

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA**

THIAGO SANTOS DE LIRA

ANÁLISE DE ANTENAS UTILIZANDO POCKET VNA

FLORIANÓPOLIS, 2025.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA**

THIAGO SANTOS DE LIRA

ANÁLISE DE ANTENAS UTILIZANDO POCKET VNA

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de
Santa Catarina como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Eletrônico.

Orientador: Prof. Dr. Luis Carlos
Martinhago Schilichting

FLORIANÓPOLIS, 2025.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Lira, Thiago Santos de
ANÁLISE DE ANTENAS UTILIZANDO POCKET VNA / Thiago
Santos de Lira; orientação de Luis Carlos Martinhago Schlichting.
- Florianópolis, SC, 2025.
88 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado
em Engenharia Eletrônica. Departamento Acadêmico
de Eletrônica.
Inclui Referências.

1. Antenas. 2. Coeficiente de reflexão. 3. Analisador
de redes vetoriais. 4. Largura de banda. 5. VNA.
I. Martinhago Schlichting, Luis Carlos. II. Instituto Federal
de Santa Catarina. III. ANÁLISE DE ANTENAS
UTILIZANDO POCKET VNA.

ANÁLISE DE ANTENAS UTILIZANDO POCKET VNA

THIAGO SANTOS DE LIRA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Eletrônico e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Eletrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 01 de abril de 2025.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **LUIS CARLOS MARTINHAGO SCHLICHTING**
Data: 09/04/2025 14:15:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Luis Carlos Martinhago Schlichting, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina

Documento assinado digitalmente
 **GOLBERI DE SALVADOR FERREIRA**
Data: 09/04/2025 16:09:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Golberi de Salvador Ferreira, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina

Documento assinado digitalmente
 **MARIA CLAUDIA DE ALMEIDA CASTRO**
Data: 09/04/2025 14:25:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Maria Cláudia de Almeida Castro, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho aos meus pais, Mário Henrique e Márcia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu pai, Mário Henrique, por sempre confiar no meu potencial e me incentivar a seguir em frente, acreditando que sou capaz de superar qualquer desafio. À minha mãe, Márcia, por ser minha maior lembrança de que não há limites para o que posso alcançar. À minha irmã, Larissa, por estar sempre ao meu lado, auxiliando-me sempre que precisei. À minha companheira, Sarah, por me apoiar nos momentos difíceis e por acreditar no nosso sucesso.

Ao Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) e a todos os professores que cruzaram meu caminho, pelo comprometimento ao ensino e pela oportunidade de usufruir de um estudo de qualidade.

Ao meu orientador, Dr. Luis Carlos Martinhago Schlichting, pelo ensino, amizade e paciência comigo e com o meu trabalho, sempre me incentivando na pesquisa. O senhor é um exemplo a ser seguido.

Agradeço a todos meus amigos que participaram da minha jornada, em especial meu amigo Raul, por me motivar.

Aos meus fiéis companheiros de quatro patas, que, mesmo nos dias mais cansativos, estavam lá para animar minhas noites e encher minha casa de alegria.

E por último, mas não menos importante, agradeço a mim mesmo por ter tido a perseverança de seguir em frente, apesar de tantos que duvidaram da minha capacidade e questionaram o futuro desse caminho. Mesmo quando tudo parecia me empurrar para a desistência, escolhi continuar. As dificuldades foram muitas, mas cada desafio superado me tornou mais forte. Hoje, posso dizer com orgulho: eu venci e vou continuar vencendo. E essa conquista não é apenas minha, mas de todos que fizeram parte dessa jornada!

“Filho, para ter sucesso na vida tem que ser um bom esportista, bonito ou inteligente, você não tem os dois primeiros, eu já te vi jogando bola, então estude”
- Pai.

RESUMO

O avanço tecnológico tem impulsionado o desenvolvimento de antenas cada vez menores operando em frequências mais altas. Isso torna essencial o uso de equipamentos e técnicas que possibilitem medições mais precisas das grandezas associadas ao desempenho de antenas. Este trabalho tem como objetivo analisar a influência da transmissão e recepção em diferentes modelos de antenas, incluindo tanto antenas comerciais quanto protótipos desenvolvidos para este estudo. A metodologia adotada envolve uma revisão de literatura sobre fundamentos de antenas e medições de radiofrequência, seguida pelo projeto, fabricação e testes de quatro tipos distintos de antenas, cada uma possuindo uma topologia específica. Para a caracterização das antenas, utilizou-se um analisador de redes vetoriais (VNA), permitindo a obtenção de parâmetros fundamentais, como ganho, diretividade, coeficiente de reflexão, largura de banda e casamento de impedâncias. A análise dos resultados confirmou a relevância do uso do VNA na avaliação detalhada do desempenho das antenas, permitindo ajustes e otimizações mais precisas. Assim, este estudo contribui para uma compreensão mais aprofundada dos fatores que influenciam o comportamento das antenas em diferentes condições de operação.

Palavras-chave: Antenas. Coeficiente de reflexão. Analisador de redes vetoriais. Largura de banda. VNA

ABSTRACT

Technological advancements have driven the development of increasingly smaller antennas operating at higher frequencies. This makes the use of equipment and techniques that enable more accurate measurements of the quantities associated with antenna performance essential. This study aims to analyze the influence of transmission and reception in different antenna models, including both commercial antennas and prototypes developed specifically for this research. The adopted methodology includes a literature review on antenna fundamentals and radio frequency measurements, followed by the design, fabrication, and testing of four distinct antenna types, each with a specific topology. For the characterization of the antennas, a vector network analyzer (VNA) was used, allowing the extraction of key parameters such as gain, directivity, reflection coefficient, bandwidth, and impedance matching. The analysis of the results confirmed the relevance of using the VNA for a detailed evaluation of antenna performance, enabling more precise adjustments and optimizations. Thus, this study contributes to a deeper understanding of the factors that influence antenna behavior under different operating conditions.

Keywords: Antennas. Reflection coefficient. Vector network analyzer. Bandwidth. VNA

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Frente de Onda	26
Figura 2 – Velocidade de Propagação	28
Figura 3 – Polarização	29
Figura 4 - Impedância da Onda x Distância	30
Figura 5(a) – Near Field	31
Figura 5(b) – Near Field	31
Figura 6(a) – Mecanismos de Radiação	33
Figura 6(b) – Mecanismos de Radiação	33
Figura 6(c) – Mecanismos de Radiação	33
Figura 7 – Diagrama de Radiação	34
Figura 8 – Exemplo do Diagrama de Radiação 2D	34
Figura 9 – Exemplo do Diagrama de Radiação 3D	35
Figura 10 – Exemplo de densidade de potência de radiação	35
Figura 11 – Intensidade de radiação	36
Figura 12 – Exemplo de Largura de Banda	38
Figura 13 – Exemplo do Coeficiente de Reflexão	39
Figura 14 – Exemplo de relação de tensão da onda estacionária	41
Figura 15 – Exemplo de antena ressonante	43
Figura 16 – Exemplo de antena banda larga	43
Figura 17 – Exemplo de antena de abertura	44
Figura 18 – Exemplo de antena filamentosas	45
Figura 19 – Exemplo de antena de quadro	45
Figura 20 – Bloco antena Yagi-Uda	46
Figura 21(a) – Exemplo de antenas espirais	47
Figura 21(b) – Exemplo de antenas espirais	47
Figura 21(c) – Exemplo de antenas espirais	47
Figura 22(a) – Antena dipolo linhas de força	48
Figura 22(b) – Antena dipolo linhas de força	48
Figura 22(c) – Antena dipolo linhas de força	48
Figura 23(a) – Exemplo de antenas dipolo em V	49
Figura 23(b) – Exemplo de antenas dipolo em V	49
Figura 23(c) – Exemplo de antenas dipolo em V	49
Figura 24 – Exemplo de antena dipolo planar	50

Figura 25 – Equipamento pocket VNA	52
Figura 26 – Parâmetros desejados do Pocket VNA	52
Figura 27 – Configuração Antenas Dipolo Meia Onda	54
Figura 28 – Configuração Antenas Tipo V	55
Figura 29(a) – Configuração Antena Dipolo Planar (Horizontal)	55
Figura 29(b) – Configuração Antena Dipolo Planar (Vertical)	55
Figura 30 – Antenas dipolo de meia onda	56
Figura 31 – Antenas tipo-V	58
Figura 32 – Antenas dipolo planar	58
Figura 33 – Antena espiral comercial	60
Figura 34 – Rastreador de campo próximo	61
Figura 35 – Painel de controle - Software de controle e medição	62
Figura 36 – Painel de controle - Software comparador mapa de calor	62
Figura 37 – Antena de campo elétrico	63
Figura 38 – Antenas analisadas	65
Figura 39 – Antena A (Γ) – Marcações	66
Figura 40 – Antena A (VSWR) – Marcações	66
Figura 41 – Antena B (Γ) – Marcações	67
Figura 42 – Antena B (VSWR) – Marcações	67
Figura 43 – Antena C (Γ) – Marcações	69
Figura 44 – Antena C (VSWR) – Marcações	70
Figura 45 – Antena D (Γ) – Marcações Vertical	71
Figura 46 – Antena D (VSWR) – Marcações Vertical	72
Figura 47 – Antena D (Γ) – Marcações Horizontal	72
Figura 48 – Antena D (VSWR) - Marcações Horizontal	73
Figura 49 – Antena E (Γ) – Marcações Vertical	73
Figura 50 – Antena E (VSWR) - Marcações Vertical	74
Figura 51 – Antena E (Γ) – Marcações Horizontal	74
Figura 52 – Antena E (VSWR) - Marcações Horizontal	75
Figura 53 – Antena F (Γ) - Marcações	75
Figura 54 – Antena F (VSWR) - Marcações	76
Figura 55 – Antena G (Γ) - Marcações	76
Figura 56 – Antena G (VSWR) - Marcações	77
Figura 57 – Antena Espiral (Γ) - Marcações Vertical	79
Figura 58 – Antena Espiral (Γ) – Marcações Horizontal	79

Figura 59 - Antena Espiral (Γ) - Marcações Próximas	80
Figura 60 - Antena Espiral (VSWR) - Marcações Próximas	81
Figura 61 - Comparação 01 (450 MHz vs 458 MHz)	82
Figura 62 - Comparação 02 (433 MHz vs 510 MHz)	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Designação das bandas de frequências e aplicações típicas	25
Tabela 2 – Antenas do Tipo V	49
Tabela 3 – Manual Pocket VNA	53
Tabela 4 – Antenas Dipolo Meia Onda	57
Tabela 5 – Antenas Dipolo Meia Onda Frequência de Ressonância	57
Tabela 6 – Antenas Planar	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AM	<i>Amplitude Modulation</i> (Modulação em Amplitude)
AWG	<i>American Wire Gauge</i> (Calibre de Fio Americano)
CNC	Controle Numérico Computadorizado
CSV	<i>Comma-Separated Values</i> (Valores Separados por Vírgula)
DAELN	Departamento Acadêmico de Eletrônica
FM	<i>Frequency Modulation</i> (Modulação em Frequência)
GPS	<i>Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamento Global)
GUI	<i>Graphical User Interface</i> (Interface Gráfica do Usuário)
HF	<i>High Frequency</i> (Frequência Alta)
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
IoT	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
LHCP	<i>Left Hand Circular Polarization</i>
LHEP	<i>Left Hand Elliptical Polarization</i>
LOS	<i>Line of Sight</i> (Linha da Visada)
PCI	<i>Projeto de Circuito Impresso</i>
RF	<i>Radio Frequency</i> (Rádio Frequência)
RHCP	<i>Right Hand Circular Polarization</i>
RHEP	<i>Right Hand Elliptical Polarization</i>
RL	<i>Return Loss</i> (Perda de Retorno)
SEPEI	<i>Seminário de Ensino, Pesquisa, Extensão e Inovação</i>
TEM	<i>Transverse Electromagnetic Wave</i> (Onda Eletromagnética Transversal)
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>

VLF	<i>Very Low Frequency</i>
VNA	<i>Vector Network Analyzer</i> (Analisador de Redes Vetoriais)
VSWR	<i>Voltage Standing Wave Ratio</i> (Índice de Onda Estacionária de Tensão)
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i> (Fidelidade sem fio)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	20
1.1 Justificativa.....	21
1.2 Definição do Problema.....	22
1.3 Objetivo Geral.....	22
1.4 Objetivos Específicos.....	23
1.5 Estrutura do Trabalho.....	23
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
2.1 Princípios de Antenas.....	24
2.2 Características de uma onda eletromagnética.....	24
2.2.1 Frente de Onda.....	26
2.2.2 Período.....	27
2.2.3 Velocidade de Propagação.....	28
2.2.4 Comprimento de onda.....	28
2.2.5 Polarização.....	29
2.2.6 Impedância da onda vs distância.....	30
2.2.6.1 Far Field.....	31
2.2.6.2 Near Field.....	31
2.3 Mecanismos de Radiação.....	32
2.4 Parâmetros Fundamentais para Antenas.....	33
2.4.1 Diagrama de radiação.....	33
2.4.2 Densidade de potência de radiação.....	35
2.4.3 Intensidade de radiação.....	36
2.4.4 Diretividade.....	37
2.4.5 Ganho.....	37
2.4.6 Largura de banda (BW).....	38
2.4.7 Coeficiente de reflexão.....	38
2.4.8 Eficiência.....	39
2.4.9 Perda de retorno (Return loss).....	40
2.4.10 Relação de tensão da onda estacionária (VSWR).....	41
2.5 Tipos de antenas.....	42
2.5.1 Antenas ressonantes.....	42
2.5.2 Antenas de banda larga.....	43
2.5.3 Antenas de abertura.....	43
2.5.4 Antenas filamentosas.....	44
2.5.5 Antenas de quadro (loops).....	44
2.5.6 Antenas Yagi-Uda (Yagi).....	45
2.5.7 Antenas Espirais.....	46
2.5.7.1 Antenas Dipolo.....	46
2.5.7.2 Antenas Dipolo em V.....	47
2.5.7.3 Antenas Dipolo Planar.....	49

2.6 VNA.....	50
2.6.1 Parâmetro S.....	50
2.6.2 Equipamento Pocket VNA.....	51
2.6.3 Características do VNA.....	51
3 METODOLOGIA.....	53
3.1 Métodos Aplicados.....	53
3.1.1 Antenas Dipolo de Meia Onda.....	55
3.1.2 Antenas Tipo-V.....	56
3.1.3 Antenas Dipolo Planar.....	57
3.1.4 Antena Espiral.....	58
3.2 Pocket VNA.....	59
3.3 Rastreador Automático de Campo Próximo.....	60
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	63
4.1 Resultados do Pocket VNA em diferentes antenas.....	64
4.2 Análise e discussão dos resultados.....	65
4.2.1 Antena A.....	65
4.2.2 Antena B.....	66
4.2.3 Considerações Antena Dipolo Meia Onda.....	67
4.2.4 Antena C.....	68
4.2.5 Considerações Antena Tipo-V.....	69
4.2.6 Antena D.....	70
4.2.7 Antena E.....	72
4.2.8 Antena F.....	74
4.2.9 Antena G.....	75
4.2.10 Considerações Antena Dipolo Planar.....	76
4.2.11 Antena Espiral.....	78
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	82
5.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	84

1 INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos na área de telecomunicações possibilitaram comunicações cada vez mais precisas e confiáveis, desempenhando um papel essencial na vida moderna. Estes progressos estão cada vez mais presentes no campo das telecomunicações, que envolvem a comunicação, o compartilhamento de informações e a disseminação de ideias a longas distâncias. As tecnologias de comunicação sem fio (*Wireless*), por exemplo, dependem de antenas para emitir e receber informações através da propagação de campos eletromagnéticos. Para garantir o desempenho adequado, é necessário contar com sistemas capazes de caracterizar diversos tipos de dispositivos irradiantes utilizados em aplicações como radiodifusão, telefonia móvel, sensoriamento, rastreamento e conectividade entre equipamentos. A antena cumpre a função essencial de transformar o sinal elétrico, gerado pelo transmissor, em energia eletromagnética, que será posteriormente captada por uma antena, permitindo a comunicação eficiente.

As primeiras antenas foram construídas por Heinrich Hertz em 1888, com a finalidade de pôr em prática as teorias eletromagnéticas previstas por Maxwell. Desde essas até a atualidade, enquanto as características de desempenho foram sendo aprimoradas, novas maneiras e tecnologias de transmitir e receber sinais eletromagnéticos foram descobertas. Na telecomunicação moderna, as antenas são, em alguns casos, estruturas de extrema complexidade, mas sem elas seria totalmente impossível imaginar o nosso mundo de comunicações móveis, GPS (*Global Positioning System*) e Wi-Fi, para só citar alguns casos (FERNANDES,1980).

No século XXI as aplicações são diversas, as pessoas estão conectadas com o mundo constantemente, seja por meio da internet, ou por meio da televisão. É importante destacar a tecnologia *Wireless*, que trouxe nos últimos tempos grandes inovações no setor de comunicações. Dentre os avanços que vêm sendo desenvolvidos nos últimos anos, a tecnologia *Wireless* está presente em boa parte dos sistemas de comunicações, como os GPS, TVs, celulares, computadores e até mesmo em automóveis.

Neste trabalho, será apresentado o procedimento para teste e caracterização de antenas, utilizando uma metodologia voltada à avaliação de

desempenho, com foco na análise detalhada de seus parâmetros. Para isso, será empregado o Pocket VNA (Analisador de Redes Vetoriais), contribuindo para o aprimoramento de sistemas de comunicação modernos.

1.1 Justificativa

A crescente demanda por sistemas de comunicação sem fio, seja para aplicações em telefonia móvel, internet, sensores *IoT*, redes de comunicação industrial, veículos conectados e autônomos, drones e sistemas aéreos não tripulados, satélite e comunicações especiais, torna crucial o desenvolvimento de metodologias eficazes para a caracterização de antenas. A qualidade e o desempenho de uma antena influenciam diretamente a eficiência na transmissão e recepção de sinais eletromagnéticos, impactando não só a confiabilidade das comunicações, mas também a economia de energia e a cobertura de rede.

Diante disso, o uso de ferramentas como o Pocket VNA contribui para garantir a precisão dos testes e otimizações de antenas. A análise de parâmetros como o coeficiente de reflexão e a impedância permite ajustes finos que maximizam o rendimento das antenas, promovendo inovações e melhorias em diversos setores, como telecomunicações, automação, veículos conectados, sistemas de radar, sensores *IoT*, satélites, transmissão de TV e rádio, sistemas de navegação GPS, redes móveis 4G/5G, drones, controle remoto industrial, segurança eletrônica e comunicação entre dispositivos embarcados. Além disso, o conhecimento gerado por esse tipo de estudo pode contribuir para o desenvolvimento de novas tecnologias *Wireless*, que estão em rápida evolução e expansão.

O presente trabalho se justifica, portanto, pela necessidade de otimizar sistemas irradiantes, garantindo comunicações mais eficientes, confiáveis e acessíveis. A contribuição deste estudo está diretamente ligada ao avanço da tecnologia de antenas e à melhoria de sistemas de comunicação modernos, que são fundamentais para a sociedade conectada em que vivemos.

