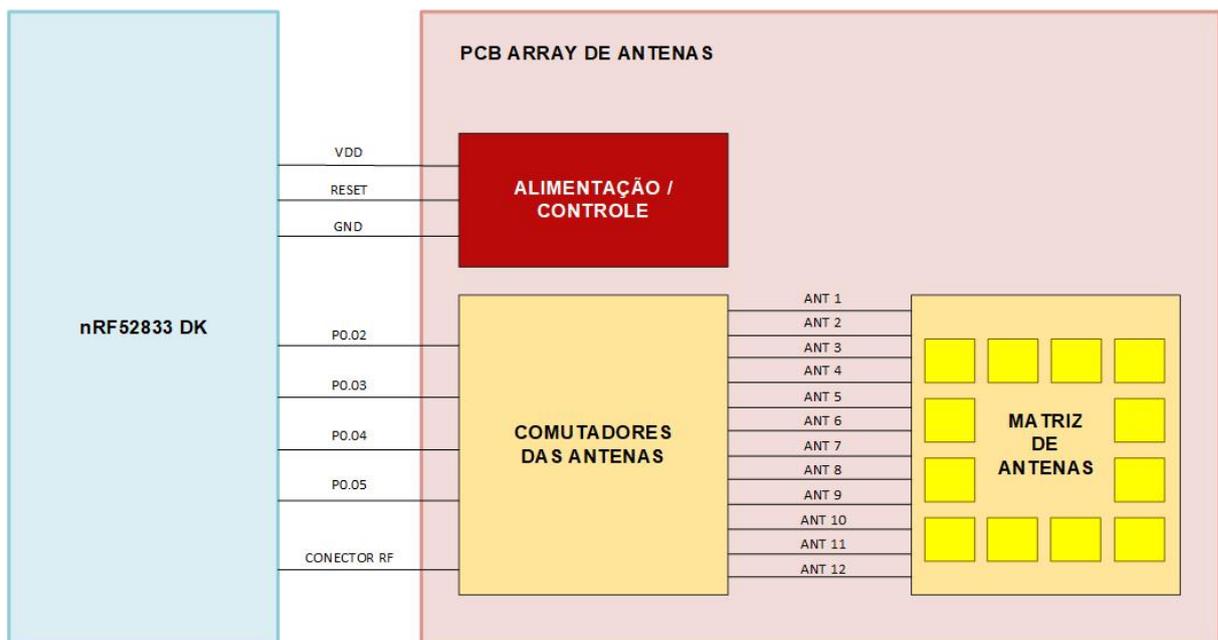
Fonte: (PEREIRA et al., 2006)

Também podemos interpretar que, se temos dois dispositivos de rádio, um denominado rádio 1 e o outro denominado rádio 2, o S₁₁ seria a potência refletida que o rádio 1 está tentando entregar para a antena 1, o S₂₂ seria a potência refletida que o rádio 2 está tentando entregar à antena 2, o S₁₂ seria a potência da antena 2 entregue através da antena 1 ao rádio 1 e o S₂₁ seria a potência da antena 1 entregue através da antena 2 ao rádio 2. Os parâmetros S, também podem ser denominados como coeficientes de reflexão ou perdas de retorno, e variam de acordo com a faixa de frequência.

3 MATERIAIS E RECURSOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DO TRABALHO

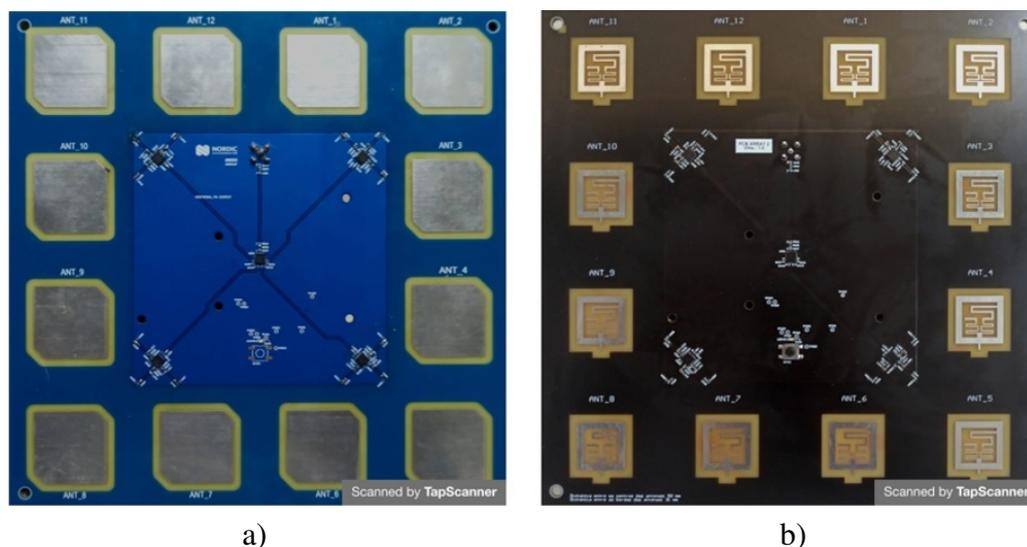
A avaliação dos *arrays* de antenas para Bluetooth *Direction Finding*, operando pelo método AoA, será realizada através do *hardware* proposto neste capítulo. Para isso, serão apresentados os recursos a serem utilizados conforme o diagrama de arquitetura ilustrado na Figura 27. Conforme ilustrado, o *hardware* de avaliação foi baseado no *chipset* nRF52833 presente no nRF52833 DK, um *kit* de desenvolvimento com recursos para depuração e testes *arrays* de antenas por meio de um *firmware* de operação do Bluetooth *Direction Finding* em modo AoA (NORDIC SEMICONDUCTOR, 2022b). Este *chipset* possui recursos para transmissão das amostras de quadratura (IQ) através do CTE anexado ao pacote de dados BLE, também chamado de *Protocol Data Unit* (PDU). Além do nRF52833 DK, necessitou-se desenvolver um *hardware* específico para comportar as antenas planares e os comutadores de antena, identificados na Figura 32 como "PCB ARRAY DE ANTENAS". Os testes foram realizados com quatro modelos de antenas planares, expostos nas Figuras 28 e 29.

Figura 27 – Arquitetura do *hardware* proposto.



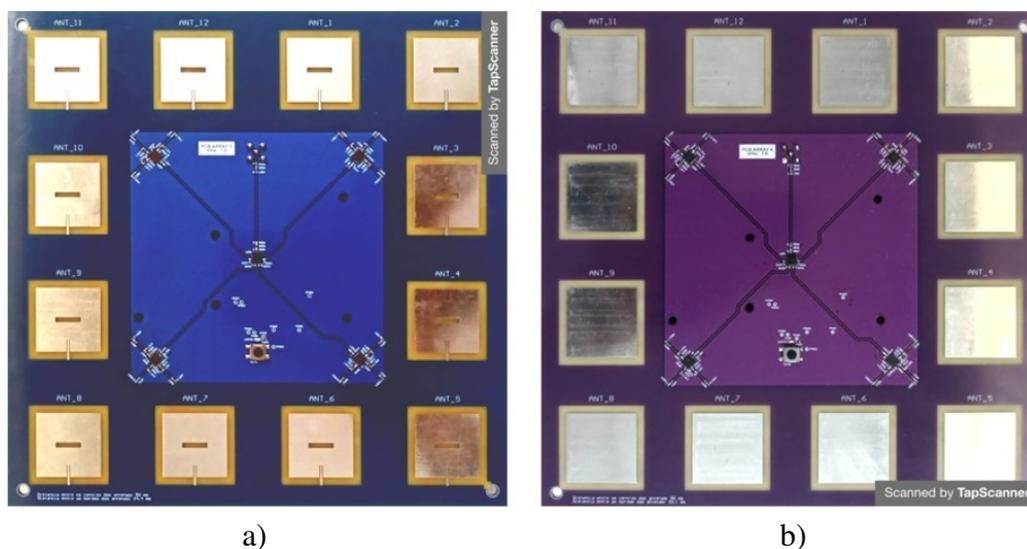
Fonte: Autoria própria

Figura 28 – *Arrays* de antenas 1 e 2, respectivamente, a) da Nordic Semiconductor; b) com antenas propostas por (YANG et al., 2016).



Fonte: Autoria própria

Figura 29 – *Arrays* de antenas 3 e 4, respectivamente, propostas por a) (GHOSAL; CHAUDHURI, 2013); b) (SILICON LABS, 2020).



Fonte: Autoria própria

Esses modelos de antena foram selecionados através de pesquisas prévias no estado da arte com relação a antenas retangulares desenvolvidas para *direction finding*. Ressalta-se que o modelo da fabricante Nordic Semiconductor é disponibilizado pela própria fabricante em suas documentações. Todas as antenas foram implementadas com impedância de 50Ω através do software Altium 22. Essas antenas compuseram *arrays* retangulares de duas dimensões 4x4, totalizado 12 antenas. Neste tipo de *arrays* de duas dimensões, é possível obter o ângulo de chegada em termos de azimute e elevação.

Além das antenas, o *hardware* proposto conta com comutadores de antenas de alta frequência, para realizar o chaveamento entre antenas. O modelo do chaveador utilizado foi o circuito integrado PE42442. Ao todo, cada modelo de *array* conta com 5 elementos de chaveamento, que alternam as antenas em um tempo de chaveamento, ou *time slot* de 2 microssegundos através do *firmware* de testes. O circuito também conta com um regulador de tensão, LM27761 (TEXAS INSTRUMENTS, 2022), e LEDs para sinalizações, além do conector RF SMA para conexão do *array* de antenas com a saída de radiofrequência do nRF52833 DK. Ressalta-se que quatro GPIOs do nRF52833 DK, P0.02, P0.03, P0.04, P0.05, foram utilizados para controlar os comutadores de antena a fim de realizar o chaveamento já mencionado.