1.2 Definição do Problema

Projetar uma antena é apenas o primeiro passo; o verdadeiro desafio surge ao testar e validar seu desempenho. Sem uma metodologia eficaz para medir parâmetros como impedância, perdas e eficiência de transmissão, é impossível garantir que a antena funcione adequadamente em um sistema de comunicação. A ausência de uma metodologia para esses testes compromete a qualidade das transmissões e a confiabilidade do dispositivo.

A complexidade do ambiente de comunicação atual, que inclui a integração de tecnologias comerciais e projetadas, exige uma metodologia para testar antenas. Antenas comerciais podem ser otimizadas para aplicações específicas, enquanto antenas projetadas necessitam de validação em condições reais para assegurar sua funcionalidade. A falta de um método padronizado para caracterizar antenas em ambas as categorias pode levar a falhas na comunicação e à insatisfação do usuário final.

Este trabalho se propõe a desenvolver uma metodologia prática para testar e caracterizar tanto antenas comerciais quanto antenas projetadas, utilizando o Pocket VNA (Analisador de Redes Vetoriais), equipamento disponível na instituição. Com essa abordagem, será possível realizar medições precisas dos parâmetros essenciais, permitindo ajustes que garantam um desempenho ideal em diversas aplicações de comunicação sem fio.

Diante desse cenário, como é possível desenvolver uma metodologia eficaz e padronizada para testar e caracterizar antenas comerciais e projetadas com o Pocket VNA, garantindo desempenho e confiabilidade em sistemas de alta frequência?

1.3 Objetivo Geral

Desenvolver e validar uma metodologia eficaz para a caracterização e otimização de antenas, utilizando o pocket VNA.

1.4 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral apresentado, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) revisar bibliografia referente a antenas;
- b) revisar bibliografia referente a VNA;
- c) conduzir teste em antena comercial;
- d) conduzir testes em antenas projetadas;
- e) analisar os resultados obtidos.

1.5 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. O primeiro capítulo introduz o tema, apresenta a problemática e define os objetivos que guiam a pesquisa.

O segundo capítulo apresenta tópicos fundamentais para o entendimento da pesquisa, a fim de embasar, por meio de literatura previamente publicada, a metodologia e práticas feitas posteriormente.

No terceiro capítulo, descreve-se a metodologia utilizada, detalhando os instrumentos e procedimentos empregados para alcançar os resultados esperados.

No quarto capítulo são expostos os resultados dos testes práticos, junto de uma análise dos dados obtidos. Estes dados são discutidos e explicados, baseados nos tópicos estudados anteriormente.

O quinto capítulo é caracterizado pela conclusão e considerações finais do trabalho de pesquisa, sendo um resumo de tudo que foi exposto e alcançado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, serão discutidas as teorias que fundamentam a construção de antenas e os parâmetros essenciais para sua análise e avaliação. Serão abordados também os problemas inerentes à validação e testes de antenas, bem como as metodologias adequadas para realizar essas verificações, com foco na utilização do equipamento Pocket VNA. Este instrumento permite a medição de parâmetros fundamentais.

Dessa forma, este capítulo fornecerá uma visão abrangente das teorias por trás das antenas e dos procedimentos de teste e validação, com foco nos métodos e cuidados a serem adotados durante os ensaios experimentais

2.1 Princípios de Antenas

As antenas podem ser definidas como “a parte de um sistema de transmissão ou recepção projetado para irradiar ou receber ondas eletromagnéticas”. Portanto, quando se desejam efetuar transmissões ou recepções de dados, as antenas são utilizadas como dispositivo para propagá-los no espaço livre com ajuda de um meio guiado, também conhecido como linha de transmissão, que é utilizada para transportar energia eletromagnética da fonte de transmissão para a antena ou desta para o receptor (BALANIS, 1997).

As antenas transmissoras enviam os sinais através da propagação de dois campos: O campo elétrico e o campo magnético. Daí vem o nome das ondas eletromagnéticas. Esses campos se deslocam no espaço e quando chegam a uma interface elétrica condutora (antenas receptoras) com dimensões proporcionais ao comprimento de onda referente à frequência de transmissão das ondas, é gerada, por indução eletromagnética, uma diferença de potencial (ddp) entre os condutores da antena e, conseqüentemente, são criadas correntes elétricas. (OLIVEIRA, 2019).

2.2 Características de uma onda eletromagnética

Para entendimento de sistemas radiantes e de propagação de energia, é importante o conhecimento da onda eletromagnética e também a sua característica

na região distante da fonte de radiação. As diferenças das bandas de frequência desses sistemas radiantes é apresentado na Tabela 1 (SOARES; SILVA, 2003).

Tabela 1 – Designação das bandas de frequências e aplicações típicas.

Nome	Banda de Frequência	Aplicações Típicas
VLF	3 ~ 30 KHZ	Navegações em longas distâncias e comunicações submarinas
LF	30 ~ 300 KHz	Navegação em longas distâncias, rádio farol marítimo
MF	0,3 ~ 3 MHz	AM comercial, rádio marítimo, frequências de emergência
HF	3 ~ 30 MHz	Rádio amador, comunicações militares,
VHF	30 ~ 300 MHz	Televisão VHF, rádio FM, comunicação AM aérea,
UHF	0,3 ~ 3 GHz	Televisão UHF, radar, enlaces de microondas
SHF	3 ~ 30 GHz	Comunicações por satélite, enlaces de microondas e radar
EHF	30 ~ 300 GHz	Radar, satélites experimentais.
infravermelho e luz visível	$10^3 \sim 10^7$ GHz	Comunicações Ópticas

Fonte: Adaptado de Soares; Silva, (2003).

Três parâmetros determinam características do campo eletromagnético:

Meio: Cada meio tem sua impedância intrínseca. O meio que envolve a fonte (exemplo: papel, plástico, metal) e o meio através do qual a onda eletromagnética está viajando influenciam a impedância da onda e sua atenuação (KELLER, 2022).

Fonte: A impedância de entrada de uma antena, assim como a região de transição entre o campo próximo (near-field) e o campo distante (far-field), são determinadas por suas características físicas, como geometria e dimensões. Antenas podem ser projetadas intencionalmente para irradiar, como é o caso de dipolos, antenas de chifre e loops, ou podem surgir de forma não intencional, como acontece com certos cabos ou trilhas de PCB que atuam como antenas indesejadas (KELLER, 2022).

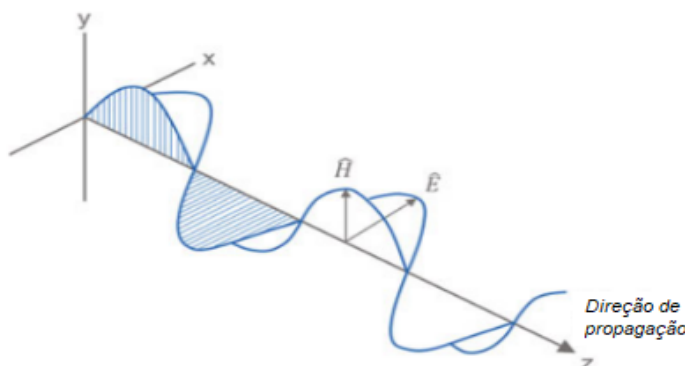
Distância: A distância entre a fonte e o ponto de observação é um fator essencial. Próximo (em comparação ao comprimento de onda $\lambda[m]$) da fonte são determinadas principalmente pelas características da fonte (baixa impedância ou fonte de alta impedância). Longe da fonte, o campo depende principalmente do meio

através do qual o campo está se propagando. Portanto, o espaço em torno de uma antena pode ser dividido em duas regiões: campo próximo (componente reativo, onda estacionária) e o campo distante (KELLER, 2022).

2.2.1 Frente de Onda

Distante da antena transmissora, uma onda eletromagnética tem duas componentes vetoriais mutuamente perpendiculares: um campo elétrico ($\vec{E}$) [A/m] e um campo magnético ($\vec{H}$) [A/m]. Esses dois campos são normais à direção de propagação, o que caracteriza uma onda transversa eletromagnética (TEM), os campos elétricos e magnéticos interagem um com o outro; um campo magnético variante induz um campo elétrico e um campo elétrico variante induz o campo magnético. A frente de onda é uma superfície imaginária formada por pontos em que os campos tem fase constante, para meios homogêneos (Z). Se, além da fase constante, os campos têm a mesma magnitude em qualquer ponto da frente de onda, ela é uniforme, conforme apresentado na Figura 1. Nesse caso os valores de máximo e mínimos dos vetores campo elétrico e campo magnético ocorrem no mesmo instante de tempo e são independentes no ponto de observação na frente de onda. Ondas eletromagnéticas no espaço livre caminham como uma onda plana não uniforme (SOARES; SILVA, 2003).

Figura 1 – Frente de Onda.



Fonte: Adaptado de KELLER (2022, p. 96).

Dito por (KELLER, 2022), o vetor de Poynting $\vec{S} [W/m^2]$ (S) representa a direção de propagação de uma onda eletromagnética e o vetor de densidade de potência complexo de um campo eletromagnético irradiado em $\vec{S}$ se tem como definido o produto vetorial dos dois vetores, apresentada na equação 2.1.

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}^* [W/m^2] \quad (2.1)$$

- $\vec{S}$ = o vetor de fluxo de energia direcional $[W/m^2]$
- $\vec{E}$ = o vetor campo elétrico $[V/m]$
- $\vec{H}^*$ = complexo conjugado do vetor campo magnético $[A/m]$

Segundo (KELLER, 2022) em vez de trabalhar com vetores de campos complexos, geralmente é muito mais prático para trabalhar com densidade de potência média $S_{avg} [W/m^2]$. Para uma onda plana uniforme (campo eletromagnético no campo distante, onde a impedância da onda $Z_w [\Omega]$ é igual a impedância intrínseca η_o em um meio sem perdas ($\epsilon_r = 1$ e $\mu_r = 1$)) o cálculo da potência média $S_{avg} [W/m^2]$ pode ser simplificado pela equação apresentada em 2.2:

$$S_{avg} = \frac{1}{2} |\vec{E}| \cdot |\vec{H}| = \frac{|\vec{E}|^2}{2\eta} = \frac{|\vec{H}|^2 \eta}{2} [W/m^2] \quad (2.2)$$

- $|\vec{E}|$ = amplitude (magnitude) do vetor/fasor do campo elétrico $[V/m]$
- $|\vec{H}|$ = amplitude (magnitude) do vetor/fasor do campo magnético $[A/m]$
- η = impedância intrínseca do meio $[\Omega]$

2.2.2 Período

O período de uma onda é o intervalo de tempo necessário para que os vetores campo elétrico e magnético dessa onda voltem a se repetir. O período T é expresso por em que f é a frequência da onda (o número de ciclos por segundo, em Hz) (SOARES; SILVA, 2003) apresentado na equação (2.3).

$$T = \frac{1}{f} \text{ (s)} \quad (2.3)$$

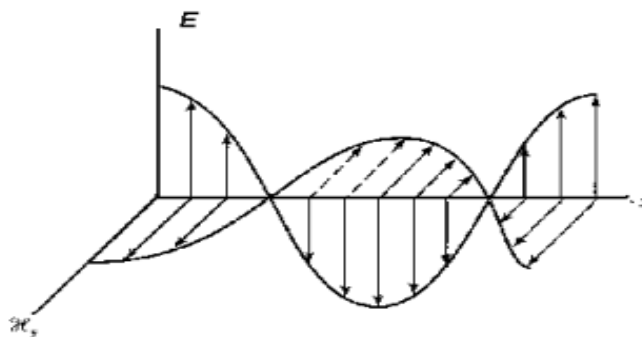
2.2.3 Velocidade de Propagação

A velocidade de propagação da onda depende do meio no qual ela se propaga e é determinada por (2.4) em que μ é a permeabilidade do meio e que ε é a permissividade do meio.

$$v = c = \frac{1}{\sqrt{\mu_o \varepsilon_o}} \simeq 3 \times 10^8 [m/s] \quad (2.4)$$

No vácuo, a velocidade da luz, representada por c , é aproximadamente 3×10^8 m/s, sendo calculada a partir dos valores $\mu_o = 4\pi \times 10^{-7} H/m$ e $\varepsilon_o = 8,854 \times 10^{-12} F/m$. Um outro meio qualquer é especificado em termos de permeabilidade relativa $\mu_r = \mu/\mu_o$ e permissividade relativa $\varepsilon_r = \varepsilon/\varepsilon_o$, demonstrado na Figura 2 (SOARES; SILVA, 2003).

Figura 2 – Velocidade de Propagação.



Fonte: Adaptado de Soares e Silva (2003).

2.2.4 Comprimento de onda

O comprimento de onda λ é a menor distância entre duas superfícies da mesma fase, o comprimento de onda é expresso por (2.5) (SOARES; SILVA, 2003).

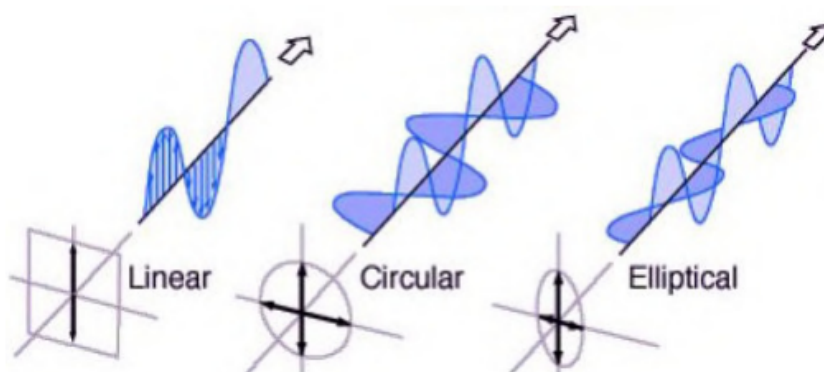
$$\lambda = \frac{c}{f} (m) \quad (2.5)$$

2.2.5 Polarização

A polarização de uma onda irradiada é definida como aquela propriedade de uma onda eletromagnética que descreve a magnitude relativa e a direção do vetor do campo elétrico variante no tempo; especificamente, representa a figura traçada em função do tempo pela extremidade do vetor em um local fixo no espaço, e o sentido em que ele é traçado, conforme observado ao longo da direção da propagação. A polarização da onda irradiada pela antena em uma direção representa a polarização de uma onda plana usada para representar a onda irradiada no campo distante. Geralmente quando se refere à polarização de uma onda, considera-se a polarização do campo elétrico no espaço, ao longo do sentido de propagação (BALANIS, 1997).

Segundo (OLIVEIRA, 2019), existem 3 tipos de polarização, considerando sempre o sentido do campo elétrico: Linear, circular e elíptica. Geralmente, a irradiação do campo elétrico no espaço possui formato elíptico. As polarizações linear e circular são casos particulares da polarização elíptica. A polarização linear pode ser feita nas direções vertical e horizontal. A polarização circular pode ser efetuada nos sentidos horário (RHCP – *Right Hand Circular Polarization*) e anti-horário (LHCP – *Left Hand Circular Polarization*). A polarização elíptica também pode ser efetuada nos sentidos horário (RHEP – *Right Hand Elliptical Polarization*) e anti-horário (LHEP – *Left Hand Elliptical Polarization*). A Figura 3 apresenta as formas dos campos para as polarizações linear, circular e elíptica.

Figura 3 – Polarização.



Fonte: Adaptado de Sankar (2016).

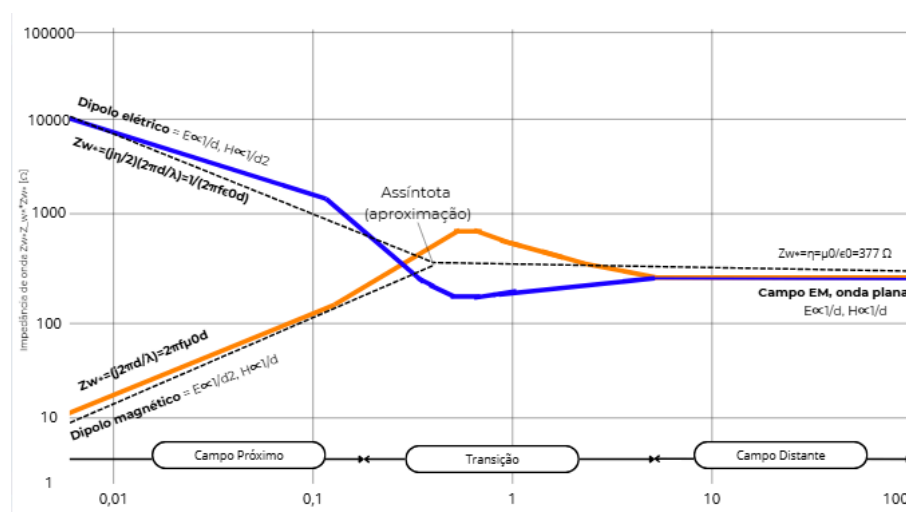
2.2.6 Impedância da onda vs distância

Segundo (KELLER, 2022) a impedância da onda $|Z_w|[\Omega]$ na dependência da distância $d[m]$ da fonte de radiação (normalizada para o limite do campo próximo/distante). O gráfico é uma simplificação e deve ilustrar que as antenas de campo magnético e antenas de campo elétrico tem diferentes impedâncias no campo próximo e que o campo eletromagnético no campo distante tem uma impedância de onda constante (para o espaço livre $|Z_w| = \eta_0 \approx 120\Omega$).

Apresentado na Figura 4, o campo próximo a impedância do meio depende principalmente da fonte. As ondas eletromagnéticas são geradas por dois tipos de fontes:

- Fontes de alta impedância, antenas de campo ($E^{\rightarrow}$): Para fontes de alta impedância, a impedância de onda $|Z_w|$ no campo próximo é alto e o campo ($E^{\rightarrow}$) domina.
- Fontes de baixa impedância, antenas de de campo ($H^{\rightarrow}$): Para fontes de baixa impedância, a impedância de onda $|Z_w|$ no campo próximo é baixa e o campo ($H^{\rightarrow}$) domina.

Figura 4 - Impedância da Onda x Distância.



Fonte: Adaptado de KELLER (2022, p. 104).

2.2.6.1 Far Field

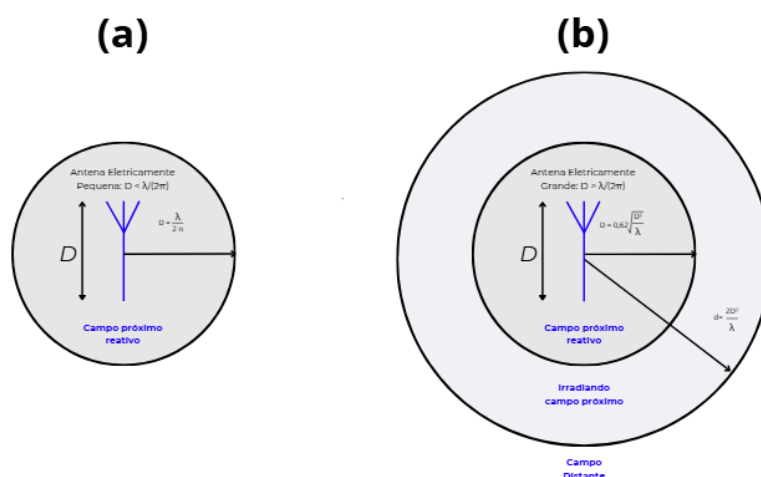
No campo distante (*far – field*) - também chamado de região de Fraunhofer (Joseph Von Fraunhofer 1787 – 1826) - os campos ($\vec{E}$) e ($\vec{H}$) se movem perpendicularmente (ortogonais) e em fase um ao outro e formam uma onda plana (KELLER, 2022).

- ($\vec{E}$) e ($\vec{H}$) atenuam com uma taxa de $1/d$ no *far – field* $d = (\text{distância para fonte})$ e, portanto a densidade de potência $S_{avg} [W/m^2]$ da onda eletromagnética atenua com $1/d^2$

2.2.6.2 Near Field

No campo próximo (*Near – Field*) – também chamado de zona de Fresnel (*Augustin–Jean Fresnel 1788 - 1827*) apresentado na Figura 5(a) e 5(b) representam bem a questão desse campo – a impedância de onda depende principalmente na fonte, e os campos elétricos e magnéticos devem ser considerados separadamente (porque a proporção de $E(z)/H(z)$ não é constante (KELLER, 2022).

Figura 5 – Near Field.



Fonte: Adaptado de KELLER (2022, p. 98)

Campo ($E^{\rightarrow}$) predominante:

- A tensão da fonte é alta em comparação com a corrente da fonte (dipolo elétrico).
- A impedância da fonte é alta
- A impedância da onda perto da antena é alta
- O campo ($E^{\rightarrow}$) atenua com uma taxa de $1/d^3$ no *near – field*
 $d = (\text{distância para fonte})$.
- O campo ($H^{\rightarrow}$) atenua com uma taxa de $1/d^2$ no *near – field*
 $d = (\text{distância para fonte})$.

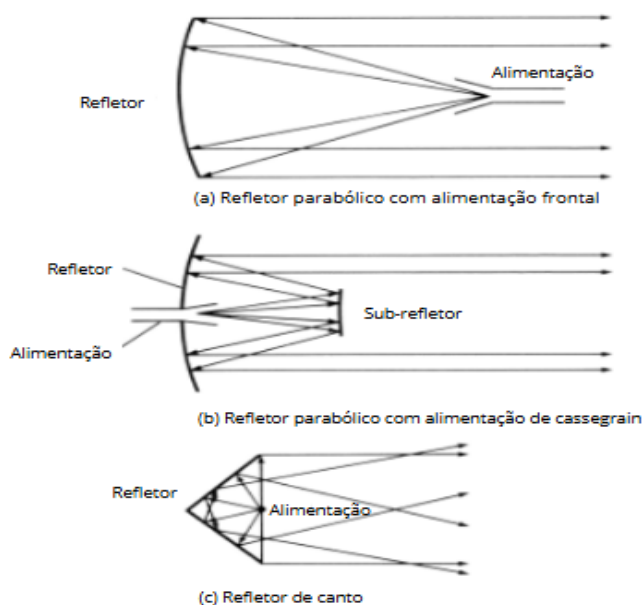
Campo ($H^{\rightarrow}$) predominante:

- A fonte de tensão é baixa em comparação com a corrente da fonte.
- A impedância da fonte é baixa (por exemplo, antenas de loop, antenas dipolo magnéticas).
- A impedância da onda perto da antena é baixa.
- O campo ($E^{\rightarrow}$) atenua com uma taxa de $1/d^2$ no *near – field*
 $d = (\text{distância para fonte})$.
- O campo ($H^{\rightarrow}$) atenua com uma taxa de $1/d^3$ no *near – field*
 $d = (\text{distância para fonte})$.

2.3 Mecanismos de Radiação

Uma das primeiras perguntas que podem ser feitas em relação às antenas seria "como é a radiação realizada?" Em outras palavras, como os campos eletromagnéticos são gerados pela fonte, contida e guiada dentro da linha de transmissão e da antena, e finalmente "desanexado" da antena para formar uma onda de espaço livre. O mecanismo de radiação é apresentado nas Figuras 6(a), 6(b), 6(c) (BALANIS, 1997).

Figura 6 – Mecanismos de Radiação.



Fonte: Figura adaptada de BALANIS (1997, p. 8).

2.4 Parâmetros Fundamentais para Antenas

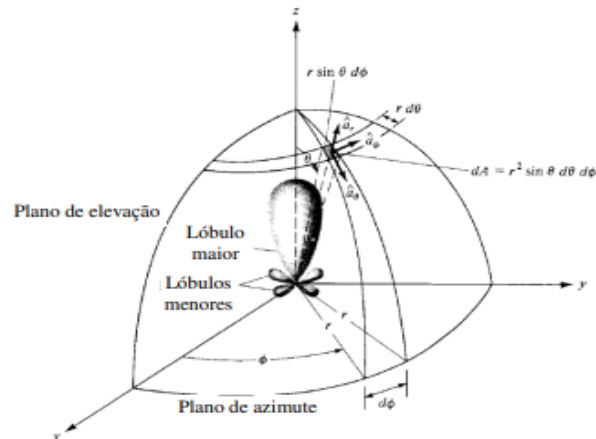
Como afirmam (SOARES; SILVA, 2003), a radiação de energia eletromagnética - por um circuito, uma cavidade ressonante ou uma linha de transmissão - pode ter um efeito importante como um fenômeno indesejado ou como parte de um processo para excitar ondas no espaço. No primeiro caso, procura-se minimizar as perdas de potência por radiação, mudando a configuração dos circuitos ou adicionando blindagem. Quando a radiação é desejada o que se procura é excitar ondas a partir uma dada fonte de energia em uma ou várias direções, da forma mais eficiente possível. O dispositivo que atua como transição ou casamento entre a fonte e a onda no espaço é conhecido como radiador ou antena.

2.4.1 Diagrama de radiação

O diagrama de radiação, também conhecido como padrão de radiação, representa as propriedades de radiação da antena, indicando as distâncias de campo distante (*far field*) em que os campos irradiados conseguem alcançar a partir

da antena em coordenadas bidimensionais ou tridimensionais. Apresentado na Figura 7 o diagrama de radiação podem conter informações como densidade de fluxo de potência, intensidade de radiação, amplitude (potência) do sinal (campos elétrico ou magnético), potência irradiada, diretividade, fase ou polarização (BALANIS, 1997).

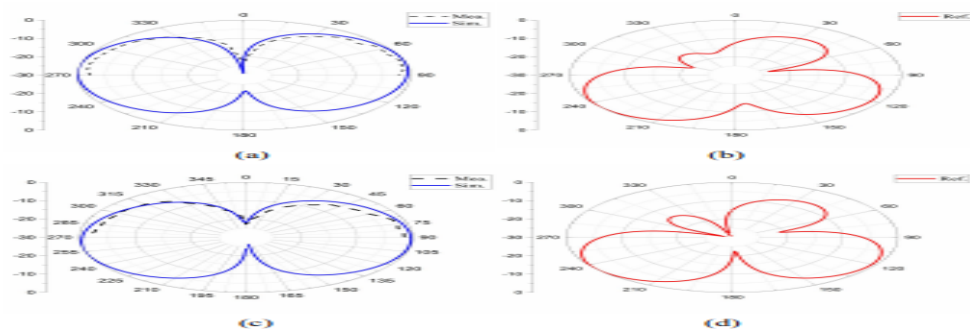
Figura 7 – Diagrama de Radiação



Fonte: Figura adaptada de BALANIS (1997, p. 28).

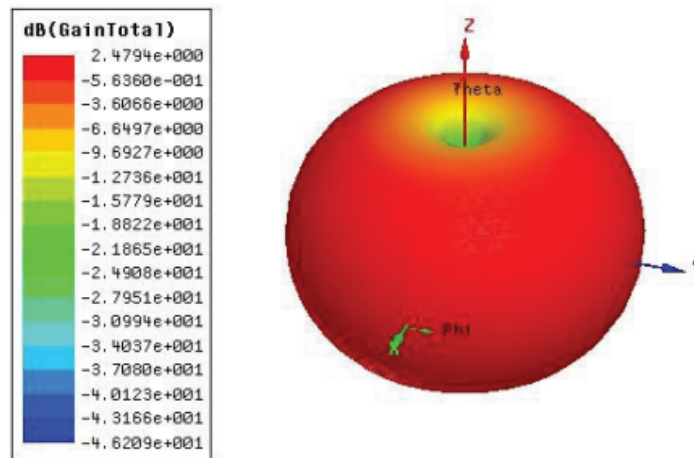
Os padrões de campo e potência são normalizados em relação ao seu máximo valor, produzindo padrões normalizados de padrões e potência. Além disso, o padrão de poder geralmente é plotado em uma escala logarítmica, ou comumente em decibel(dB), porque a escala logarítmica pode acentuar com mais detalhes pontos com lóbulos menores, sendo esses valores mais baixos (BALANIS, 1997), conforme apresentado o diagrama de radiação em 2D (Bidimensionais) na Figura 8, é apresentado o diagrama de radiação 3D (Tridimensionais) na Figura 9.

Figura 8 – Exemplo do Diagrama de Radiação 2D



Fonte: Figura adaptada de Wang et al. (2024, p. 2).

Figura 9 – Exemplo do Diagrama de Radiação 3D



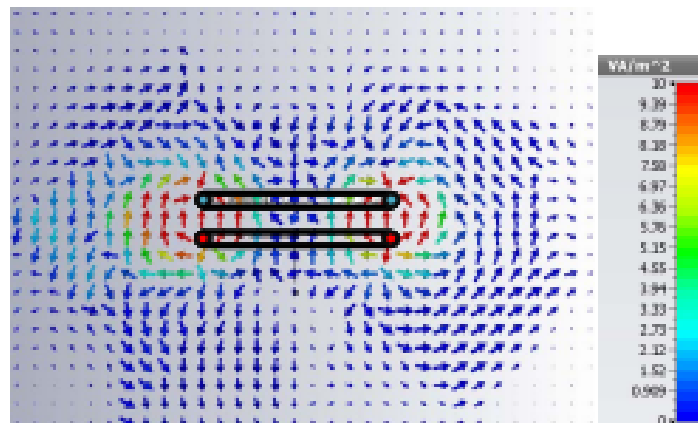
Fonte: Figura adaptada de SONAWANE, A. D.; BORMANE, D. S. (2022, p. 5).

2.4.2 Densidade de potência de radiação

Como afirma (OLIVEIRA, 2019) a densidade de potência de radiação é apresentada na Figura 10, é um valor que quantifica a potência de uma onda eletromagnética, que transporta informações pelo ar ou através de um guia de onda, e representa o rotacional entre os campos elétrico e magnético, sendo definido pelo Vetor Poynting ($\vec{W}$), apresentada na equação (2.6).

$$\vec{W} = \vec{E} \times \vec{H} [W/m^2] \quad (2.6)$$

Figura 10 – Exemplo de densidade de potência de radiação.



Fonte: Figura adaptada de LIU; HU (2024, p. 5).

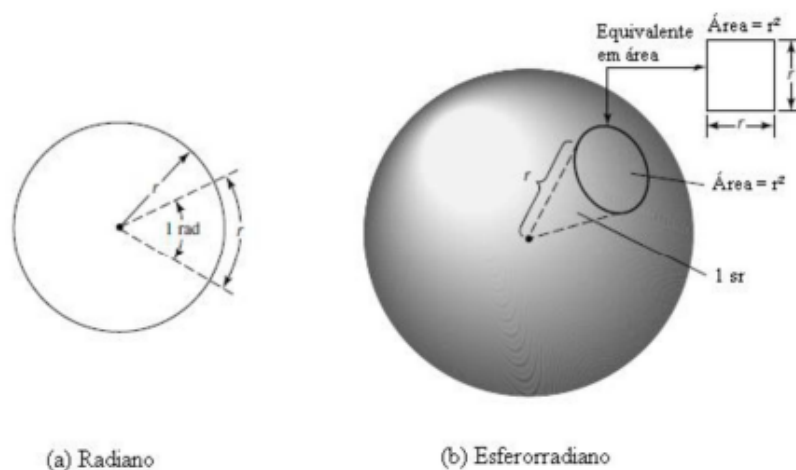
2.4.3 Intensidade de radiação

A intensidade da radiação em uma determinada direção é definida como "a potência irradiada de um antena por unidade de ângulo sólido." A intensidade da radiação é um parâmetro de campo distante e pode ser obtido simplesmente multiplicando a densidade da radiação pelo quadrado de distância. Na forma matemática, é expresso como (2.7) (BALANIS, 1997). Assim:

$$U = r^2 * W_{rad} \quad [W] \quad (2.7)$$

Apresentado na Figura 11, a medida de um ângulo sólido é um esterradiano. Um esterradiano é definido como o ângulo sólido, com seu vértice no centro de uma esfera de raio r que é subentendida por uma esfera com área de superfície igual à de um quadrado com cada lado de comprimento r . Devido ao fato de que a área da esfera corresponde a $4\pi r^2$, seu ângulo sólido total é de 4π esferorradianos (BALANIS, 1997).

Figura 11 – Intensidade de Radiação.



Fonte: Adaptado de BALANIS (1997).

Para fonte anisotrópica, você será independente dos ângulos θ e φ , como foi o caso de W_{rad} ou da intensidade de radiação de uma fonte isotrópica como apresentado na equação (2.8).

$$U_{med} = U_o = \frac{P_{rad}}{4\pi} \quad [W] \quad (2.8)$$

2.4.4 Diretividade

Diretividade é o aumento da densidade de potência em uma determinada direção a uma distância fixa de uma antena transmissora, em relação à densidade de potência com a mesma potência de transmissão distribuída igualmente em todas as direções (isotrópica). Normalmente, o valor máximo da diretividade é de interesse primário, e aqui a diretividade significa a diretividade máxima (STUTZMAN, 1992).

Quando uma direção de referência não é citada para fazer a razão de obtenção da diretividade, considera-se a direção de máxima intensidade de radiação (BALANIS, 1997), conforme apresentado na equação (2.9):

$$D = \frac{U}{U_o} = \frac{4\pi U}{Prad} \quad (2.9)$$

2.4.5 Ganho

O ganho absoluto é uma medida que descreve a performance de uma antena baseada na sua eficiência e diretividade e representa a razão entre a intensidade de radiação em uma determinada direção ($U(\theta, \phi)$) e a intensidade de radiação que seria produzida se a potência da antena (P_{in}) fosse irradiada isotropicamente (BALANIS, 1997), conforme apresentado na equação (2.10):

$$Ganho = 4\pi * \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.10)$$

Comumente se utiliza, ao invés do ganho absoluto, o ganho relativo, que é a razão entre o ganho da antena em uma determinada direção e o ganho de uma antena de referência, cujo valor é calculado ou conhecido. Assim como na diretividade, o ganho é referido à direção de máxima radiação, quando esta não é claramente definida (BALANIS, 1997).

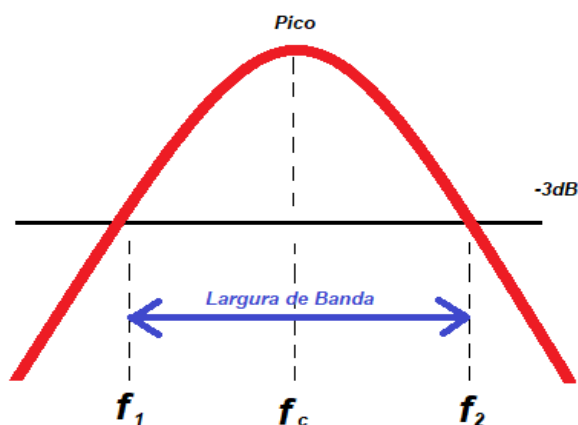
Também citado por (SOARES; SILVA, 2003) o conceito de ganho assemelha-se ao de diretividade, porém, no ganho considera-se a perda da antena, sendo assim, definido como a razão entre a intensidade de irradiação de uma antena com perdas na direção do máximo e a intensidade de irradiação dessa

mesma antena, considerando-a isotrópica. “Se a eficiência não é igual a 100%, o ganho é menor que a diretividade”.

2.4.6 Largura de banda (BW)

A largura de banda (Bandwidth) de uma antena é definido como “a faixa de frequências dentro da qual o desempenho da antena, em relação a alguma característica, está em conformidade com a especificação padrão”. A largura de banda pode ser considerado como a faixa de frequências, em lado de uma frequência central (geralmente a frequência de ressonância do dipolo, onde as características da antena (como impedância de entrada, padrão de radiação, largura de feixe, polarização, nível de lóbulo, ganho, direção de feixe, eficiência de radiação) estão dentro de um valor aceitável daqueles na frequência central. (BALANIS, 1997). O conceito de largura de banda é apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Exemplo de Largura de Banda



Fonte: Adaptado de SOARES; SILVA. (2003)

2.4.7 Coeficiente de reflexão

O coeficiente de reflexão (Γ) é um parâmetro que descreve a fração da onda refletida de volta na linha de transmissão, antes de ser transmitida pela antena em uma faixa de frequência, conforme a equação (2.11) (BALANIS, 1997).

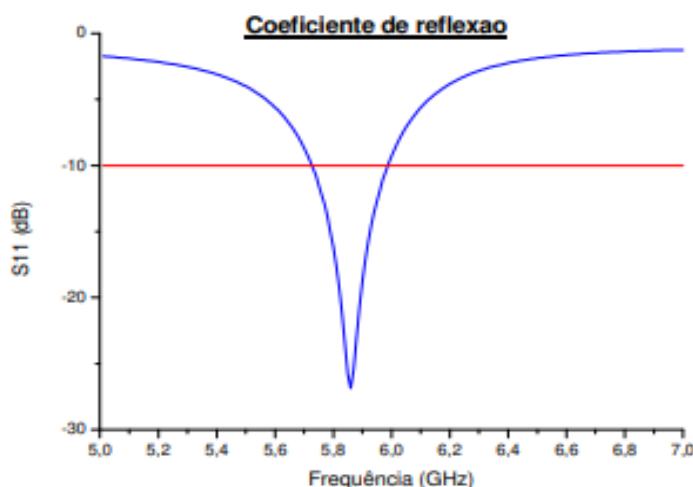
$$|\Gamma|^2 = \frac{P_r}{P_t} \quad (2.11)$$

A partir do valor de Γ , pode-se chegar ao valor da perda de retorno (S11), conforme a equação (2.12) .

$$S11_{dB} = 20 \log |\Gamma| = 10 \log \left| \frac{P_r}{P_t} \right| \quad (2.12)$$

Conforme apresentado na Figura 13, se o valor de S11, idealmente, for igual a 0 dB, implica que toda a potência inserida para ser transmitida na antena é refletida, com isso nada é irradiado para o meio. Com isso, para as antenas, considera-se o valor aceitável para transmissão com S11 menor ou igual a -10dB (SOARES; SILVA, 2003) e para (OLIVEIRA, 2019) é necessário que o valor do coeficiente de reflexão (S11) seja inferior a -10 dB para ser possível haver transmissão e recepção e, assim, o dispositivo seja considerado como uma antena.