A seguir, serão expostos, com mais detalhes, os os detalhes dos materiais e recursos previamente mencionados neste capítulo, incluindo o dimensionamento das antenas.

3.1 DISPOSITIVO NRF52833-DK

O nRF52833-DK da Nordic Semiconductor, Figura 30, é um *kit* de desenvolvimento que contém um rádio Bluetooth 5.1 utilizado em aplicações *direction finding*. Este *kit* é acessível para aplicações com base em Bluetooth Mesh, Thread, Zigbee, Protocol 82.15.4 e demais aplicações proprietárias utilizando 2.4 GHz (NORDIC SEMICONDUCTOR, 2022b).

O *chip* nRF52833 tem capacidade de 512 KB para a memória flash e 128 KB para a memória RAM. A sua temperatura máxima de operação de até 105°C, a generosa quantidade de memória e o suporte para multiprotocolo dinâmico garantem que o nRF52833 seja um SoC (System on Chip) ideal para uma vasta gama de aplicações comerciais e industriais, incluindo iluminação profissional e localização de bens.

Figura 30 – *Kit* de desenvolvimento nRF52833 DK.



Fonte: Autoria própria

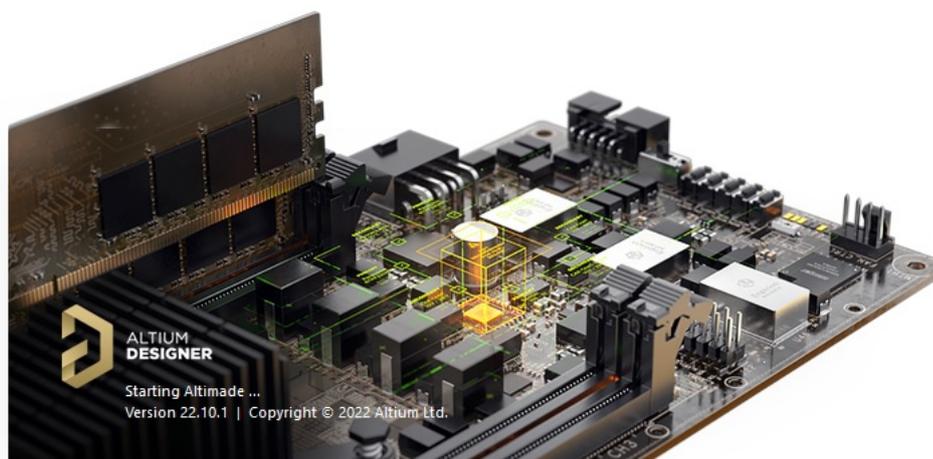
O *kit* de desenvolvimento tem acesso a todas as 42 entradas e saídas de dados (IOs) e

interfaces através de conectores. Existe, também, uma antena do tipo *microstrip* no leiaute da placa, além de um conector RF para realizar os testes durante as implementações. Quatro botões programáveis pelo utilizador e quatro LEDs simplificam a entrada e saída. O kit nRF52833 DK é tipicamente alimentado via USB, mas pode ser alimentado por baterias ou outras conexões entre 1,7 V e 5,0 V. Além disso, pode ser alimentado por meio de uma bateria CR2032 ou Li-Po, para testes em campo.

3.2 SOFTWARE ALTIUM DESIGN

O *software* utilizado para a elaboração dos projetos dos dispositivos foi o Altium Design 22, exposto na Figura 31. Este *software* fornece ferramentas para trabalhar com o desenvolvimento de esquemáticos e leiautes de placas de circuito impresso, permitindo acessar informações dos fabricantes e fornecedores de componentes eletrônicos. O *software*, também, fornece suporte para simulações de impedância de trilhas, placas rígido-flexíveis, ferramentas interativas para leiaute em alta frequência e recursos para automação de tarefas repetitivas.

Figura 31 – *Software* Altium Design.



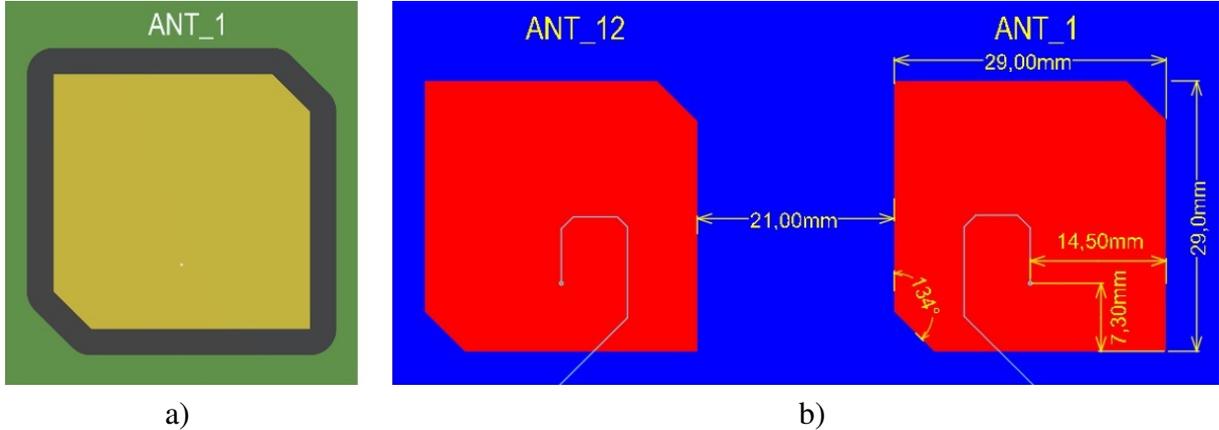
Fonte: Autoria própria

3.3 DIMENSIONAMENTO DAS ANTENAS

Cada dispositivo ilustrado nas Figuras 28 e 29 possuem 12 antenas do tipo *microstrip* e 5 comutadores de radiofrequência PE42442, (MURATA COMPANY, 2022). A distância entre os centros de duas antenas adjacentes é igual a 50mm, menor que a metade do comprimento de onda em 2,4 GHz (12.248 cm considerando a velocidade da luz no vácuo). Na Figura 32, é possível visualizar o dimensionamento, em milímetros, da antena utilizada na concepção do *array* 1. Esta geometria quadrada é impressa em um substrato FR-4 TG155 de 1,6mm de espessura. O

tamanho total da antena é de 35mm x 35mm e a ranhura correspondente a geometria quadrada impressa é de 29mm x 29mm.

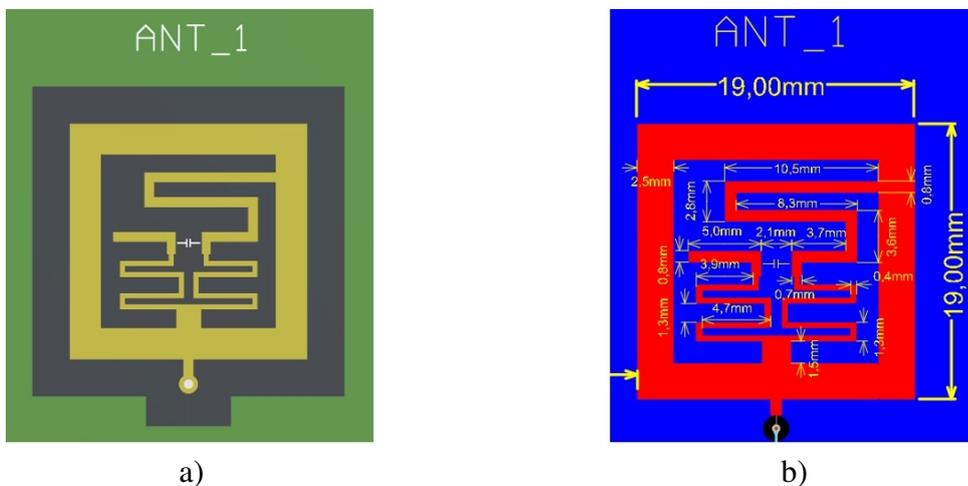
Figura 32 – a) antena microstrip e b) dimensões da antena do *array* 1.



Fonte: Autoria própria

A Figura 33 expõe o dimensionamento, em milímetros, da antena utilizada na concepção do *array* 2. Está geometria de antena, anel quadrado, está impressa em um substrato FR-4 TG155 de 1,6mm de espessura. O tamanho total da antena é de 25mm x 25mm e a ranhura correspondente a geometria do anel quadrado impresso é de 19mm x 19mm. Segundo (YANG et al., 2016), esta antena possui polarização circular e um *chip* resistor de valor igual a 100 Ω soldado a estrutura de alimentação da antena. Ainda para (YANG et al., 2016), o terminal de saída localizado ao centro e à esquerda da antena, em formato da letra L, é um tipo de extremidade aberta que se faz importante para excitar uma boa radiação da polarização circular.

Figura 33 – a) antena microstrip e b) dimensões da antena do *array* 2.

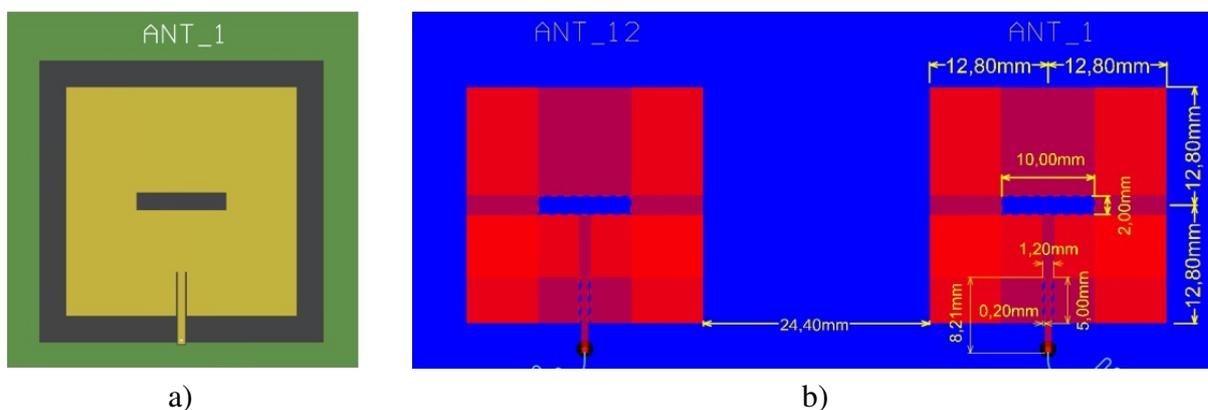


Fonte: Autoria própria

Na Figura 34, é possível visualizar o dimensionamento, em milímetros, da antena

utilizada na concepção do *array* 3. Esta antena de geometria quadrada, também conhecida como antena do tipo fenda, está impressa em um substrato FR-4 TG155 de 1,6mm de espessura. O tamanho total da antena é de 31,6mm x 31,6mm e a ranhura correspondente a geometria quadrada impressa é de 25,6mm x 25,6mm.

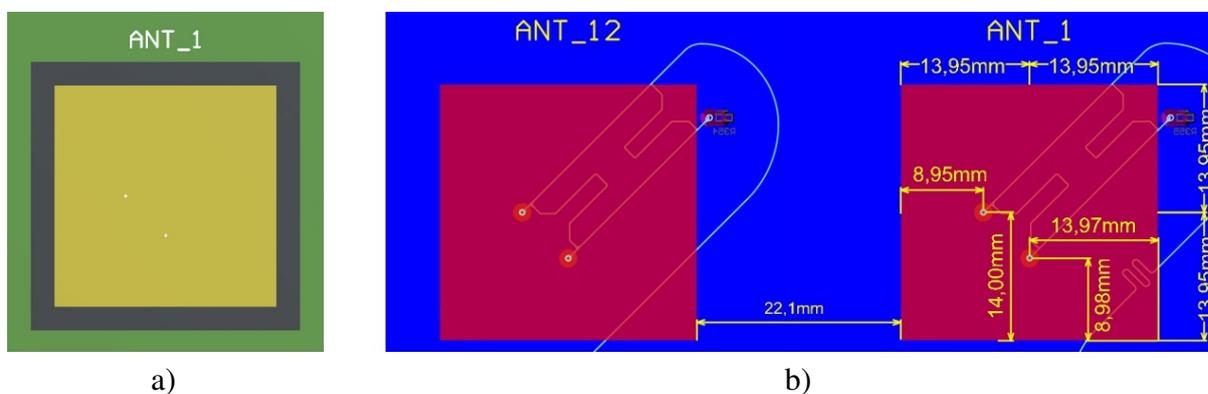
Figura 34 – a) antena microstrip e b) dimensões da antena do *array* 3.



Fonte: Autoria própria

A Figura 35 ilustra o dimensionamento, em milímetros, da antena utilizada na concepção do *array* 4. Esta antena de geometria quadrada está impressa em um substrato FR-4 TG155 de 1,6mm de espessura. O tamanho total da antena é de 34mm x 34mm e a ranhura correspondente a geometria quadrada impressa é de 27,9mm x 27,9mm. Para este tipo de antena, a (SILICON LABS, 2020) afirma que a polarização circular é realizada com um acoplador híbrido (desenho abaixo da camada de cor vermelha na Figura 35), que cria dois sinais com diferença de fase de 90° . Esses sinais são conectados aos pontos de alimentação da antena. A precisão da estimativa de ângulo depende, fortemente, da polarização circular, portanto, é fundamental manter a polarização circular em toda a banda de 2,4 GHz.

Figura 35 – a) antena microstrip e b) dimensões da antena do *array* 4.



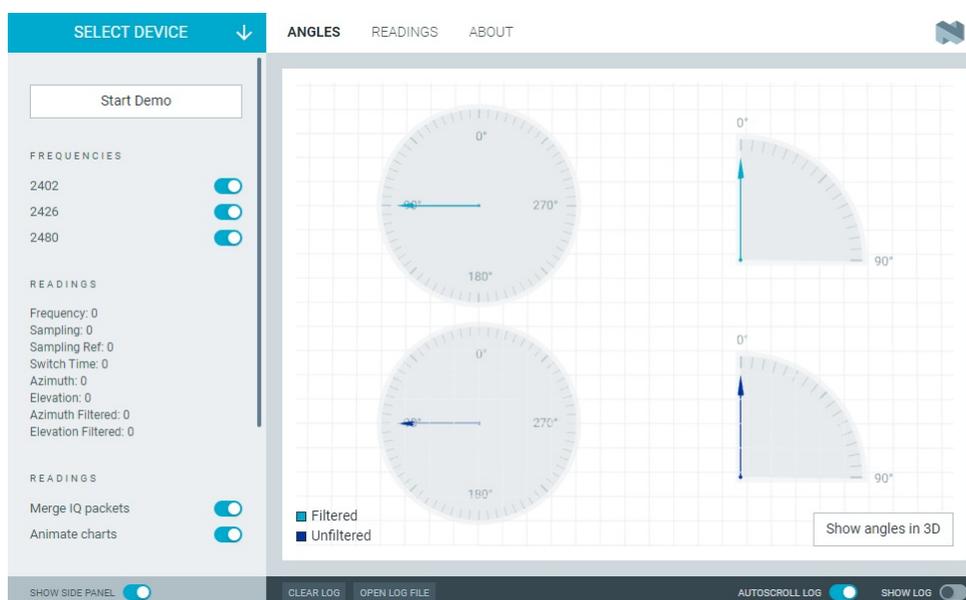
Fonte: Autoria própria

3.4 FIRMWARE DE TESTES

Para que possam ser gerados resultados significativos em relação a descoberta do ângulo de direção de dispositivos BLE, é necessário que os mesmos estejam providos de *firmware* capaz de realizar cálculos relacionados à descoberta de direção de um sinal eletromagnético. Para tal aplicação será utilizado o método *Angle of arrival*, onde os localizadores realizarão a captura do sinal transmitido. O localizador, que contém um *array* de antenas, realizará amostragens em quadratura IQ do sinal recebido. Essas amostras são compostas pela amplitude e o ângulo de fase das ondas eletromagnéticas, que servem de parâmetros para o cálculo da diferença de fase do sinal receptado por cada uma das antenas do *array*. Já o transmissor, que contém apenas uma antena do tipo *microstrip*, será responsável pela transmissão de pacotes de dados via Bluetooth.

O *firmware* de testes do sistema, na Figura 36, foi uma demonstração solicitada do fabricante para implementar os recursos descritos acima. A partir da referida solicitação, o fabricante disponibilizou um arquivo binário compilado para ser inserido ao nRF52833 DK. Para isso, utilizou-se a plataforma *nRF Connect for Desktop* para gravar o *firmware* no chipset (NORDIC SEMICONDUCTOR, 2022a). Ainda, nessa mesma plataforma, utilizou-se o *nRF Direction Viewer* para visualizar as amostras IQ e os ângulos de direção entre o localizador e o transmissor, em azimute e elevação.

Figura 36 – *Direction viewer*.