Figura 13 – Exemplo do Coeficiente de Reflexão.



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA (2019).

2.4.8 Eficiência

A eficiência de uma antena leva em consideração a reflexão, condução e perdas elétricas. As perdas por condução e dielétrica são muito difíceis de calcular, e na maioria dos casos, são medidos. Mesmo com medições, eles são difíceis de separar e geralmente são agrupados para formar a eficiência e_{cd} apresentado na

equação (2.13). A resistência R_L é usada para representar as perdas dielétricas de condução. (BALANIS, 1997).

A eficiência dielétrica de condução e_{cd} é definida como a razão entre a potência fornecida à resistência de radiação R_r a potência fornecida a R_r e R_L .

$$e_{cd} = \left[\frac{R_r}{R_r + R_L} \right] \text{ (adimensional)} \quad (2.13)$$

Para uma haste de metal de comprimento l a área de seção transversal uniforme A , apresentado na equação (2.14) a resistência dc R_{dc} ôhmica é dada por:

$$R_{dc} = \frac{1}{\sigma} * \frac{l}{A} \text{ (ohms)} \quad (2.14)$$

Se a profundidade da penetração δ $\delta = \sqrt{2/(\omega\mu_o\sigma)}$ do metal for muito pequena em comparação com a diagonal da seção transversal da haste, a corrente é confinada a uma camada fina perto da superfície do condutor. Portanto a frequência de alta frequência pode ser escrita com base em uma distribuição uniforme de corrente, onde P é o perímetro da seção transversal da haste $P = C = 2\pi b$ para um fio circular b e R_s é a resistência de superfície do condutor, ω é a frequência angular e μ_o é a permeabilidade no vácuo e σ a condutividade do metal. (BALANIS, 1997), conforme apresentado na equação (2.15).

$$R_{hf} = \frac{1}{P} * R_s = \frac{l}{P} * \sqrt{\frac{\omega\mu_o}{2*\sigma}} \text{ (ohms)} \quad (2.15)$$

2.4.9 Perda de retorno (Return loss)

Para (POZAR, 2012) quando as impedâncias do gerador, da linha de transmissão e da antena não estão casadas, parte da potência não é entregue à carga, ocasionando reflexões ao longo do sistema irradiante. Essas reflexões são conhecidas como perdas de retorno (RL), cuja unidade é dada em decibel (dB), e definidas a seguir na equação (11) como apresentado na equação (2.16):

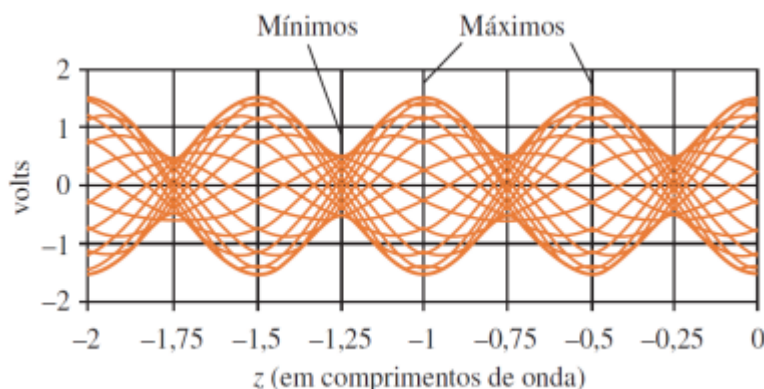
$$RL = -20 \log |\Gamma| \quad (2.16)$$

Assim quando as impedâncias estão casadas ($\Gamma = 0$), a perda de retorno tende ao infinito. Quando toda a potência incidente é radiada ($\Gamma = 1$), a perda de retorno tende a zero (POZAR, 2012).

2.4.10 Relação de tensão da onda estacionária (VSWR)

Quando a impedância da antena não está casada com a linha de transmissão, há uma reflexão do sinal ($\Gamma \neq 0$), que retorna para a linha de transmissão e cria um padrão de onda estacionária. Observando-se os níveis de tensão ao longo da linha, haverá picos maiores ou menores de tensão, dependendo se a interferência entre as ondas incidente e refletida possuem características construtivas ou destrutivas, apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Exemplo de relação de tensão da onda estacionária



Fonte: Adaptado de Wentworth (2009).

A relação entre esses pontos com níveis de tensão máximos e mínimos é chamado de VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio*) e é representada pela equação (2.17) (BALANIS, 1997).

$$VSWR = \frac{V_{m\acute{a}x}}{V_{m\acute{i}n}} = \frac{1 + |\Gamma_L|}{1 - |\Gamma_L|} \quad (2.17)$$

Como citado por Gevorkyan (2024), os construtores de antenas se esforçam para manter baixos níveis de VSWR. Primeiramente, isso ocorre porque um mau casamento de impedância entre a antena e a linha de alimentação pode danificar o gerador ou o transmissor. Se a antena apresentar um VSWR elevado,

esse problema pode ser parcialmente corrigido por meio de um dispositivo de adaptação de impedância. No entanto, nesse caso, parte da potência será dissipada, o que resulta na redução do alcance da comunicação.

2.5 Tipos de antenas

As antenas podem ser classificadas de acordo com o seu formato, materiais e maneira de fabricação, características de radiação, entre outros. Essencialmente, elas são classificadas em dois grupos: Direcionais e omnidirecionais. As antenas direcionais (diretivas) transmitem em apenas uma direção ou setor. Já as antenas isotrópicas têm a característica de transmitir para todos os lados, omnidirecionalmente. Há uma infinidade de modelos de antenas disponíveis no mercado. Os tipos mais comuns são: Filamentares, antenas de abertura, microfita, arranjos de antenas, refletoras e tipo lente, Yagi, de fenda, helicoidais, cornetas, espirais, fractais. O tipo de aplicação e projeto a ser implementado determinarão qual o tipo de antena mais adequado para utilização (OLIVEIRA, 2019).

De acordo com seu desempenho com relação à frequência, as antenas podem ser divididas em quatro tipos básicos: Antenas eletricamente curtas, Antenas ressonantes, Antenas de banda larga e Antenas de abertura (SOARES; SILVA, 2003).

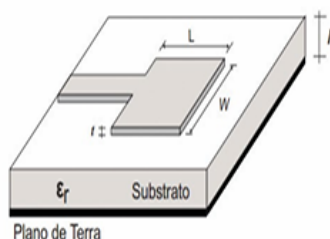
2.5.1 Antenas ressonantes

As antenas que operam em uma única frequência ou em uma pequena faixa de frequência são denominadas de ressonantes. As suas características principais são ganho baixo ou moderado, impedância de entrada real e a largura de banda estreita (BIDINOTTO, 2017).

Na faixa de HF comprimentos de onda entre 100m e 10m, é possível construir estruturas da ordem de grandeza do comprimento de onda utilizado. Em aplicações na faixa de HF, grande ênfase dada sobre os dipolos de meia onda que, por maior facilidade de utilização, são operados em polarização horizontal. Essa escolha de polarização também pode ser analisada, lembrando-se que, na faixa de

HF, o mecanismo de radiação fundamental é a propagação ionosférica (SOARES; SILVA, 2003), o exemplo de uma antena ressonante é apresentada na Figura 15.

Figura 15 – Exemplo de antena ressonante

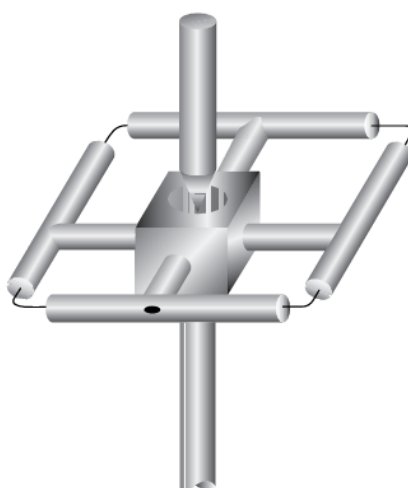


Fonte: Figura adaptada de SILVA, BARBOSA e LIMA (2012, p. 3).

2.5.2 Antenas de banda larga

Quando a antena tem uma performance aceitável em um ou mais parâmetros (diagrama, ganho, e/ou impedância) sobre uma largura de banda de 2:1 com relação à frequência superior e inferior de operação, ela é classificada como de banda larga. As suas características principais são ganho baixo ou moderado; ganho constante; impedância de entrada real; e largura de banda grande, para aplicações em HF e VHF (BIDINOTTO, 2017), conforme apresentado na Figura 16 o exemplo de uma dessas antenas.

Figura 16 – Exemplo de antena banda larga

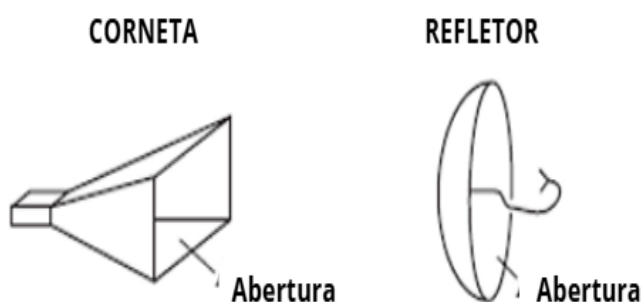


Fonte: Adaptado de BALANIS (1997).

2.5.3 Antenas de abertura

São consideradas antenas de abertura todas aquelas que, de alguma forma, envolvem uma área na qual existe uma distribuição superficial de corrente elétrica ou de campos eletromagnéticos. São exemplos típicos de antenas de abertura, entre outros, os refletores em geral e as cornetas (RIOS; PERRI, 2002), como apresentado na Figura 17. As antenas de abertura são úteis para aplicações aeronáuticas e espaciais devido à possibilidade de serem montadas na fuselagem de aviões e naves espaciais, bem como serem cobertas por materiais dielétricos para proteção das condições ambientais (BALANIS, 1997). Esse tipo de antena inclui os guias de onda abertos, as antenas de chifre circulares e retangulares, as refletoras, lentes e os arranjos refletores. Geralmente são utilizadas em microondas e ondas de frequência milimétricas. Seus ganhos vão de moderados a altos (POZAR, 2012).

Figura 17 – Exemplo de antena de abertura

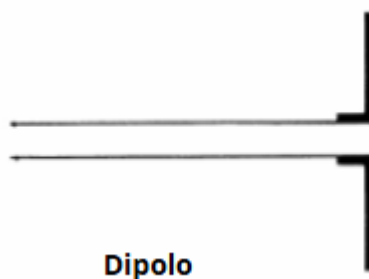


Fonte: Figura adaptada de STUTZMAN (2016, p. 18).

2.5.4 Antenas filamentosas

As antenas filamentosas são as mais comuns e estão presentes em quase todos os locais, como prédios, automóveis, aviões, naves espaciais, brinquedos a controle remoto. Conforme apresentado na Figura 18, geralmente, elas possuem baixo ganho e são mais usadas em frequências HF a UHF (OLIVEIRA 2019).

Figura 18 – Exemplo de antenas filamentosas.

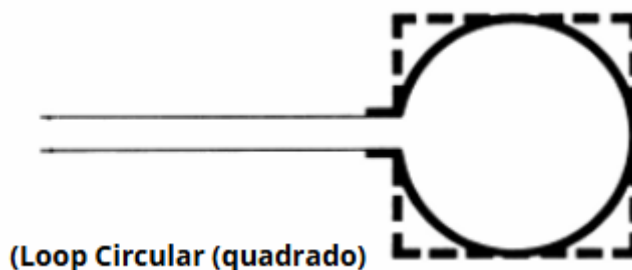


Fonte: Adaptado de BALANIS (1997).

2.5.5 Antenas de quadro (loops).

As antenas de quadro são um tipo de antena filamentar e podem ter as formas retangular, circular, quadra, elíptica entre outras. Devido à facilidade de fabricação, o modelo mais comum delas é o tipo circular, conforme apresentado na Figura 19. Esse tipo de antena pode ser aplicado em equipamentos de detecção de ondas eletromagnéticas de campo próximo, medição de compatibilidade eletromagnética e acoplamento de energia dentro e fora de cavidades (FUSCO, 2006).

Figura 19 – Exemplo de antenas de quadro.



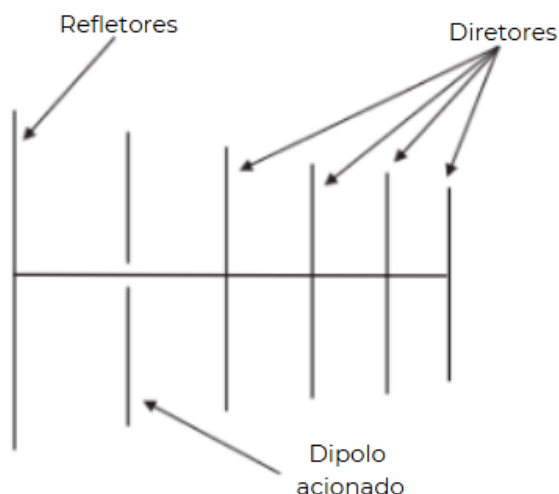
Fonte: Adaptado de BALANIS (1997)

2.5.6 Antenas Yagi-Uda (Yagi)

Apresentado na Figura 20, as antenas Yagi-Uda, mais conhecidas como Yagi, receberam esse nome em homenagem a Hidet Sugu Yagi, um engenheiro eletricitista japonês, natural de Osaka que, juntamente com seu colega Shintaru Uda, criaram esse modelo de antena em 1926 (FUSCO, 2006). São utilizadas em várias

aplicações em UHF e micro-ondas, pois seu formato proporciona baixa resistência ao vento, ganho elétrico satisfatório, operação multifrequencial e diagrama direcional de radiação polar (SOARES; SILVA, 2003).

Figura 20 – Bloco Antena Yagi-Uda.

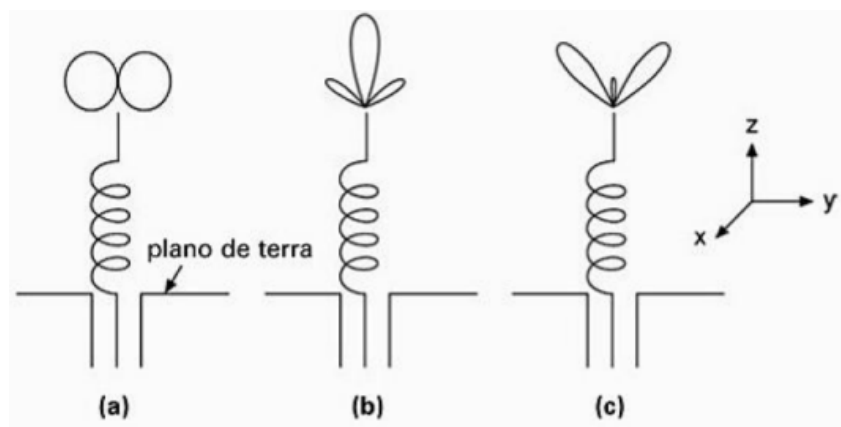


Fonte: Adaptado de OTT (2009).

2.5.7 Antenas Espirais

Apresentado nas Figuras 21(a), 21(b) e 21(c), as antenas espirais possuem as formas de hélices ou espirais a partir de um ou vários condutores e operam no modo de radiação omnidirecional, longitudinal axial e cônico, com polarização circular. Elas geram ondas que se deslocam em formato espiral, apresentam grande largura de banda e impedância de entrada predominantemente real ao longo da faixa operacional. Quando a circunferência da espiral for aproximadamente o comprimento de onda, a antena irradia no modo axial, muito utilizada para enlaces ponto a ponto. Quando a dimensão for menor do que o comprimento de onda, ocorre o modo normal de radiação, que é omnidirecional e utilizado para comunicações móveis. Já quando a espiral for maior do que o comprimento de onda, a antena irradia em modos de mais alta ordem, como o modo cônico (OLIVEIRA, 2019).

Figura 21 – Exemplo de antenas espirais.



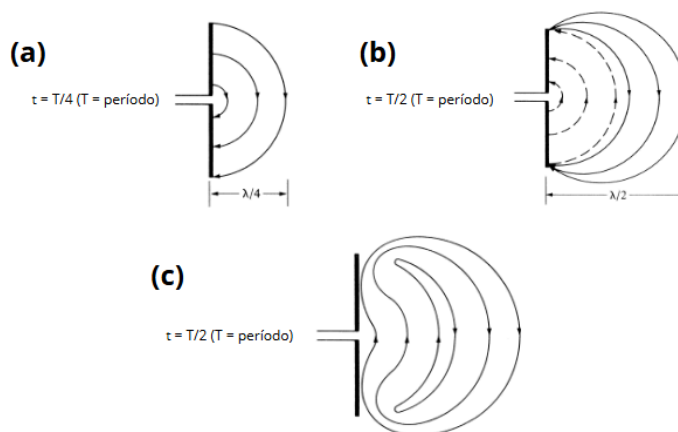
Fonte: Adaptado de Fusco (2006)

2.5.7.1 Antenas Dipolo

As linhas elétricas de força são separadas da antena para formar as ondas do espaço livre. É necessário apenas para dar uma melhor interpretação física do descolamento das linhas de força. Embora seja um mecanismo um tanto simplificado, permite visualizar a criação das ondas do espaço livre. A Figura 22(a) mostra as linhas de força criadas entre os braços de um pequeno dipolo alimentado no centro no primeiro quarto do período durante o qual a carga atingiu seu valor máximo (assumindo uma variação de tempo senoidal) e as linhas viajaram para fora uma distância radial $\lambda / 4$. Para este exemplo, vamos supor que o número de linhas formadas seja três. Durante o próximo quarto do período, as três linhas originais viajam um $\lambda / 4$ adicional (um total de $\lambda / 2$ do ponto inicial) e a densidade de carga nos condutores começa a diminuir. Isso pode ser pensado como sendo realizado pela introdução de cargas opostas que, no final da primeira metade do período, neutralizam as cargas sobre os condutores. As linhas de força criadas pelas cargas opostas são três e percorrem uma distância $\lambda/4$ durante o segundo quarto do primeiro semestre, e eles são mostrados tracejados na Figura 22(b). O resultado final é que existem três linhas de força apontadas para cima no primeiro $\lambda/4$ distância e o mesmo número de linhas direcionadas para baixo no segundo $\lambda/4$. Desde que não haja carga líquida na antena, então as linhas de força devem ter sido forçadas a se separar dos condutores e se unir para formar loops fechados. Isso é

mostrado na Figura 22(c). Na segunda metade restante do período, o mesmo procedimento é seguido, mas na direção oposta (BALANIS, 1997).

Figura 22 – Antenas Dipolo Linhas de Força



Fonte: Figura adaptada de BALANIS (1997, p. 15).