Fonte: Própria

4 METODOLOGIA PROPOSTA PARA AVALIAÇÃO DOS ARRAYS DE ANTENAS

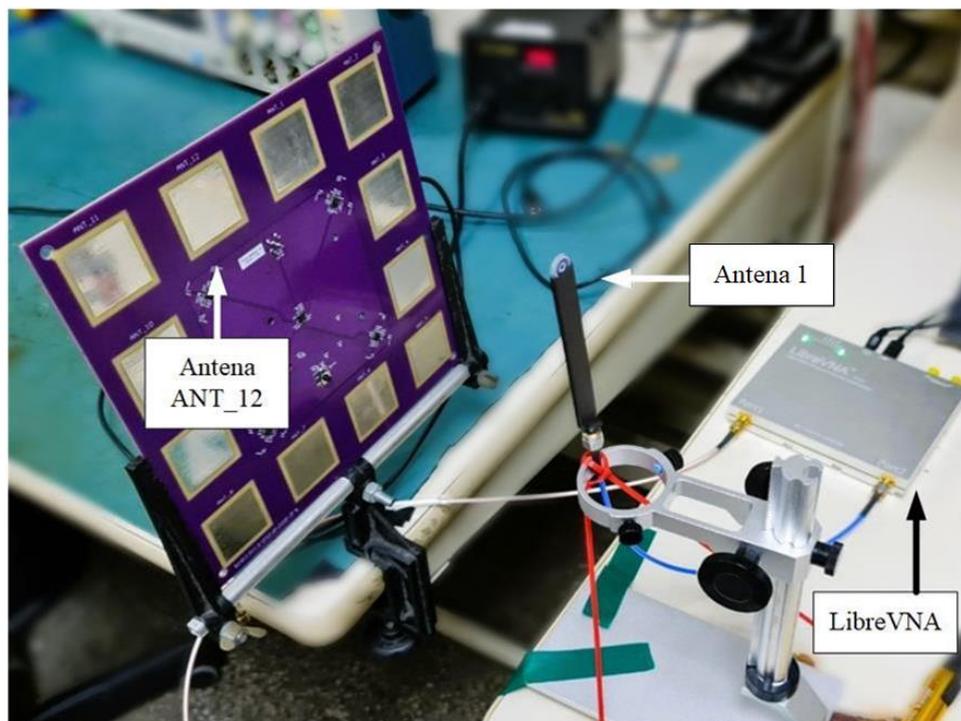
Para realizar a avaliação das antenas *microstrips* que compõem os *arrays* foram avaliados os parâmetros S22 e S21, juntamente com o ângulo de chegada do transmissor em relação ao localizador (*locator*). Neste capítulo, serão mencionadas as informações necessárias para que se possa reproduzir a experiência realizada neste trabalho, para assim, obter os ângulos de chegada de um sinal RF no localizador, bem como os parâmetros de espelhamento S22 e S21 das antenas *microstrips* que compõe os *arrays 1, 2, 3 e 4*. Ressalta-se que o parâmetro S22 refere-se a potência do sinal refletida pela antena, enquanto o S21 refere-se a potência do sinal absorvido na chegada. Como os *arrays* operam com o ângulo de chegada, os parâmetros referentes a transmissão, S11 e S12, não foram considerados na análise, uma vez que o *direction finding* será analisado conforme o ângulo de chegada.

4.1 METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS S22 E S21

A metodologia para obtenção das medidas de refletividade em guia de ondas, utiliza um Analisador de Redes Vetorial "LibreVNA" para medidas na faixa de frequências compreendida entre 100 kHz e 6 GHz (ELESHOP.EU, 2022). Os Parâmetros "S" (S22 e S21) mostrados nos resultados são medidos por este equipamento, configurado para uma faixa de 2,4GHz até 2.5GHz para fornecer os valores em magnitude (dB) e frequência (Hz). As frequências de interesse compreendem a faixa da banda ISM começando em 2,4GHz.

A antena do analisador LibreVNA, foi posicionada a uma distância de 30 cm, a frente do *array* de antenas. Apenas a antena *microstrip*, ANT_12, de cada *array (1, 2, 3 e 4)* foi utilizada durante a medição. Desta forma, foi possível extrair os gráficos referente a potência refletida (S22) desta antena e a potência recebida na antena ANT_12 em relação à potência de entrada na antena 2 (S21) no software VNA. Na Figura 37, é possível visualizar como a antena ANT_12 do *array 4* está posicionada em relação a antena 1 do analisador LibreVNA.

Figura 37 – Medição dos parâmetros S22 e S21



Fonte: Autoria própria

4.2 METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DOS ÂNGULOS DE CHEGADA (AOA)

A metodologia para as medidas dos ângulos de chegada das ondas de rádio, utiliza dois *hardware* nRF52833 DK (NORDIC SEMICONDUCTOR, 2022a), um como transmissor dos sinais na faixa de frequência de operação ISM de 2,4 GHz e o outro, conectado com um dos *arrays* de antenas, como receptor dos sinais, além do *firmware* de teste *nRF Direction Viewer*.

4.2.1 Ambiente e procedimentos dos testes para obtenção dos ângulos

Segundo (IEEE, 1979), o ambiente de trabalho em que uma antena é instalada pode modificar, substancialmente, o padrão intrínseco da antena. Conseqüentemente, as medidas no ambiente são, frequentemente, verificadas. Ainda, para (IEEE, 1979), muitos procedimentos de ensaios podem ser adaptados para a utilização na medição de sistema de antenas contendo elementos de circuito que podem ser ativos, não lineares ou não recíprocos. Nestas situações, não há uma simples relação entre as propriedades de transmissão e recepção do sistema de antenas. Em vista disso, as medições devem ser realizadas para o modo ou modos em que o sistema de antena foi concebido para ser utilizado.

Contudo, para avaliar as antenas em cenários *indoor* reais, de acordo com a premissa do Bluetooth *Direction Finding*, escolheu-se uma sala predial para realização dos testes. O ambiente

previsto, consiste em uma sala que dispõe de luminárias LED, mesas, cadeiras, uma televisão LED e dois dispositivos BLE. Também constam sinais da rede local Wi-Fi. O leiaute da sala é ilustrado na Figura 38.

Figura 38 – Leiaute do ambiente de teste.



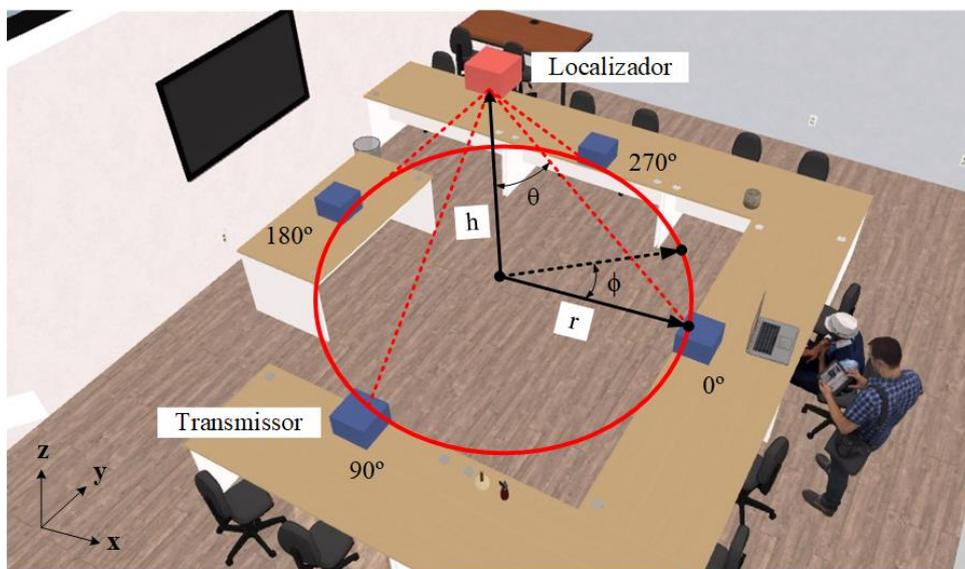
Fonte: Própria

Na Figura 39, é possível observar como os dispositivos estarão posicionados no ambiente de teste. A caixa de cor azul posicionada em cima das mesas representa o transmissor e a de cor vermelha posicionada no teto da sala representa o localizador. O cone de cor vermelha representa o alcance do *array* de antenas, o ângulo desse alcance coincide com o ângulo de elevação. Para garantir a recepção adequada do sinal no localizador, é necessário que o transmissor esteja em um alcance entre 10° e 30° , este alcance é representado por (θ) .

O localizador está a uma altura de 3m em relação ao solo e 2,2m em relação ao transmissor, sendo esta última distância representada pela letra h na Figura 39. É possível calcular o ângulo de elevação $\theta = 24,44^\circ$ utilizando os conceitos de trigonometria, então, esse ângulo foi fixado para comparação com os resultados, pois a distância h e r permanecem fixas durante o procedimento. Para os registros dos ângulos de chegada (ϕ) e elevação (θ) , o transmissor, posicionado em cima das mesas, percorre a circunferência da base do cone de raio $r = 1\text{m}$, em um intervalo crescente de (ϕ) . Portanto, os ângulos (ϕ) fixados para o posicionamento do transmissor são: $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ, 210^\circ, 240^\circ, 270^\circ, 300^\circ, 330^\circ$ e 360° .

Com os dispositivos devidamente instalados no ambiente de teste, posiciona-se o transmissor em cada um dos ângulos (ϕ) previamente mencionados e registra-se os ângulos azimute (ϕ) e elevação (θ) utilizando o *nRF Direction Viewer*.

Figura 39 – Posicionamento dos dispositivos BLE para os testes.



Fonte: Própria

Por fim, a Figura 40 ilustra o ambiente real de testes com o localizador e o transmissor posicionados conforme exposto dos leiautes previamente ilustrados.

Figura 40 – Ambiente de teste real mostrando o posicionamento dos dispositivos.



Fonte: Própria

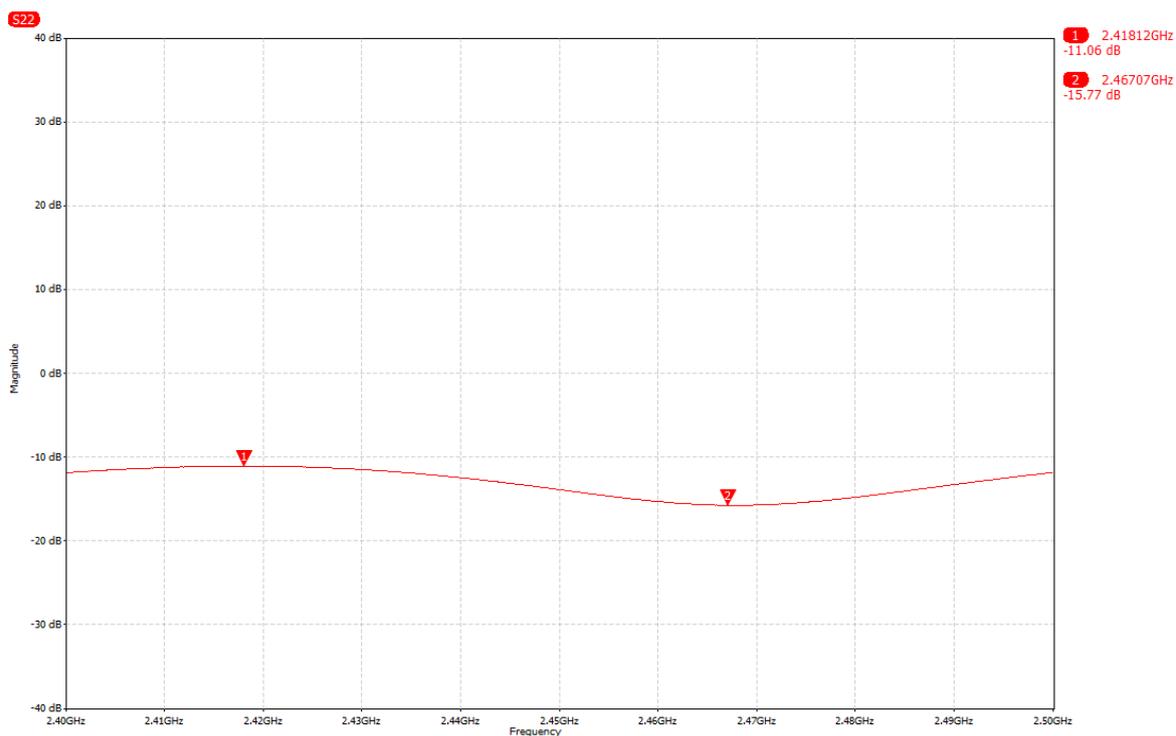
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a implementação dos dispositivos de *hardware*, conforme proposto na arquitetura do sistema, foi possível coletar os resultados para análise de desempenho dos *arrays* de antenas a partir dos parâmetros de reflexão (S) e da obtenção do ângulo de chegada, utilizando Bluetooth *direction finding*. Assim, o conteúdo apresentado neste capítulo baseia-se na apresentação dos parâmetros S22 e S21 obtidos para antena ANT_12 de cada *array*, além dos ângulo de chegada de azimute (ϕ) e elevação (θ).

5.1 PARÂMETROS DE REFLEXÃO S22

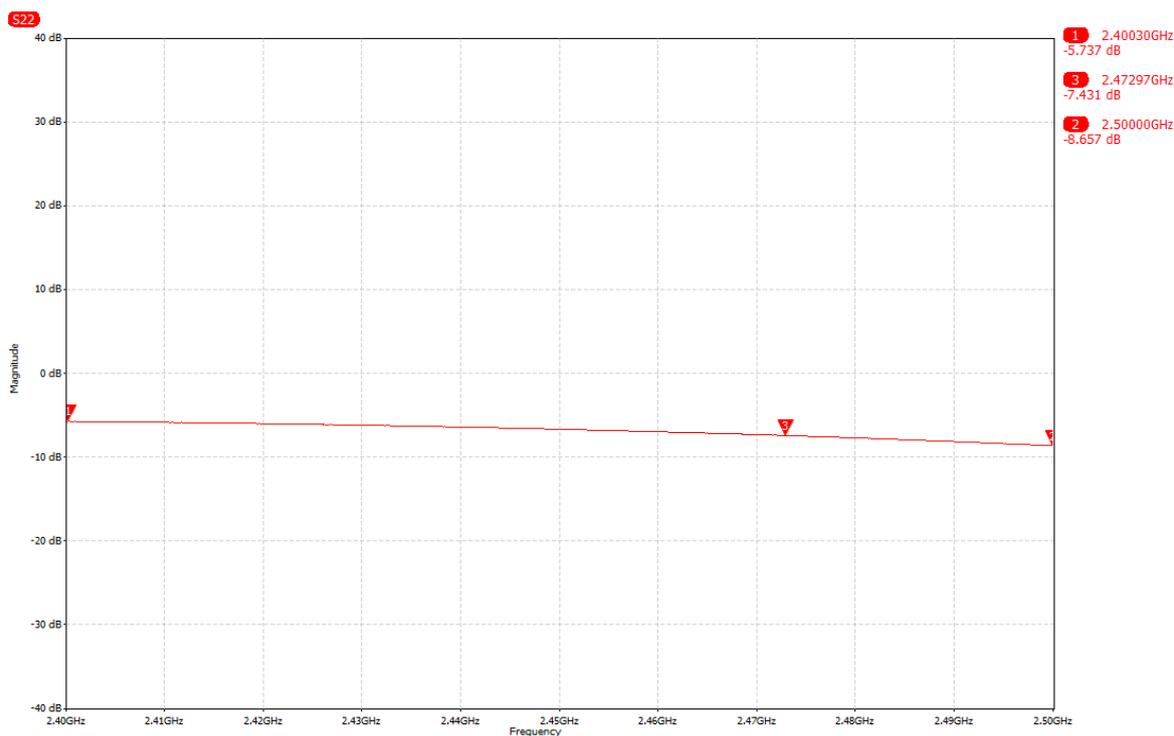
Os gráficos obtidos a partir das medições dos parâmetros S informam as melhores regiões onde é possível haver máxima ressonância na faixa de frequência compreendida entre 2,4 GHz e 2,5 GHz, que engloba o espectro disponibilizado para operação do Bluetooth BLE. Os gráficos expõem eixo as faixas de frequência nas abscissas, em GHz, e o eixo das ordenadas apresenta a atenuação dado em decibéis (dB). Ressalta-se que as melhores condições para que não haja reflexão da potência do sinal ocorrem para valores mínimos de S22. Ou seja, quanto mais o parâmetro S22 se eleva, maior será a reflexão que ocorrerá na antena.

A antena ANT_12 do *array* 1 apresenta menor reflexão na frequência de 2,467 GHz, com S22 igual a -15,77 dB de perda de retorno. Este parâmetro é exposto na Figura 41. Ou seja, este resultado infere que a antena irradia melhor em 2,467 GHz. Ressalta-se que este parâmetro varia ao longo do espectro, atingindo o valor máximo de -11,06 dB em 2,418 GHz.

Figura 41 – Parâmetro S22 para a antena do *array* 1.

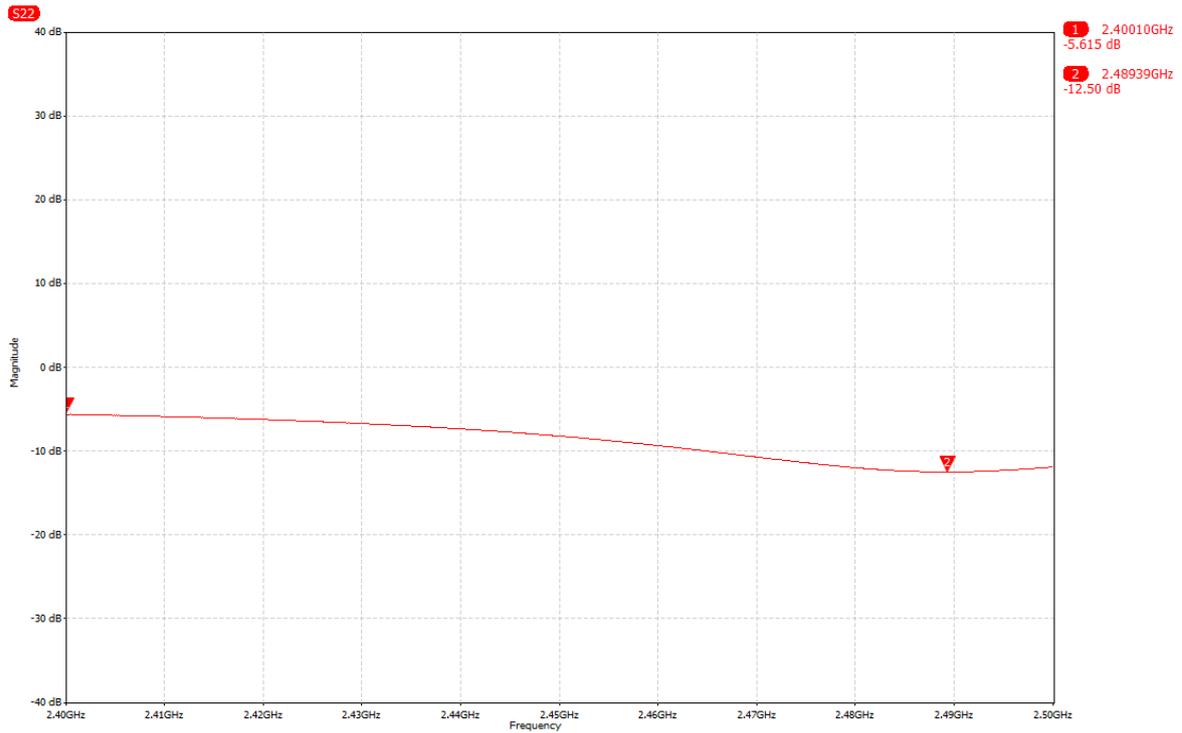
Fonte: Própria

O comportamento do parâmetro S22 da antena ANT_12 do *array* 2 é ilustrado na Figura 42. Conforme exposto a antena irradia melhor na frequência de 2,5 GHz com S22 igual a -8,65 dB, apresentando máxima de -5,737 dB em 2,4 GHz.

Figura 42 – Parâmetro S22 para a antena do *array* 2.