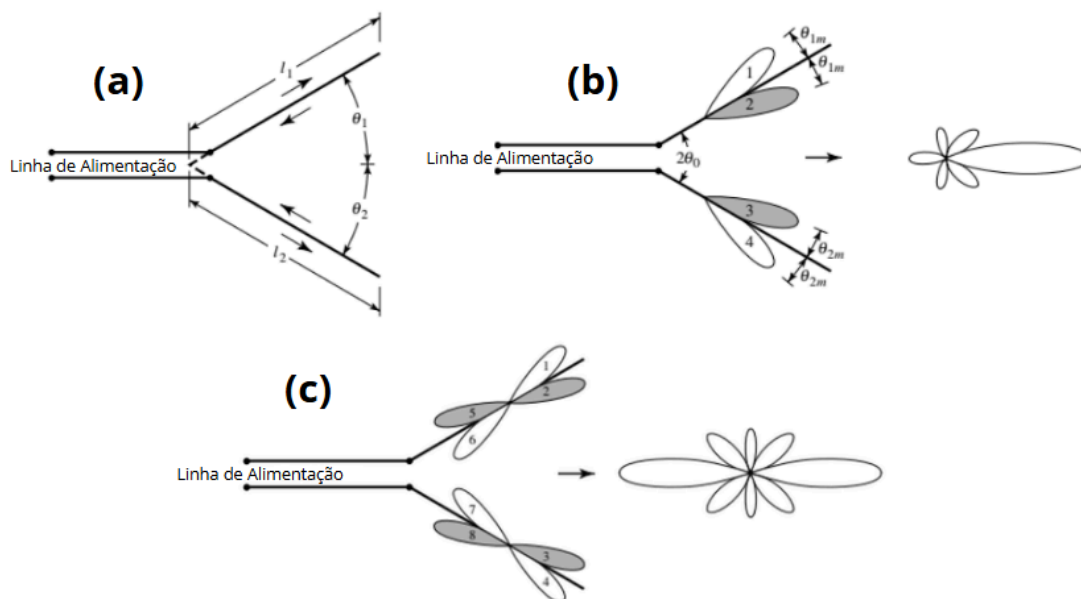
2.5.7.2 Antenas Dipolo em V

Para algumas aplicações, uma única antena de fio longo não é muito prática porque sua diretividade pode ser baixa, seus lóbulos laterais podem ser altos e seu feixe principal é inclinado num ângulo, que é controlado por seu comprimento. Essas e outras desvantagens das antenas de fio longo único podem ser superadas utilizando uma variedade de fios (BALANIS, 1997).

Um conjunto muito prático de fios longos é a antena V formada usando dois fios, cada um com uma de suas extremidades conectada a uma linha de alimentação, apresentado na Figura 23(a) (BALANIS, 1997).

A maioria das antenas V são simétricas. Também antenas V pode ser projetado para ter padrões de radiação unidirecionais ou bidirecionais, como apresentado nas Figuras 23(b) e 23(c), respectivamente. Para atingir as características unidirecionais, os fios da antena V devem ser não ressonantes, o que pode ser feito minimizando se não eliminar completamente os reflexos das extremidades do fio. (BALANIS, 1997).

Figura 23 – Exemplo de antenas dipolo em V.



Fonte: Figura adaptada de BALANIS (1997, p. 561).

Como apresentado na Tabela 2, deve-se levar em conta que começam a aparecer parâmetros para a otimização do sistema irradiante. Assim, não só o comprimento, mas também o ângulo de abertura terá importância (SOARES; SILVA, 2003).

Tabela 2– Antenas do Tipo V

Comprimento de antena (em λ)	Ganho em dB (s/dipolo $\lambda/2$)	Ângulo ótimo do vértice (Graus)	Ângulo de elevação (Graus)
1	2,1	90	31
2	2,9	70	27
3	3,8	58	23
4	5,0	50	20
6	8,0	40	16
8	11,9	35	14
10	17,8	33	13

Fonte: Adaptado de Soares; Silva, (2003)

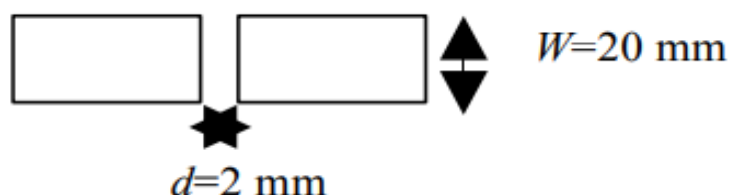
2.5.7.3 Antenas Dipolo Planar

Como afirmam (SOARES; SILVA, 2003) por se tratar de uma antena planar, leva-se em consideração o comprimento de onda dado em função da frequência de ressonância (f_r) desejada e da permissividade relativa (ϵ_r) adotada, apresentada na equação (2.18), sendo que c representa a velocidade da luz.

$$\lambda = \frac{c}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.18)$$

O modelo utilizado neste trabalho e dimensionamento é apresentado na Figura 24. Cada braço do dipolo tem comprimento $L=10\text{mm}$ e é constituído por uma lâmina de largura $W=20\text{mm}$. O distanciamento entre cada dipolo foi fixado em 2mm . (PINHEIRO; SOUZA; CORDEIRO; ALMEIDA, 2007).

Figura 24 – Exemplo de antena Dipolo Planar



Fonte: Figura adaptada de Pinheiro; Sousa; Cordeiro; Almeida (2007, p. 1).

Em antenas planares, o aumento da superfície efetiva é uma característica capaz de impor modificações a seu funcionamento (PINHEIRO; SOUZA; CORDEIRO; ALMEIDA, 2007). Foi observado um comportamento semelhante ao mencionado por (ALIAKBARI; LAU, 2019) que, em sua análise, observam que “há um compromisso entre a estabilidade do padrão de radiação e a largura de banda de impedância conforme a largura do dipolo varia”

2.6 VNA

Os VNAs são usados para testar especificações de componentes e verificar simulações de projeto, para garantir que os sistemas e seus componentes

funcionem corretamente juntos. Engenheiros de P&D e engenheiros de teste de fabricação geralmente usam VNAs em vários estágios do desenvolvimento de produtos. Os projetistas de componentes precisam verificar o desempenho de seus componentes, como amplificadores, filtros, antenas, cabos, mixers, etc. O projetista do sistema precisa verificar as especificações de seus componentes para garantir que o desempenho do sistema no qual estão se baseando atenda às especificações do subsistema e do sistema (TEKTRONIX, 2017).

2.6.1 Parâmetro S

O parâmetro S, de acordo com Bogatin (2018), descreve o comportamento de qualquer interconexão como, por exemplo, resistores, capacitores, trilhas e planos em PCB, etc., quando estes são submetidos a uma forma de onda. Ele é utilizado para criar um modelo comportamental da interconexão ou dispositivo em teste (Device Under Test - DUT).

Para a aquisição deste parâmetro, um sinal é injetado no equipamento de teste e, através de dispositivos específicos de medição, é medida a resposta de reflexão e transmissão desta onda. No domínio de frequência, o instrumento utilizado é o Analisador Vetorial de Redes (Vector Network Analyzer- VNA), o qual mede a magnitude e a fase do sinal. (BOGATIN, 2018)

2.6.2 Equipamento Pocket VNA

Segundo Yousif (2021), o dispositivo Pocket VNA é um VNA. Apresentado na Figura 25, ele trabalha em uma faixa de frequência de 400 kHz a 4 GHz, possuindo dois canais de entrada bidirecionais que medem S11, S12, S21 e S22 ao mesmo tempo. Para a geração dos dados, utilizou-se o próprio software deste dispositivo. Nele é possível visualizar graficamente os resultados em função da frequência. Além disso, ele possibilita a exportação dos dados em formato CSV ou .xls.

Figura 25 – Equipamento Pocket VNA.

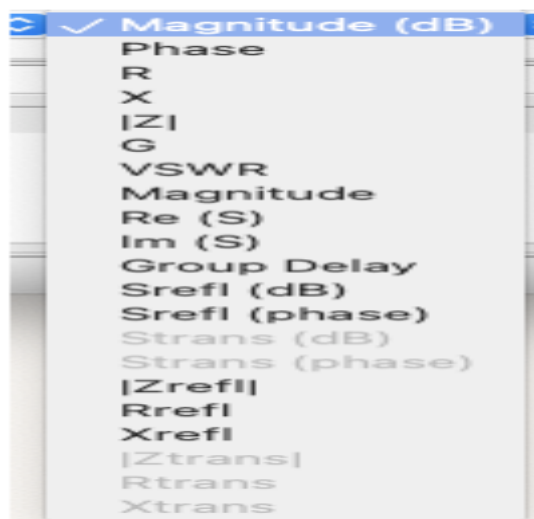


Fonte: Elaboração Própria (2024)

2.6.3 Características do VNA

Segundo o fabricante (POCKET VNA, 2023), a interface do software permite selecionar qual parâmetro de rede deve ser analisado, conforme ilustrado na Figura 26. Essa funcionalidade possibilita ao usuário escolher entre diferentes parâmetros, como S11, S21, S12 e S22, dependendo da aplicação desejada.

Figura 26 – Parâmetros desejados do Pocket VNA.



Fonte: Retirado do manual (POCKET VNA, version 1.92, 2023)

A Tabela 3 apresenta os principais parâmetros disponíveis e suas respectivas funções, auxiliando na interpretação dos dados obtidos por meio do Pocket VNA.

Tabela 3: Manual Pocket VNA

Magnitude(dB)	Magnitude do sinal medido em dB
<i>Fase</i> (θ)	Diferença entre o sinal transmitido e o medido
<i>R</i>	Parte real da impedância
<i>X</i>	Parte imaginária da impedância
$ Z $	Valor absoluto da impedância
<i>G</i>	Condutância
<i>VSWR</i>	Relação da onda estacionária de tensão
Magnitude	Magnitude do sinal medido em linear escalar
$Re(S)$	Parte real do parâmetro S
$Im(S)$	Parte imaginária do parâmetro S
<i>Group Delay</i>	Atraso do sinal que passa por um DUT

Fonte: Adaptado do manual Pocket VNA GUI versão 1.92 (2024).

- Faixa de frequência: Você pode realizar medições de pelo menos 500 kHz a 4 GHz. Medições ligeiramente fora dessa região (como 400 kHz ou 4,2 GHz) podem ser possíveis, mas não são garantidas.
- Faixa dinâmica: A faixa típica é de até -70dB em 50 MHz e até -40dB em 4 GHz. A faixa dinâmica varia com a frequência e depende dos parâmetros de varredura e calibração, como fator de média ou suavização.
- Faixa de impedância: Resultante da faixa dinâmica, a impedância pode ser normalmente medida de $3[\Omega]$ até $1K[\Omega]$.

3 METODOLOGIA

Este trabalho tem como objetivo analisar e estudar o comportamento do coeficiente de reflexão e a razão de tensão da onda estacionária, com averiguação em suas demais grandezas utilizando um analisador vetorial de redes.

Levando esse objetivo em consideração, segundo Silmara Lösch et al. (2022) este trabalho pode ser classificado como uma pesquisa exploratória – uma vez que “possibilita explorar questões complexas e pouco conhecidas, o que pode levar a uma compreensão mais profunda e abrangente do fenômeno estudado”. Ainda, o trabalho pode ser definido como qualitativo, por tratar-se de um estudo de caso e pesquisa bibliográfica. A partir disso, foi feita a revisão bibliográfica sobre o assunto e então se deu início aos experimentos práticos. Para tal, foi realizado o layout de sete PCs com variações no tamanho físico e no comprimento das trilhas, além de uma antena espiral comercial. Para os testes foi utilizado o VNA com o software Pocket VNA.

3.1 Métodos Aplicados

Os testes realizados nas antenas utilizando o Pocket VNA foram ajustados conforme apresentado na Figura 27 para o dipolo de Meia Onda.

Figura 27 – Configuração Antenas Dipolo de Meia Onda



Fonte: Elaboração Própria (2024)

A antena utilizada nos testes de dipolo de meia onda foi a mesma empregada na configuração do dipolo tipo-V, conforme apresentado na Figura 28. Ambos os testes foram realizados com a mesma estrutura de antena, garantindo a consistência nos resultados obtidos para as duas configurações.

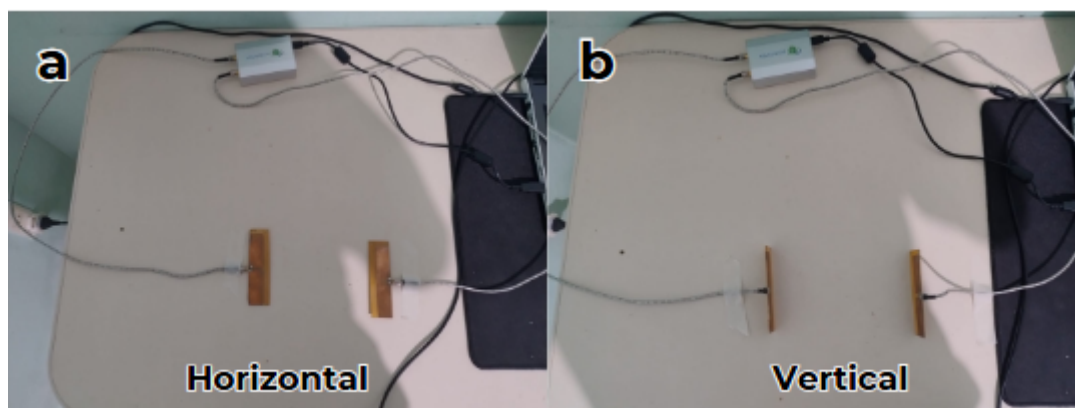
Figura 28 – Configuração Antenas Tipo V



Fonte: Elaboração Própria (2024)

Para os testes realizados com a antena dipolo planar, foram configuradas duas orientações: horizontal, apresentada na Figura 29(a), e a vertical, apresentada na Figura 29(b).

Figura 29 – Configuração Antena Dipolo Planar



Fonte: Elaboração Própria (2024)

3.1.1 Antenas Dipolo de Meia Onda

Durante a construção dos testes com antenas dipolo de meia onda, foram avaliadas configurações com fios de dois diâmetros diferentes, especificados em AWG (American Wire Gauge). As bitolas escolhidas para os experimentos foram AWG 18 e AWG 22, por estarem mais disponíveis em maior quantidade no laboratório e por permitirem fácil manuseio durante a montagem das antenas, correspondentes às antenas dipolo denominadas como AWG 18 (A) e AWG 22 (B), conforme ilustrado na Figura 30. Os fios utilizados foram disponibilizados pelo laboratório de protótipos do Departamento Acadêmico de Eletrônica (DAELN) do campus Florianópolis do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC).

Figura 30 – Antenas de dipolo de meia onda.



Fonte: Elaboração Própria (2024)

As antenas desenvolvidas possuem um comprimento aproximado de 0,2 metros, conforme detalhado na Tabela 4. Essa tabela apresenta as principais características dimensionais das antenas utilizadas nos testes, permitindo a comparação entre os diferentes diâmetros de fio e suas possíveis influências no desempenho eletromagnético.

Tabela 4 – Antenas Dipolo Meia Onda

Nome	AWG utilizado	Dipolo	Comprimento (metros)
A	18	1	0,1915
		2	0,1929
B	22	1	0,1992
		2	0,1982

Fonte: Elaboração Própria

A adoção da média entre os comprimentos das antenas A e B como referência para as demais antenas projetadas visa minimizar eventuais variações introduzidas durante o processo de construção manual e medição com o paquímetro.

O comprimento das antenas e suas respectivas frequências de ressonância são apresentados na Tabela 5. A frequência de projeto foi determinada a partir das equações (3) e (4), derivadas da equação (2.18).

$$A_{AWG17} = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2*L} = \frac{3*10^8}{2*0,1922} \simeq 0,741 \text{ GHz} \quad (3)$$

$$A_{AWG22} = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2*L} = \frac{3*10^8}{2*0,1987} \simeq 0,747 \text{ GHz} \quad (4)$$

Tabela 5 – Antenas Dipolo Meia Onda Frequência de Ressonância.

Nome Antena	Comprimento (em metros)	Frequência de Ressonância (GHz)
A	0,1922	0,741
B	0,1987	0,747

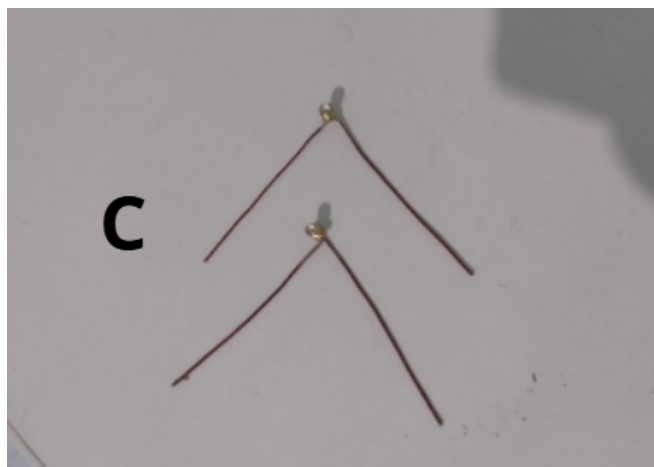
Fonte: Elaboração Própria

3.1.2 Antenas Tipo-V

Nos testes realizados com antenas do tipo V, também foram utilizadas as antenas testadas como dipolo de meia onda, sendo denominadas antena tipo-V AWG 17 (C), conforme mostrado na Figura 31. Para a realização dessas medições, utilizou-se um transferidor para calibração do ângulo de abertura, fixado em 45°,

valor comumente utilizado em antenas do tipo V por proporcionar um bom compromisso entre diretividade e largura de banda. A distância entre a antena transmissora e a receptora foi de 1 metro, valor adotado por estar dentro da zona de campo distante para a frequência de operação em questão e por ser uma distância prática para medições laboratoriais controladas.

Figura 31 – Antenas tipo-V.

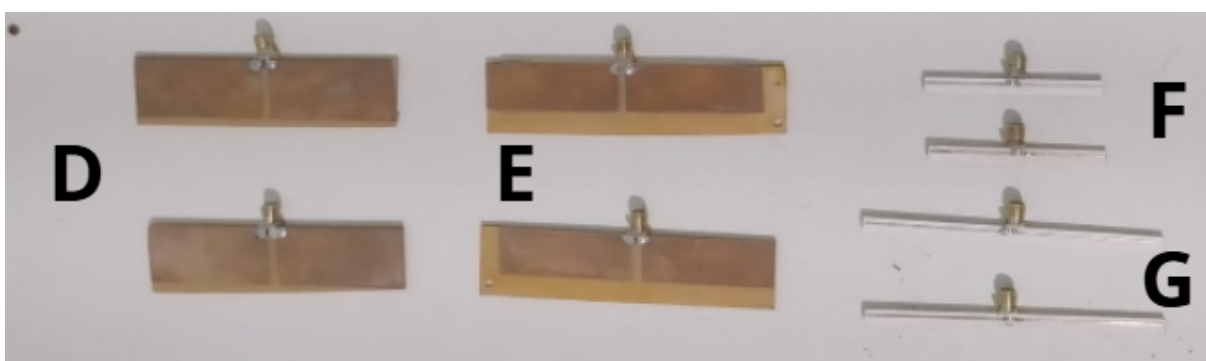


Fonte: Autoria própria (2024).