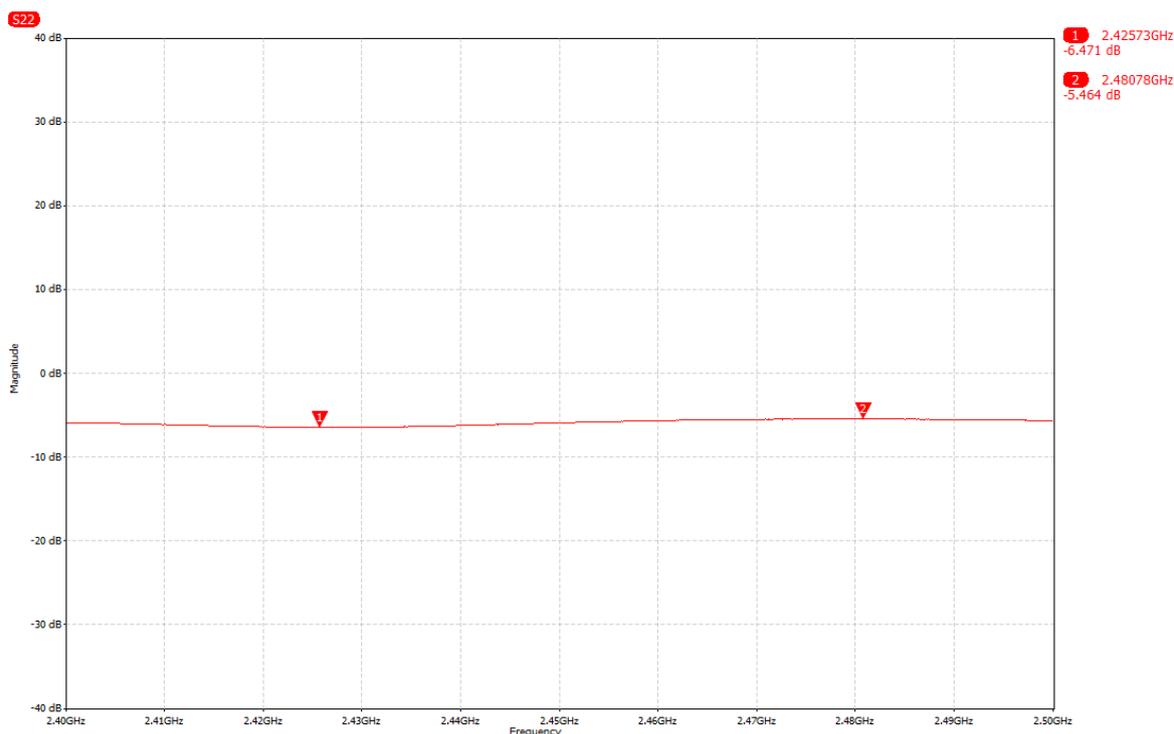
Fonte: Própria

De forma análoga, a Figura 43 expõe a variação do parâmetro S22 para antena ANT_12 do *array* 3. O melhor ponto de operação em termos de reflexão apresenta-se em 2,489 GHz, com S22 igual a -12,5 dB. A região indesejável, onde há maior reflexão da potência do sinal, situa-se em 2,4 GHz com S22 igual a -5,61 dB.

Figura 43 – Parâmetro S22 para a antena do *array* 3.

Fonte: Própria

Por fim, a Figura 44 ilustra a variação do parâmetro S22 para antena ANT_12 do *array* 4. Na frequência de 2,480 GHz, S22 equivale a -5,464 dB e em 2,425 GHz, -6,47 dB.

Figura 44 – Parâmetro S22 para a antena do *array* 4.

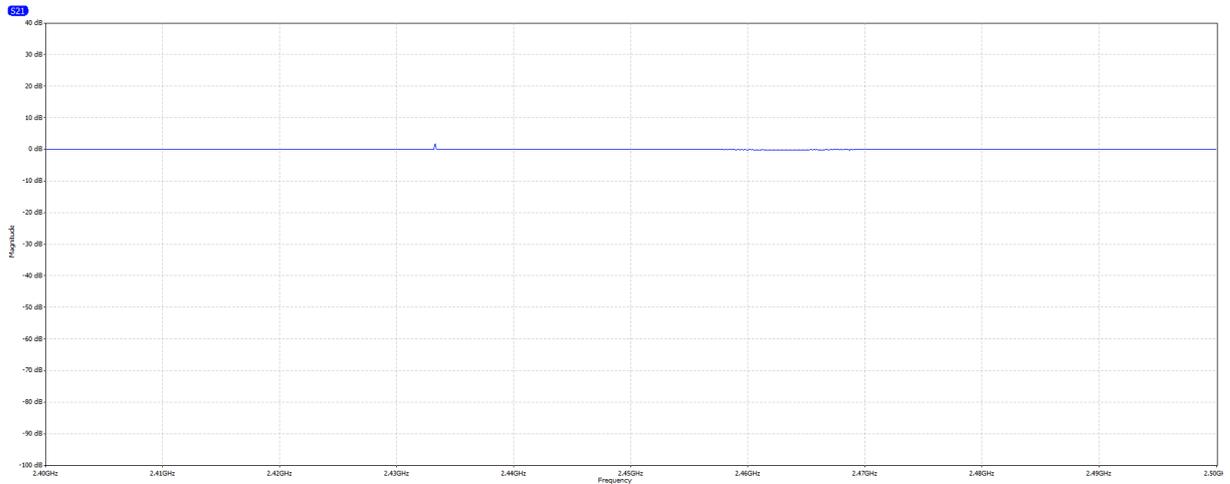
Fonte: Própria

Uma vez que esta métrica possibilita avaliar a reflexão da antena, com relação a potência do sinal perdido, espera-se que haja o menor valor possível de S22 para todo o espectro de 2,4 GHz a 2,5 GHz, que compreende o espectro do Bluetooth BLE. A antena ANT_12 do *array* 1 apresentou menor reflexão nos testes realizados com VNA e, portanto, o melhor desempenho para o parâmetro S22. As antenas dos *arrays* 2 e 4, apresentaram melhor uniformidade no espectro, se comparadas a antena do *array* 3. Contudo, a antena do *array* 3 apresenta menores valores ao final do espectro se comparado aos *arrays* 2 e 4.

5.2 PARÂMETROS S21

Para as medições dos parâmetros S21 no VNA, utilizado para comparar a absorção dos sinais recebidos, foi necessário calibrar o equipamento para uma antena de referência. Nesse contexto, uma vez que a o *array* 1 é originalmente projetado pela fabricante da plataforma utilizada, optou-se por utilizar este *array* como referência para obtenção deste parâmetro. A Figura 45 apresenta o valor do parâmetro S21 calibrado em 0 dB a partir do *array* 1 em todo o espectro de 2,4 GHz à 2,5 GHz. Para se obter resultados de S21 superiores para as antenas dos demais *arrays*, espera-se que este parâmetro apresente-se em níveis superiores a 0 dB, indicando melhor absorção do sinal se comparado com o *array* de referência.

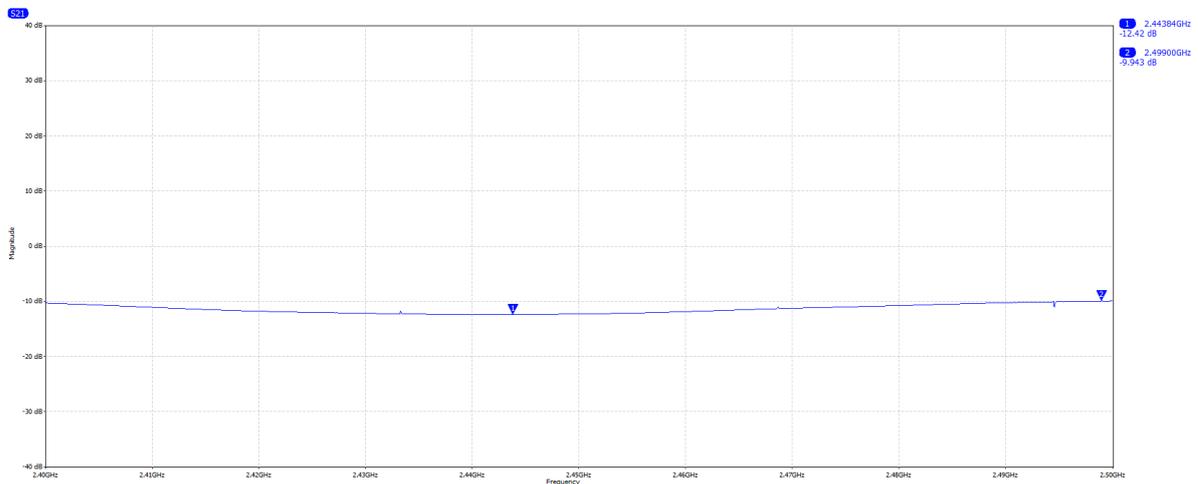
Figura 45 – Parâmetro S21 de referência, obtido da calibragem do VNA com o *array* 1.



Fonte: Própria

O parâmetro S21 da antena ANT_12 do *array* 2, se comparado com o valor de referência de 0 dB da antena do *array* 1, sofreu atenuações inferiores à 10 dB em quase todo o espectro de análise. Isso indica um desempenho inferior do *array* 2 se comparado ao *array* 1. Isso pode ser observado na Figura 46.

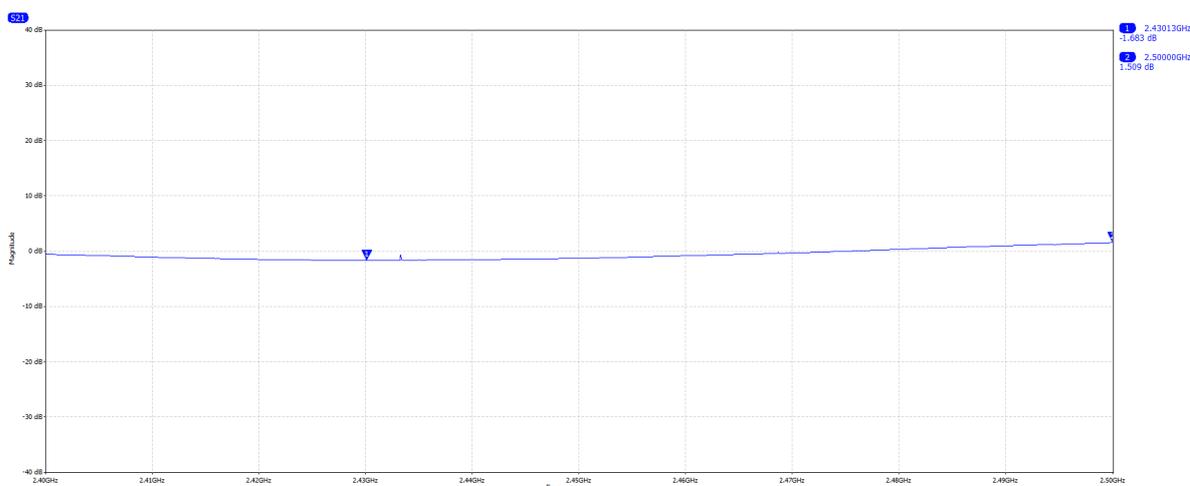
Figura 46 – Parâmetro S21 para a antena do *array* 2.



Fonte: Própria

Conforme exposto na Figura 47, o parâmetro S21 da antena ANT_12 do *array* 3 apresentou uma atenuação -1,683 dB na frequência de 2,430 GHz. Contudo, ao final do espectro de análise, observa-se certa superioridade do *array* 2 em relação ao *array* 1, com ganhos atingindo cerca de 1,51 dB.

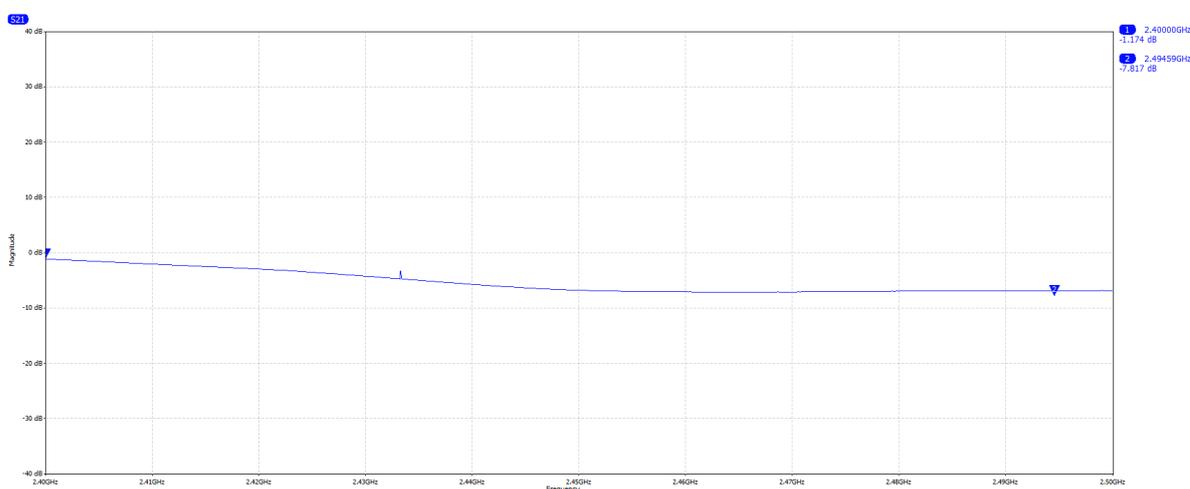
Figura 47 – Parâmetro S21 para a antena do *array* 3.



Fonte: Própria

O parâmetro S21 da antena ANT_12 do *array* 4 teve uma atenuação de -7,81 dB em relação a referência do *array* 1. Na Figura 48, podemos observar que esta atenuação na frequência de 2,494 GHz. Comparativamente, este foi o segundo pior desempenho para este parâmetro entre os *arrays* testados.

Figura 48 – Parâmetro S21 para a antena do *array* 4.



Fonte: Própria

5.3 ÂNGULOS DE CHEGADA

A partir do cenário de testes descrito no capítulo anterior, foi possível obter os ângulos de chegada em azimute e elevação, que estão dispostos nas Tabelas 4 e 5, respectivamente. Ressalta-se que, para os valores de altura e distância do localizar em relação as antenas transmissoras, o ângulo real de elevação, para todos os casos, é de 24,44°. Nesse caso, a Tabela 5 apresenta os

valores obtidos para o ângulo de elevação de chegada a medida em que variava-se o ângulo de azimute real.

Tabela 4 – Ângulos de chegada (ϕ) dos sinais de rádio recebidos nos *arrays* 1, 2, 3 e 4.

Ângulos azimute (°)	Ângulos de chegada medidos ϕ°			
	<i>Array 1</i>	<i>Array 2</i>	<i>Array 3</i>	<i>Array 4</i>
0	1	9	4	5
30	22	37	37	39
60	41	67	58	75
90	86	98	104	103
120	126	127	114	125
150	148	157	2	142
180	168	183	20	181
210	211	202	3	203
240	244	236	232	243
270	263	274	351	263
300	294	294	315	309
330	335	337	343	331

Fonte: Própria

Tabela 5 – Ângulos de elevação (θ) dos sinais de rádio recebidos nos *arrays* 1, 2, 3 e 4.

Ângulos de azimute reais (°)	Ângulos de elevação medidos θ°			
	<i>Array 1</i>	<i>Array 2</i>	<i>Array 3</i>	<i>Array 4</i>
0	19	13	12	23
30	15	24	20	15
60	20	23	25	22
90	27	21	19	27
120	25	23	28	27
150	30	21	8	23
180	35	19	21	35
210	25	26	0	49
240	28	21	20	35
270	23	22	14	28
300	30	22	30	29
330	20	14	19	26

Fonte: Própria

Para termos de comparação de desempenho na obtenção dos ângulos de chegada, as

Tabelas 6 e 7 apresentam o Erro Médio Absoluto para o conjunto de medições realizadas dos ângulos de azimute e elevação, respectivamente. Desse modo, infere-se que, em termos de recepção do ângulo de chegada, o *array 3* apresentou o pior desempenho, tanto na obtenção do ângulo de azimute quanto de elevação. Apesar de apresentar um erro médio absoluto próximo dos *arrays 1* e *2* na obtenção do ângulo de azimute, o desempenho do *array 4* na obtenção do ângulo de elevação foi pior. Por fim, mesmo possuindo valores idênticos de erro para obtenção do ângulo de chegada, o *array 1* apresentou melhor desempenho em relação ao *array 2*, pois, com ele, foi possível obter um menor erro na obtenção do ângulo de elevação. Ressalta-se que o *array 1* foi produzido pela fabricante Nordic Semiconductor, proprietária do kit de desenvolvimento nRF52833 DK utilizado para validação do Bluetooth *direction finding*. Assim, pressupõe-se que esse *array* possua melhor compatibilidade com a plataforma de testes utilizada.

Tabela 6 – Erro médio absoluto dos ângulos de azimute obtidos dos *arrays 1, 2, 3 e 4*.

Erro Médio Absoluto			
<i>Array 1</i>	<i>Array 2</i>	<i>Array 3</i>	<i>Array 4</i>
6,308°	6,308°	51,538°	6,692°

Fonte: Própria

Tabela 7 – Erro médio absoluto dos ângulos de elevação obtidos dos *arrays 1, 2, 3 e 4*.

Erro Médio Absoluto			
<i>Array 1</i>	<i>Array 2</i>	<i>Array 3</i>	<i>Array 4</i>
4,2°	4,723°	8,985°	5,831°

Fonte: Própria

6 CONCLUSÃO

Com o avanço da tecnologia Bluetooth *Direction Finding*, as soluções baseadas em orientação espacial estão viabilizando novos *insights* para referenciamento de objetos, animais ou pessoas, com a interoperabilidade e o baixo consumo do Bluetooth *Low Energy*. Nesse contexto, o presente trabalho apresenta resultados relevantes para o estado da arte de soluções com Bluetooth *Direction Finding*, uma vez que não encontramos materiais de estudos comparativos de *arrays* de antenas para este segmento. No presente trabalho, foram implementados quatro dispositivos de *hardware* contendo antenas do tipo *microstrip*, obtidas do estado da arte, e comutadores para que as antenas pudessem ser chaveadas por uma plataforma embarcada capazes de realizar os cálculos dos ângulos de azimute e elevação, de acordo com a abordagem utilizada, *Angle of Arrival*. Os *hardwares* dos *arrays* foram concebidos para captar sinais de rádio em 2,4 GHz em ambiente *indoor*. A partir disso, foram realizados testes para medir os parâmetros de reflexão do sinal de chegada, S22 e S21, utilizando um dispositivo VNA. Mais do que isso, avaliou-se a obtenção dos ângulos de chegada em um cenário *indoor* para cada um dos *arrays* de antenas implementados.