3.1.3 Antenas Dipolo Planar

Para os testes em antenas planares, foram realizadas variações na largura e no comprimento das antenas, as antenas de dipolo planar são apresentadas na Figura 32.

Figura 32 – Antenas dipolo planar



Fonte: Autoria própria (2024).

Utilizando a equação 2.17, foram obtidos os valores de frequência de corte a, b, c e d que constam na Tabela 6.

$$D_r = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2*L} = \frac{3*10^8}{2*0,995} \simeq 1,51 \text{ GHz} \quad (5)$$

$$E_r = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2*L} = \frac{3*10^8}{2*0,985} \simeq 1,52 \text{ GHz} \quad (6)$$

$$F_r = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2*L} = \frac{3*10^8}{2*0,1} \simeq 1,444 \text{ GHz} \quad (7)$$

$$G_r = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2*L} = \frac{3*10^8}{2*0,06} \simeq 2,443 \text{ GHz} \quad (8)$$

A Tabela 06 apresenta a distância (d) entre os dipolos foi definida em 0,2 milímetros, enquanto a altura (W) foi ajustada para 20 milímetros. Além disso, a largura (l) foi modificada para se adequar a diferentes dimensões.

Tabela 6 – Antenas Planar.

Nome	Largura (em metros)	Comprimento (em metros)	Frequência de Corte (Hz)
D	0,2000	0,0995	1,51 GHz
E	0,2450	0,0985	1,52 GHz
F	0,020	0,1000	1,44 GHz
G	0,060	0,0600	2,44 GHz

Fonte: Elaboração Própria

As mesmas equações utilizadas para o dipolo de meia onda e o dipolo planar, caracterizado no artigo de Pinheiro et al. (2007), onde citam que 'Esta antena tem as mesmas características da antena dipolo simples, entretanto, seu ênfase se evidencia na largura de banda'. A partir disso, pode-se evidenciar testes para que esta afirmação se torne válida.

3.1.4 Antena Espiral

As antenas espirais possuem diversas aplicações em telecomunicações, radares e sistemas de comunicação via satélite. Seu princípio de funcionamento baseia-se em um formato geométrico espiralado, geralmente seguindo o modelo do espiral de Arquimedes ou do espiral cônico.

Essas antenas operam com polarização circular, o que permite uma recepção eficiente dos sinais independentemente da orientação da antena transmissora. Além disso, apresentam uma impedância relativamente constante dentro de sua banda de operação, facilitando o casamento com circuitos de RF. A Figura 33 apresenta a antena espiral utilizada é uma antena comercial com a frequência de 433 MHz.

Figura 33 - Antena espiral comercial



Fonte: Elaboração Própria

3.2 Pocket VNA

O analisador de redes vetoriais foi utilizado para medições em antenas para observar seu comportamento em diversos pontos no domínio da frequência em relação ao ganho obtido. Trata-se de um equipamento, conhecido como Pocket VNA, conectado ao seu software, capaz de realizar medições vetoriais dos fenômenos presentes no período de testes da antena. Este equipamento já foi utilizado anteriormente para outra aplicação em um seminário de ensino, pesquisa, extensão e inovação, SEPEI (Seminário de Ensino, Pesquisa, Extensão e Inovação) 2023 – Joinville (Schlichting e Orlanes 2023).

Para a realização dos testes, o Pocket VNA foi conectado diretamente ao computador via USB. Utilizando o software dedicado ao equipamento, foi possível configurá-lo adequadamente para realizar as medições desejadas.

O software permite a calibração do equipamento para resultados mais exatos. Após calibrar, o equipamento executa as medições dos pontos desejados

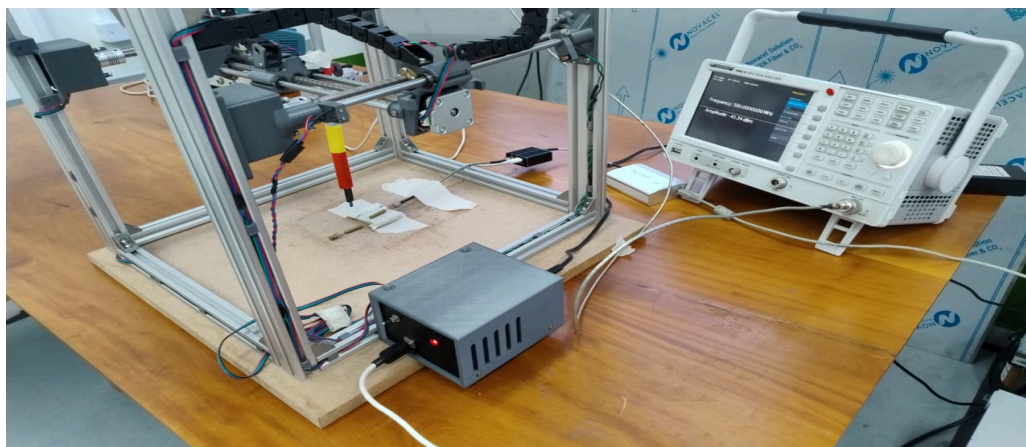
em relação ao parâmetro S, gerando como resultado um gráfico chamado *Line Chart* (Gráfico de Linhas). O processo é repetido para todas as placas.

3.3 Rastreador Automático de Campo Próximo

O rastreador automático de campo próximo foi utilizado, assim como o próprio nome sugere, para medir o campo elétrico próximo das placas. Trata-se de uma estrutura conectada a outros instrumentos, com uma antena em sua extremidade, capaz de realizar medidas de forma matricial por toda extensão da placa. Este equipamento foi projetado e implementado como um Trabalho de Conclusão de Curso Superior de Tecnologia em Eletrônica Industrial. (LUIZ, 2022).

Toda a estrutura é composta por: estrutura CNC (Controle Numérico Computadorizado) com motores XY, as antenas de teste, um gerador de funções, o analisador de espectro HAMEG HMS-X, um O LNA9037BAT que é um amplificador de sinal, capaz de operar na faixa de 100kHz a 6GHz, um pocket VNA, além de uma fonte de alimentação. Estes equipamentos podem ser observados na Figura 34.

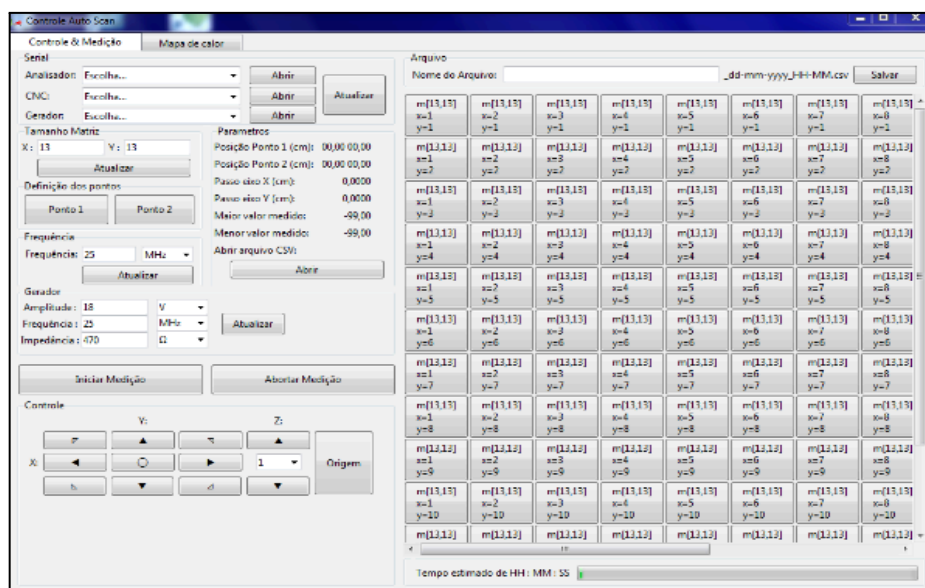
Figura 34 – Rastreador de campo próximo.



Fonte: autoria própria (2025).

A Figura 35, apresenta o painel do software de controle e medição, após inserido o tamanho da matriz, o rastreador mapeia todos os pontos da placa, gerando de resultado um mapa de calor e um arquivo CSV (planilha) com os valores de cada ponto da matriz.

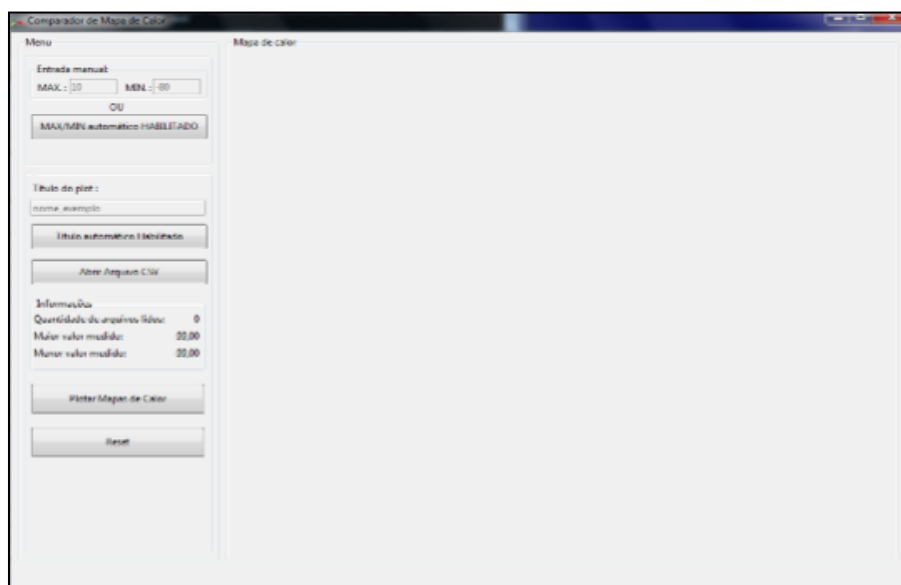
Figura 35 – Painel de controle – Software de controle e medição.



Fonte: Elaboração Própria (2024)

O processo para as frequências específicas desejadas. Para fazer a comparação dos mapas de calor gerados, é necessário que estejam na mesma escala, por esta razão foi utilizado um *software* que gera o mapa de calor na mesma escala, o painel de controle do *software* comparador é apresentado na Figura 36, informando dados de maneira mais confiável.

Figura 36 – Painel de Controle – Software Comparador Mapa de Calor



Fonte: Elaboração Própria (2024)

A Figura 37 apresenta a antena utilizada para medição do campo elétrico.

Figura 37 – Antena de Campo Elétrico.



Fonte: Elaboração Própria (2024)

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos durante os testes realizados com diferentes tipos de antenas no Pocket VNA. A Figura 38 apresenta as antenas utilizadas para realizar os testes, incluindo antenas A e B para dipolo meia onda, antena C para o tipo-V, antenas D, E, F e G para dipolo planares e antena espiral, apresentadas na figura 36. As medições foram realizadas com calibração ôhmica de 50Ω .

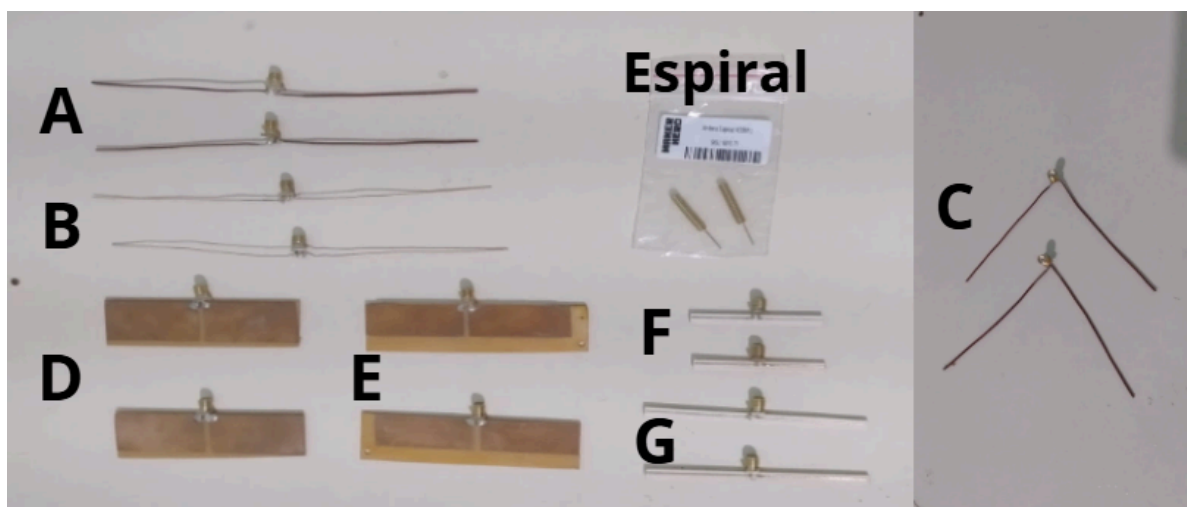
A calibração ôhmica em 50Ω foi adotada por ser o valor padrão de impedância característica amplamente utilizado em sistemas de RF e em instrumentação de micro-ondas. Esse valor garante compatibilidade com a maior parte dos dispositivos e cabos coaxiais utilizados em medições de antenas, como o Pocket VNA. Além disso, permite uma melhor comparação entre os diferentes tipos de antenas testadas, assegurando coerência nos resultados obtidos quanto ao coeficiente de reflexão e adaptabilidade de impedância.

Os testes foram conduzidos em diferentes distâncias entre as antenas, de forma a avaliar o desempenho em variadas condições de propagação.

A caracterização das antenas foi baseada na análise de diversos parâmetros críticos, com o pocket VNA sendo a principal ferramenta de obtenção de resultados experimentais. Entre os fatores avaliados, destacam-se o coeficiente de reflexão, largura de banda, diretividade, eficiência, perda de retorno e ganho.

A análise desses parâmetros é fundamental para validar o desempenho das antenas propostas, e os resultados obtidos serão discutidos de forma detalhada, comparando-os às expectativas teóricas e às especificações projetadas. A seguir, cada tipo de antena será analisado individualmente, destacando suas características, vantagens e limitações com base nos dados experimentais.

Figura 38 – Antenas Analisadas



Fonte: Elaboração Própria (2024).

4.1 Resultados do Pocket VNA em diferentes antenas.

Os testes realizados com as antenas avaliaram seu desempenho em transmissão e recepção. Uma das principais características para determinar a eficiência da antena é o coeficiente de reflexão, abordado no tópico 2.4.7. Caso o valor de S_{11} seja igual a 0 dB, toda a energia incidente é refletida, indicando que nenhuma radiação está sendo emitida para o meio. Segundo autores do tópico, para uma transmissão eficiente, considera-se aceitável um S_{11} menor ou igual a -10 dB.

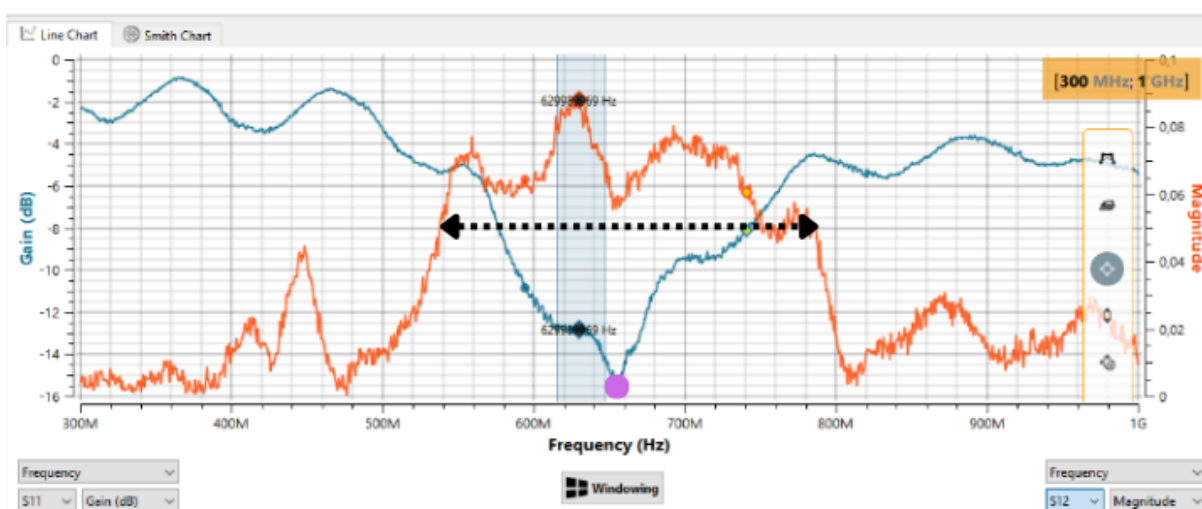
Os testes realizados com estas antenas também consideraram o parâmetro S_{12} , que representa o coeficiente de transmissão entre duas portas do VNA. Esse parâmetro mede a quantidade de energia que é transferida de uma antena para outra, sendo expresso em dB. Valores elevados de S_{12} indicam um forte acoplamento entre as antenas, o que pode ser desejável em sistemas que utilizam arranjos de antenas ou técnicas de formação de feixe. A avaliação desse parâmetro foi fundamental para a análise do desempenho das antenas testadas neste trabalho.

4.2 Análise e discussão dos resultados

4.2.1 Antena A

A Figura 39 apresenta o resultado obtido no Pocket VNA para o coeficiente de reflexão (em azul), exibindo gráficos de magnitude (laranja) e ganho em função da frequência (em Hertz) na antena A, com as marcações dos pontos.

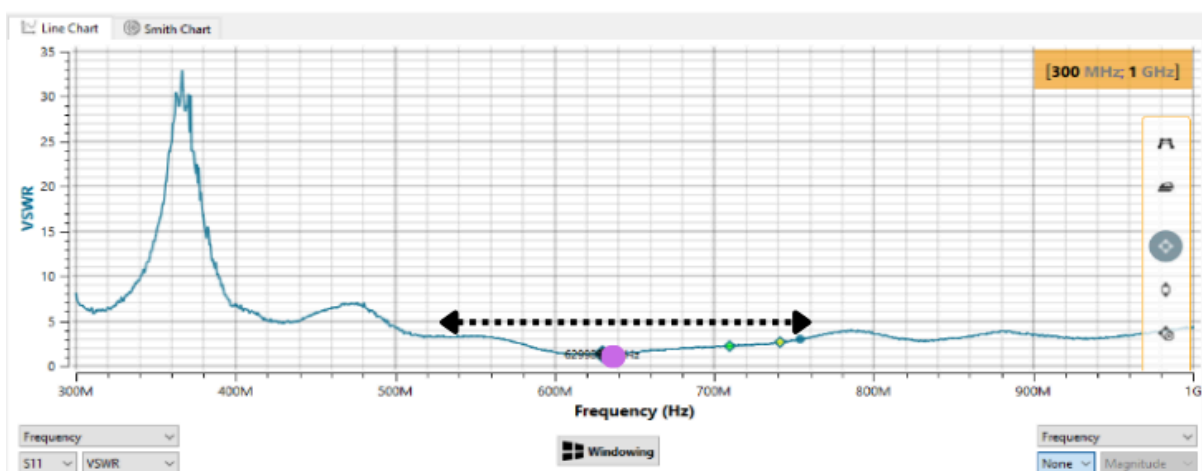
Figura 39 – Antena A (Γ) – Marcações



Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 40 apresenta o resultado obtido no Pocket VNA para o VSWR, exibindo gráficos do VSWR em função da frequência (em Hertz) na antena A, com as marcações dos pontos.