Conforme os resultados apresentados, o *array* 1, desenvolvido pela Nordic Semiconductor, apresentou melhor desempenho tanto em termos de reflexão e absorção dos sinais de chegada, quanto na recepção dos sinais de chegada para obtenção dos ângulos de azimute e elevação. Os outros *arrays*, por outro lado, possuem especificidades que os tornaram mais eficazes em um cenário de testes do que em outros. Com exceção do *array* 3, que apresentou o menor desempenho com relação ao recebimento do sinal para obtenção do ângulo de chegada, todos os outros *arrays* apresentaram erro médio absoluto relativamente próximos, assegurando o funcionamento desses dispositivos no contexto do Bluetooth *Direction Finding* a partir do método AoA.

Como trabalhos futuros, sugere-se utilizar outras implementações de *arrays* de antena para Bluetooth *Direction Finding*, para avaliação através dos métodos AoA e AoD, que não faz parte da premissa deste trabalho. Além disso, sugere-se buscar outras alternativas de métricas para avaliação dos *arrays*, principalmente em outros cenários, considerando outras abordagens de distanciamento, em ambientes *indoor* ou mesmo *outdoor*.

REFERÊNCIAS

- ASSUNÇÃO, E. A. J.; COELHO, M. T. *Problemas de Aprendizagem*. [S.l.]: Ática, 1996.
- BALANIS, C. A. *Antenna theory: analysis and design*. [S.l.]: John wiley & sons, 2016.
- BHALLA, H.; HAGGAI, O. *Unraveling bluetooth le audio*. Springer, 2021.
- BLUETOOTH SIG. *Bluetooth Core Specification V5. 1*. 2019. Disponível em: <https://www.bluetooth.org/docman/handlers/downloaddoc.ashx?doc_id=457080>. Acesso em: 21 de abril de 2022.
- BLUETOOTH SIG. *Enhancing Bluetooth Location Services with Direction Finding*. 2021. Disponível em: <<https://www.bluetooth.com/bluetooth-resources/enhancing-bluetooth-location-services-with-direction-finding/>>. Acesso em: 24 de março 2022.
- BLUETOOTH SIG. *Bluetooth® Wireless Technology*. 2022. Disponível em: <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/tech-overview/?utm_source=internal&utm_medium=blog&utm_campaign=asset-tracking&utm_content=using-bluetooth-technology-as-a-high-accuracy-positioning-solution>. Acesso em: 19 de abril 2022.
- BLUETOOTH SIG. *Histórico da Tecnologia Bluetooth*. 2022. Disponível em: <<https://sites.google.com/site/nearcommunications/historico-da-tecnologia-bluetooth>>. Acesso em: 01 de março 2022.
- BLUETOOTH SIG. *Market Update 2022*. 2022. Disponível em: <https://www.bluetooth.com/2022-market-update/?utm_source=internal&utm_medium=blog&utm_campaign=location-services&utm_content=bluetooth-location-services-device-growth-is-trending-up#location-services-drivers-today>. Acesso em: 18 de abril 2022.
- BRAY, J.; STURMAN, C. F. *Bluetooth 1.1: connect without cables*. [S.l.]: pearson Education, 2001.
- CARPMAN, J. R.; GRANT, M. A. *Wayfinding: A broad view*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- CHADHA, S. S.; SINGH, M.; PARDESHI, S. K. Bluetooth technology: Principle, applications and current status. *IJCSC*, Citeseer, v. 4, n. 2, p. 16–30, 2013.
- CHEN, Z. N.; CHIA, M. Y. W. *Broadband planar antennas: design and applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2006.
- ELESHOPEU. *LibreVNA User Manual*. 2022. Disponível em: <<https://static.eleshop.nl/mage/media/downloads/manual1.pdf>>. Acesso em: 23 de outubro 2022.
- FANG, D.-G. *Antenna theory and microstrip antennas*. [S.l.]: CRC Press, 2017.
- GÄRLING, T.; GOLLEDGE, R. G. Environmental perception and cognition. In: *Advance in environment, behavior, and design*. [S.l.]: Springer, 1989. p. 203–236.
- GHOSAL, S.; CHAUDHURI, S. R. B. Analysis of a rectangular slot on a microstrip patch antenna with an equivalent circuit model. In: *2013 IEEE Applied Electromagnetics Conference (AEMC)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–2.

- GREGSON, S.; MCCORMICK, J.; PARINI, C. *Principles of planar near-field antenna measurements*. [S.l.]: IET, 2007. v. 53.
- HEYDON, R.; HUNN, N. Bluetooth low energy: The developer's handbook. *CSR Presentation, Bluetooth SIG* <https://www.bluetooth.org/DocMan/handlers/DownloadDoc.ashx>, 2012.
- IEEE, I. Ieee standard test procedures for antennas. *ANSI/IEEE Std 149-1979*, p. 1–144, 1979.
- IEEE, I. Ieee standard definitions of terms for antennas. *IEEE Std 145-1983*, p. 1–31, 1983.
- JAMES, J. R.; HALL, P. S.; WOOD, C. *Microstrip antenna: theory and design*. [S.l.]: Peter Peregrinus Ltd, 1986. v. 12.
- JR, W. H. H.; BUCK, J. A. *Eletromagnetismo*. [S.l.]: Bookman Editora, 2013.
- LINX TECHNOLOGIES. *Ilustrações de Antenas Dipolo Magnéticas*. 2022. Disponível em: <<https://linxtechnologies.com/wp/p/antennas/ism-lora-antennas/remote-mount-ism-lora-antennas/>>. Acesso em: 11 de maio 2022.
- LINX TECHNOLOGIES. *Ilustrações de Antenas Planares*. 2022. Disponível em: <<https://linxtechnologies.com/wp/p/antennas/>>. Acesso em: 22 de maio 2022.
- LOCATELLI, L. *Orientação espacial e características urbanas*. 2007. 207 p.
- MCDERMOTT-WELLS, P. What is bluetooth? *IEEE Potentials*, v. 23, n. 5, p. 33–35, 2005.
- MENSO, E. J. El decibel: características y aplicaciones. *Revista Telegráfica Electrónica, ARBO*, p. 34–34, 1993.
- MIKULKA, J.; HANUS, S. Bluetooth edr physical layer modeling. In: IEEE. *2008 18th International Conference Radio elektronika*. [S.l.], 2008. p. 4.
- MURATA COMPANY. *PE42442 Product Specification*. 2022. Disponível em: <<https://www.psemi.com/pdf/datasheets/pe42442ds.pdf>>. Acesso em: 22 de outubro 2022.
- NORDIC SEMICONDUCTOR. nrf connect for desktop. *Library Catalog*: <www.nordicsemi.com>. Disponível em: <<https://www.nordicsemi.com/Products/Development-tools/nRF-Connect-for-desktop>>. Acesso em: 23/10/2022, 2022.
- NORDIC SEMICONDUCTOR. *nRF52833 DK*. 2022. Disponível em: <<https://www.nordicsemi.com/-/media/Software-and-other-downloads/Product-Briefs/nRF52833-DK-PB.pdf>>. Acesso em: 13 de agosto 2022.
- PAU, G. et al. Bluetooth 5.1: An analysis of direction finding capability for high-precision location services. *Sensors, Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, v. 21, n. 11, p. 3589, 2021.
- PEREIRA, J. J. et al. Medidas do coeficiente de reflexão (s11), na banda x, de materiais absorvedores de radiação eletromagnética à base de ferrita de mnzn. In: *Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa 2006 (SIGE2006)*. [S.l.: s.n.], 2006.
- POZAR, D. M. *Microwave engineering*. [S.l.]: John wiley & sons, 2011.
- SILICON LABS. *AN1195 Antenna Array Design Guidelines for Direction Finding*. 2020. Disponível em: <<https://www.silabs.com/documents/public/application-notes/an1195-antenna-array-direction-finding.pdf>>. Acesso em: 19 de abril 2022.

- SILICON LABS. *UG103.18: Bluetooth Direction Finding Fundamentals*. 2022. Disponível em: <<https://www.silabs.com/documents/public/user-guides/ug103-18-bluetooth-direction-finding-fundamentals.pdf>>. Acesso em: 22 de abril 2022.
- TEXAS INSTRUMENTS. *LM27761 Product Specification*. 2022. Disponível em: <<https://www.ti.com/general/docs/suppproductinfo.tsp?distId=10&gotoUrl=https%3A%2F%2Fwww.ti.com%2Flit%2Fgpn%2Fm27761>>. Acesso em: 23 de outubro 2022.
- TOWNSEND, K. et al. *Getting started with Bluetooth low energy: tools and techniques for low-power networking*. [S.l.]: "O'Reilly Media, Inc.", 2014.
- WEBSTER, M. *Significado da Palavra Antena*. 2022. Disponível em: <<https://www.merriam-webster.com/dictionary/antenna>>. Acesso em: 10 de maio 2022.
- WIELANDT, S.; STRYCKER, L. D. Indoor multipath assisted angle of arrival localization. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 17, n. 11, p. 2522, 2017.
- WOOLLEY, M. Bluetooth direction finding. *A technical Overview*, 2019.
- YANG, J.-W. et al. Small size circularly polarized patch antenna for 2.4 ghz wlan applications. In: *2016 IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 153–154.
- ZEADALLY, S.; SIDDIQUI, F.; BAIG, Z. 25 years of bluetooth technology. *Future Internet*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 11, n. 9, p. 194, 2019.