Figura 40 - Antena A (VSWR) – Marcações

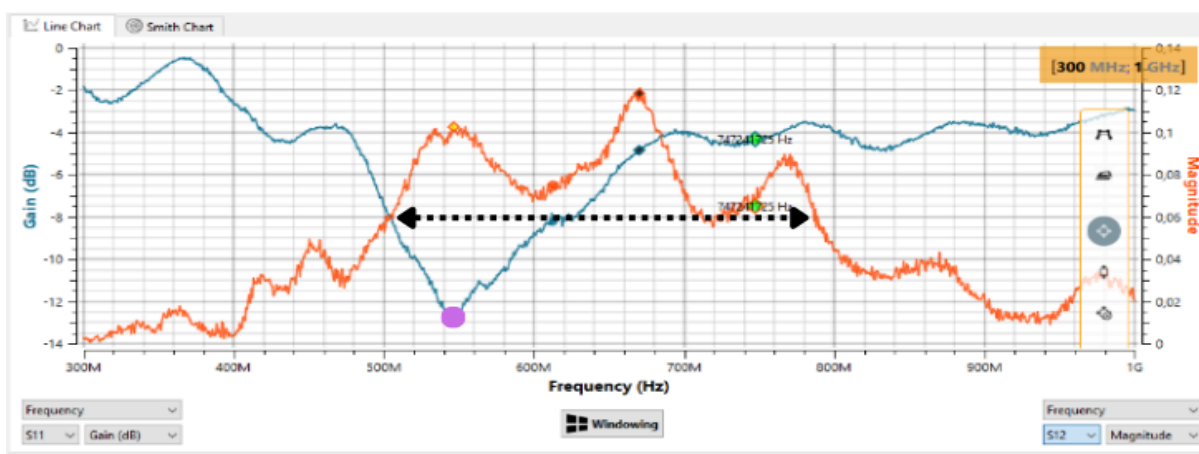


Fonte: Autoria própria (2024).

4.2.2 Antena B

A Figura 41 apresenta o resultado obtido no Pocket VNA para o coeficiente de reflexão (em azul), exibindo gráficos de magnitude (em laranja) e ganho em função da frequência (em Hertz) na antena B, com as marcações dos pontos.

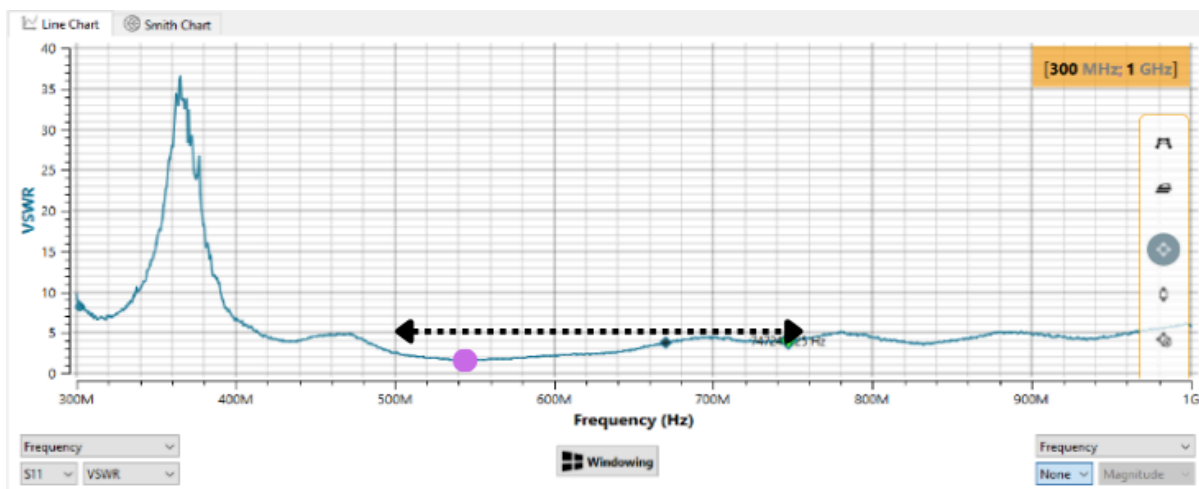
Figura 41 - Antena B (Γ) – Marcações



Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 42 apresenta o resultado obtido no Pocket VNA para o VSWR, exibindo gráficos do VSWR em função da frequência (em Hertz) na antena B, com as marcações dos pontos.

Figura 42 - Antena B (VSWR) – Marcações



Fonte: Autoria própria (2024).

4.2.3 Considerações Antena Dipolo Meia Onda

Nos testes com a antena A, observou-se um coeficiente de reflexão satisfatório na faixa de aproximadamente 630 MHz, com um mínimo localizado no ponto marcado em roxo, a 655 MHz. Esse ponto apresenta um S11 inferior a -10 dB, indicando bom desempenho próximo à frequência de interesse, 740 MHz. A largura de banda foi determinada utilizando o critério de -10 dB, considerando a faixa de frequência em que o valor de S11 se manteve abaixo desse limite, sem oscilações significativas fora dessa faixa. O intervalo obtido foi de aproximadamente 540 MHz a 780 MHz, como indicado na imagem pela seta pontilhada, cobrindo a frequência alvo e atendendo às expectativas do projeto.

Nos testes com a antena B, observou-se um valor mínimo do coeficiente de reflexão (S11) em torno de 546 MHz, marcado em roxo na imagem. Esse ponto apresenta um S11 inferior a -10 dB, indicando bom desempenho próximo a essa frequência. Embora a faixa entre 500 MHz e 780 MHz apresenta variações nos valores de S11, apenas o intervalo entre 520 MHz e 580 MHz mantém o coeficiente de reflexão consistentemente abaixo de -10 dB, sendo considerado a largura de banda útil para essa antena.

O calibre do fio da antena A ou da antena B influencia a impedância e a eficiência da antena, mas não afeta significativamente a frequência de ressonância, que depende principalmente do comprimento elétrico da antena, e não do diâmetro do condutor. No caso, na antena A e na antena B, nota-se que os padrões de VSWR são muito similares, pela confecção das antenas serem do mesmo tamanho, além de apresentarem configurações de impedância semelhantes devido à utilização de materiais e técnicas de construção comparáveis.

Apesar disso, as diferenças nas propriedades do fio, como a espessura do condutor (AWG 18 versus AWG 22), podem levar a variações na largura de banda e na eficiência de radiação, o que pode refletir nas características de VSWR em determinadas faixas de frequência. Antenas construídas com condutores de maior diâmetro, como o fio AWG 18, tendem a apresentar largura de banda mais ampla, devido à redução da resistência superficial e do efeito da indutância distribuída, o que melhora a adaptação de impedância em uma faixa mais larga de frequências. Em contrapartida, antenas com condutores mais finos, como o AWG 22,

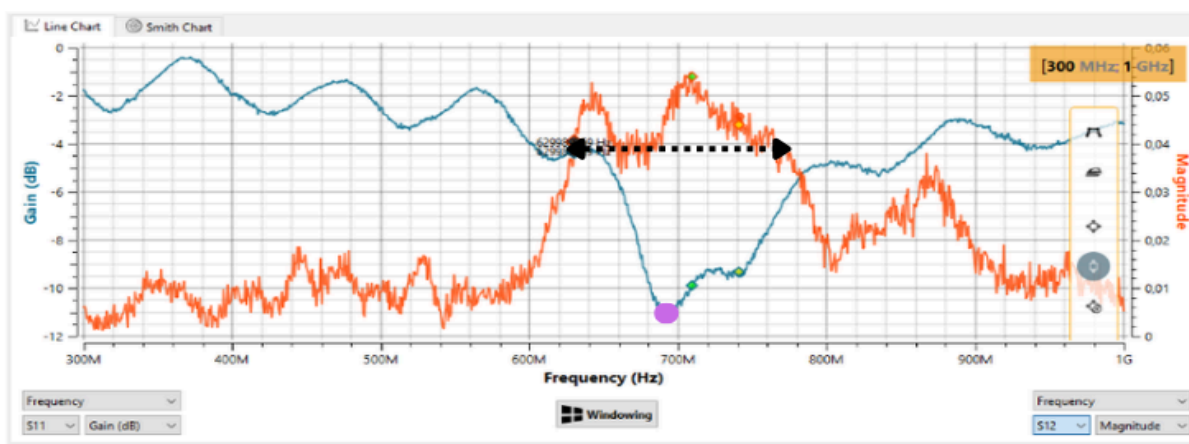
apresentam uma maior reatância e perdas superficiais, o que pode resultar em largura de banda mais estreita e maior sensibilidade às variações de carga e ambiente de operação, o que pode influenciar no desempenho em termos de adaptação de impedância em diferentes condições de teste.

Comparando as Figuras 40 e 42 em relação aos valores de VSWR, observa-se uma semelhança entre os gráficos, indicando que as configurações das antenas são similares, mesmo com a variação na bitola do fio condutor. Em ambas as curvas, os valores de VSWR permanecem próximos de 1 na faixa de largura de banda analisada, o que representa uma boa adaptação de impedância e, portanto, um desempenho satisfatório.

4.2.4 Antena C

A Figura 43 apresenta o resultado obtido no Pocket VNA para o coeficiente de reflexão (em azul), exibindo gráficos de magnitude (laranja) e ganho em função da frequência (em Hertz) na antena C, com as marcações dos pontos.

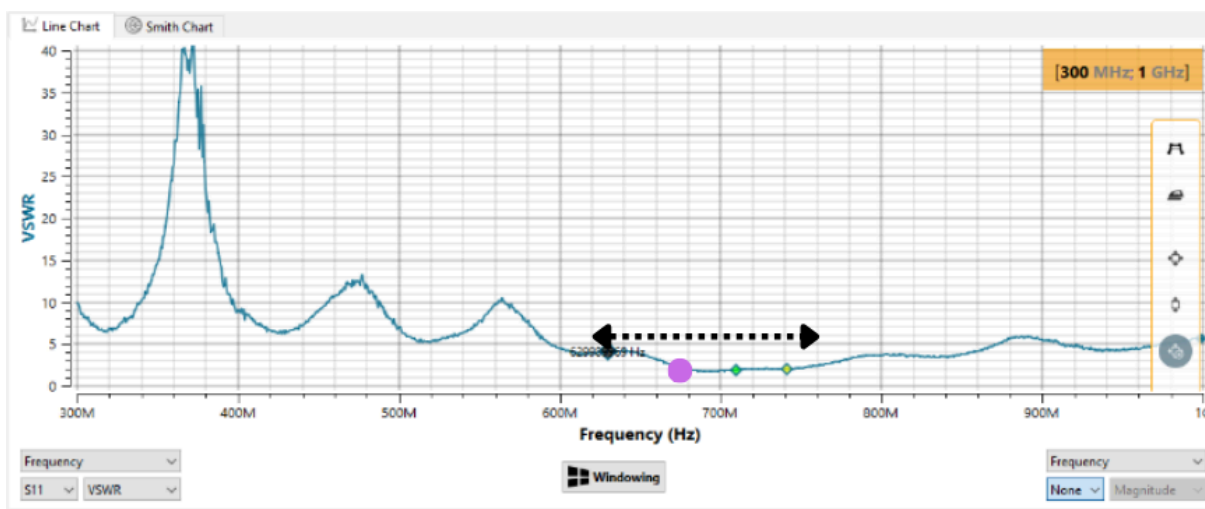
Figura 43 – Antena C (Γ) – Marcações



Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 44 apresenta o resultado obtido no Pocket VNA para o VSWR, exibindo gráficos do VSWR em função da frequência (em Hertz) na antena C, com as marcações dos pontos.

Figura 44 - Antena C (VSWR) – Marcações



Fonte: Autoria própria (2024).

4.2.5 Considerações Antena Tipo-V

Na antena C, observou-se que a frequência de ressonância está mais próxima da frequência desejada, sendo marcada em roxo na Figura 43, próxima de 690 MHz. A largura de banda indicada pela seta pontilhada mostra que, devido à configuração da antena tipo V, o comportamento do feixe se torna mais direcional, o que resulta em uma redução da largura de banda e um alinhamento mais próximo à frequência de corte teórica de 740 MHz.

Não há muitos artigos científicos que abordem diretamente a comparação entre antenas dipolo de meia onda e antenas do tipo dipolo-V. Por esse motivo, ao realizar essa análise, é importante considerar aspectos fundamentais de desempenho. Um dos principais é o comportamento da largura de banda, já que o dipolo-V, devido à sua geometria angular, tende a apresentar uma largura de banda mais estreita e centrada em torno da frequência de ressonância, quando comparado ao dipolo de meia onda convencional.

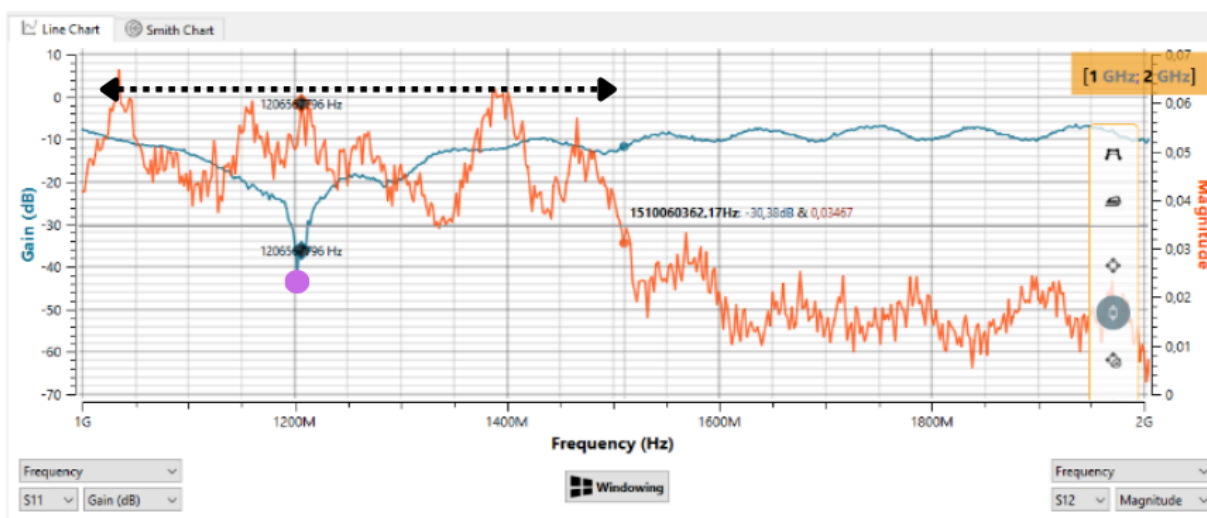
Apresentada na Figura 44, a frequência marcada próxima de 680 MHz, pelo ponto roxo, o valor de VSWR, que está bem próximo de zero, no entanto também é interessante observar que, na frequência desejada de 740 MHz se encontra próximo de zero. É essencial alcançar um bom casamento de impedância para minimizar as perdas por reflexão e otimizar a eficiência na transmissão de sinal.

O dipolo-V (antena C) pode apresentar características de impedância ligeiramente distintas em relação ao dipolo de meia onda (antenas A e B). Esse resultado pode ser atribuído à diferença no casamento de impedância entre os dois tipos de antena, já que no dipolo-V, a configuração particular da antena influencia a formação dos lóbulos de radiação, impactando a eficácia da transmissão e a distribuição do padrão de radiação.

4.2.6 Antena D

A Figura 45 apresenta o resultado obtido no Pocket VNA para o coeficiente de reflexão (em azul), exibindo gráficos de magnitude (laranja) e ganho em função da frequência (em Hertz) na antena D, com as marcações dos pontos no plano vertical.

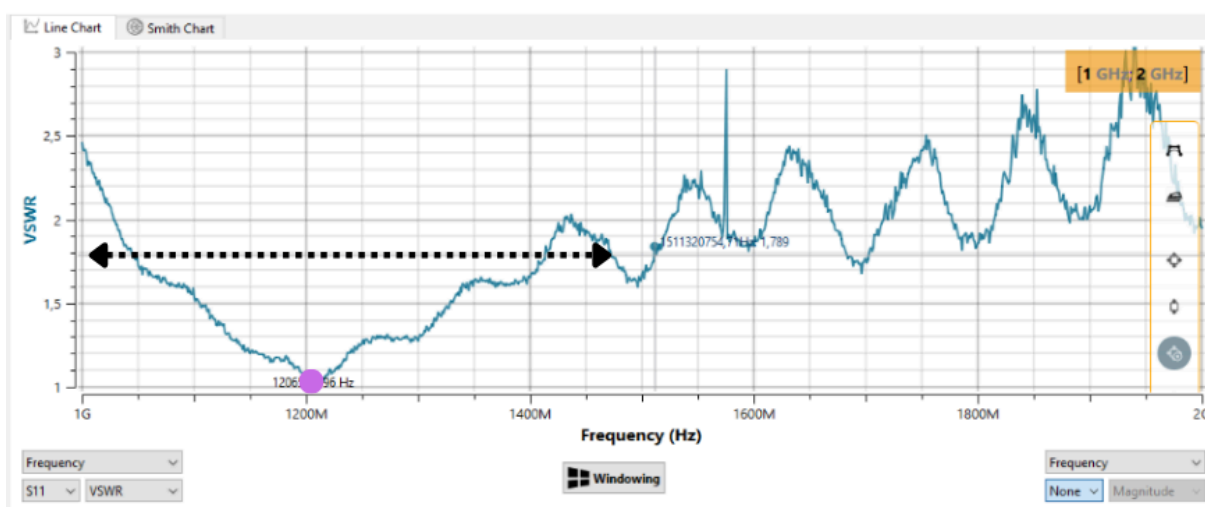
Figura 45 - Antena D (Γ) – Marcações Vertical



Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 46 apresenta o resultado obtido no Pocket VNA para o VSWR, exibindo gráficos do VSWR em função da frequência (em Hertz) na antena D, com as marcações dos pontos, no plano vertical.

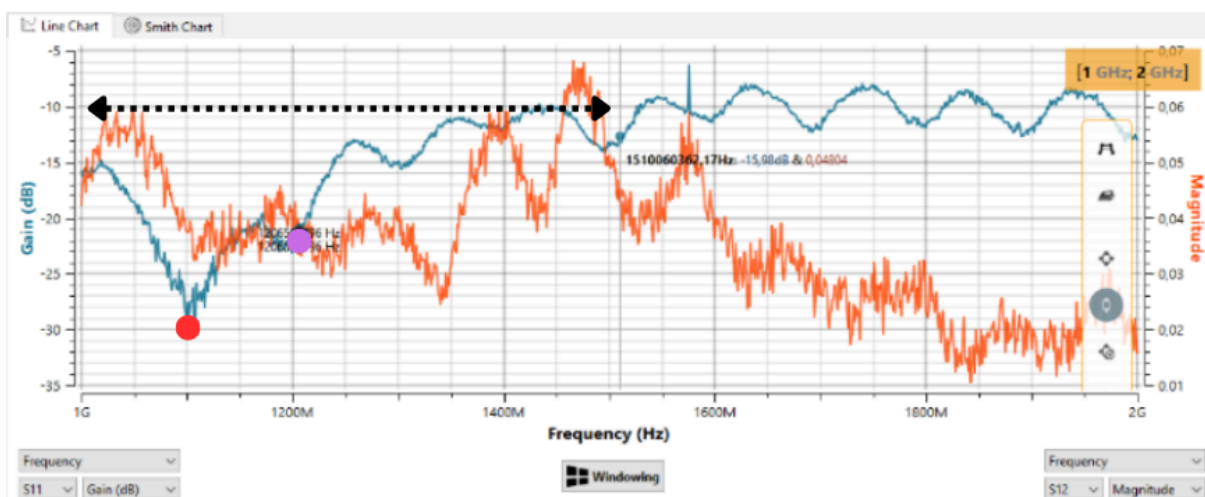
Figura 46 - Antena D (VSWR) – Marcações Vertical



Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 47 apresenta o resultado obtido no Pocket VNA para o coeficiente de reflexão (em azul), exibindo gráficos de magnitude (laranja) e ganho em função da frequência (em Hertz) na antena D, com as marcações dos pontos no plano horizontal.

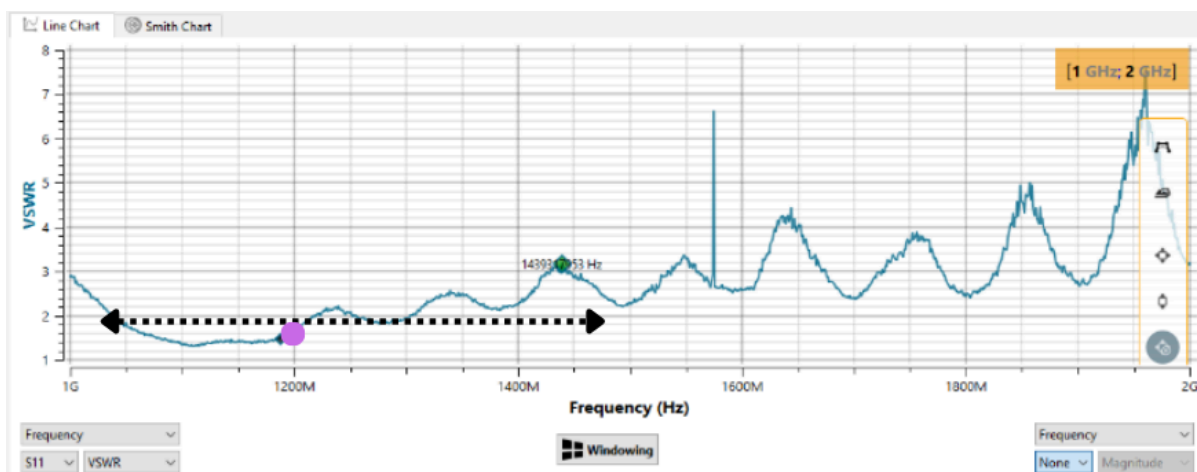
Figura 47 - Antena D (Γ) – Marcações Horizontal



Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 48 apresenta o resultado obtido no Pocket VNA para o VSWR, exibindo gráficos do VSWR em função da frequência (em Hertz) na antena D, com as marcações dos pontos no plano horizontal.

Figura 48 - Antena D (VSWR) - Marcações Horizontal

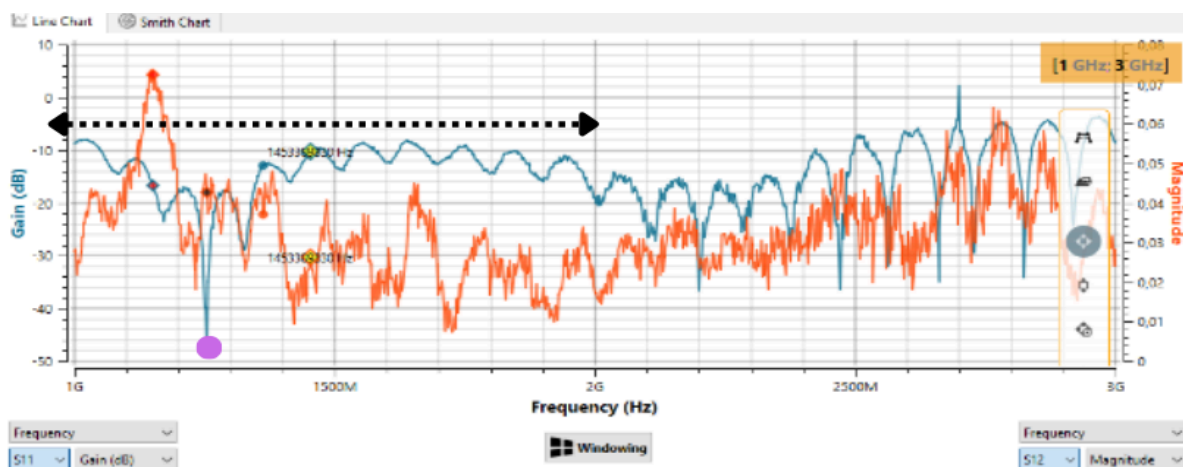


Fonte: Autoria própria (2024).

4.2.7 Antena E

A Figura 49 apresenta o resultado obtido no Pocket VNA para o coeficiente de reflexão (em azul), exibindo gráficos de magnitude (laranja) e ganho (em função da frequência (em Hertz) na antena E, com as marcações dos pontos no plano vertical.

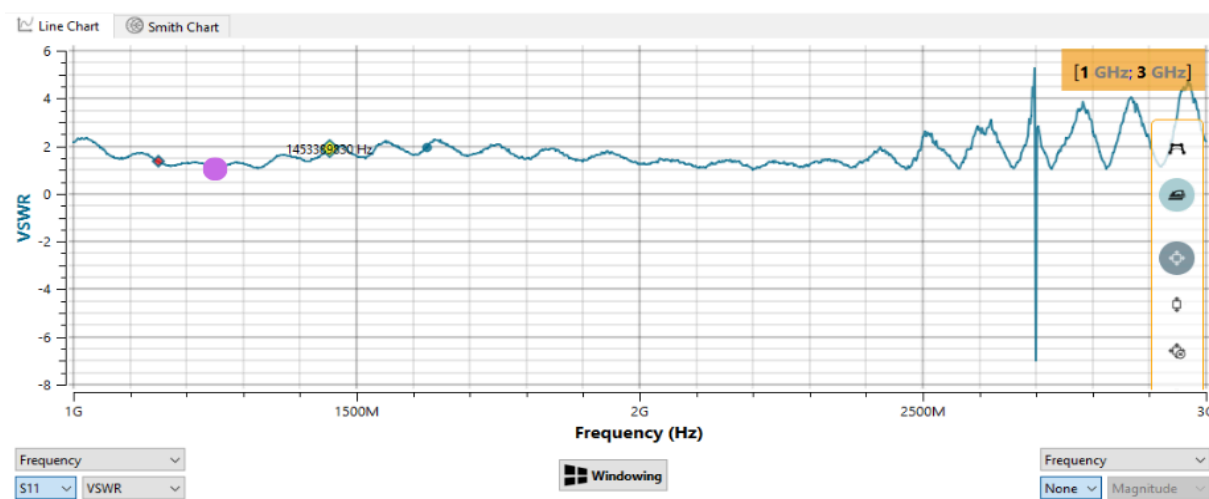
Figura 49 – Antena E (Γ) – Marcações Vertical



Fonte: Elaboração Própria

A Figura 50 apresenta o resultado obtido no Pocket VNA para o VSWR, exibindo gráficos do VSWR em função da frequência (em Hertz) na antena E, com as marcações dos pontos no plano vertical.

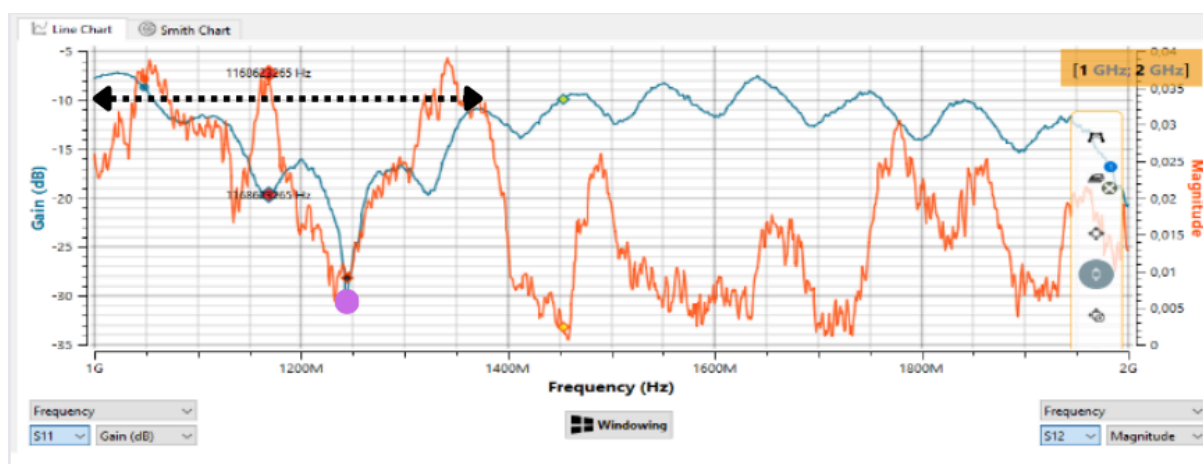
Figura 50 - Antena E (VSWR) - Marcações Vertical



Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 51 apresenta o resultado obtido no Pocket VNA para o coeficiente de reflexão (em azul), exibindo gráficos de magnitude (laranja) e ganho em função da frequência (em Hertz) na antena E, com as marcações dos pontos no plano horizontal.

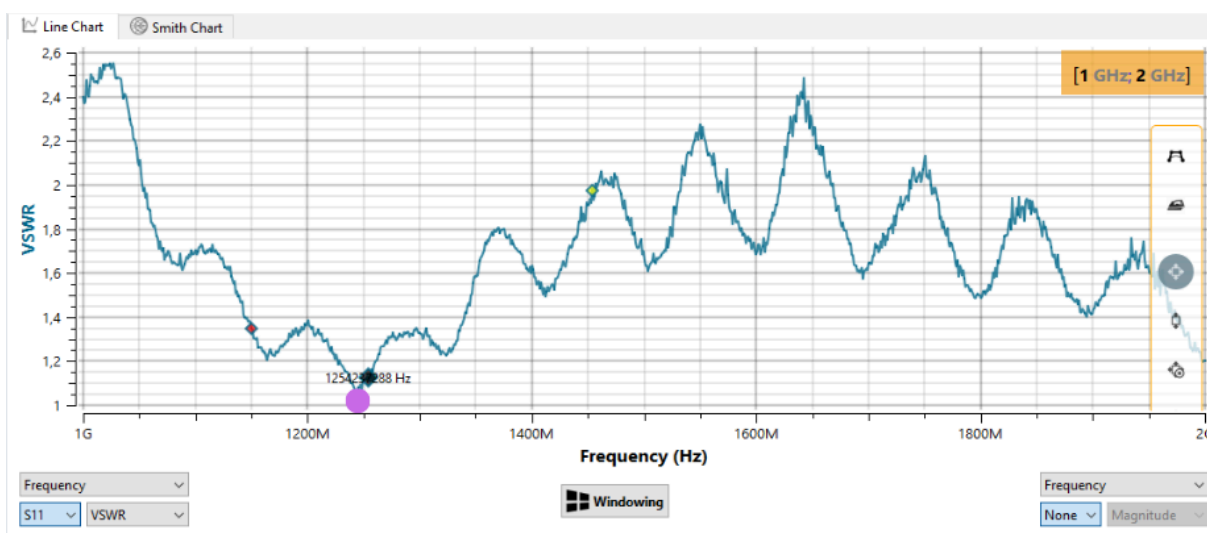
Figura 51 – Antena E (Γ) – Marcações Horizontal



Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 52 apresenta o resultado obtido no Pocket VNA para o VSWR, exibindo gráficos do VSWR em função da frequência (em Hertz) na antena E, com as marcações dos pontos no plano horizontal.

Figura 52 - Antena E (VSWR) - Marcações Horizontal

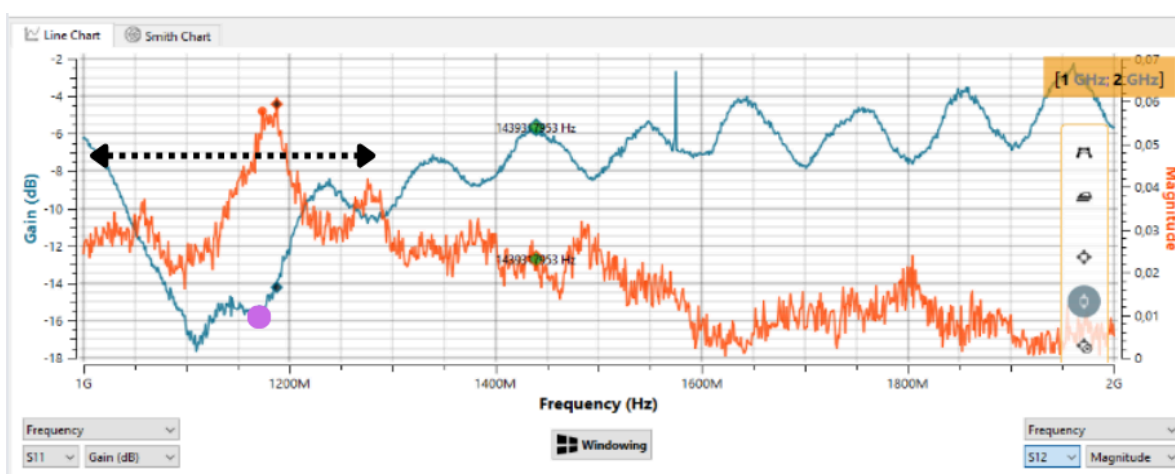


Fonte: Autoria própria (2024).

4.2.8 Antena F

A Figura 53 apresenta o resultado obtido no Pocket VNA para o coeficiente de reflexão (em azul), exibindo gráficos de magnitude (laranja) e ganho em função da frequência (em Hertz) na antena F, com as marcações.

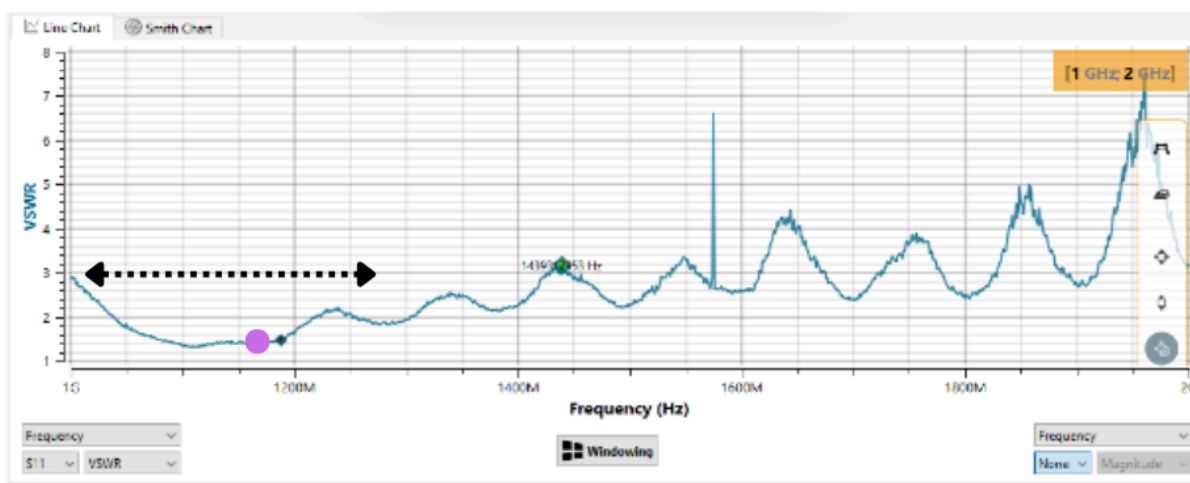
Figura 53 – Antena F (Γ) - Marcações



Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 54 apresenta o resultado obtido no Pocket VNA para o VSWR, exibindo gráficos do VSWR em função da frequência (em Hertz) na antena F, com as marcações.

Figura 54 – Antena F (VSWR) - Marcações

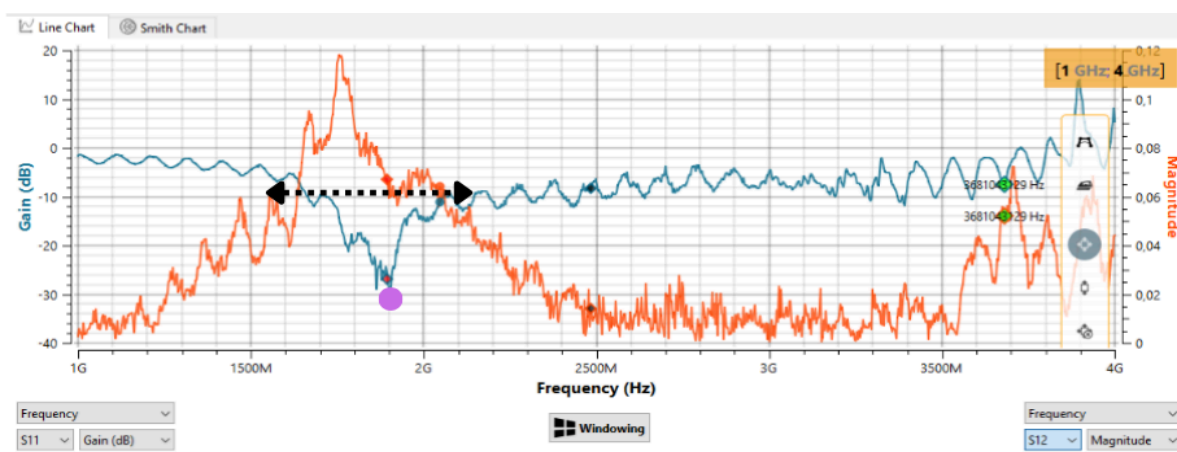


Fonte: Autoria própria (2024).

4.2.9 Antena G

A Figura 55 apresenta o resultado obtido no Pocket VNA para o coeficiente de reflexão (em azul), exibindo gráficos de magnitude (laranja) e ganho em função da frequência (em Hertz) na antena G, com as marcações.

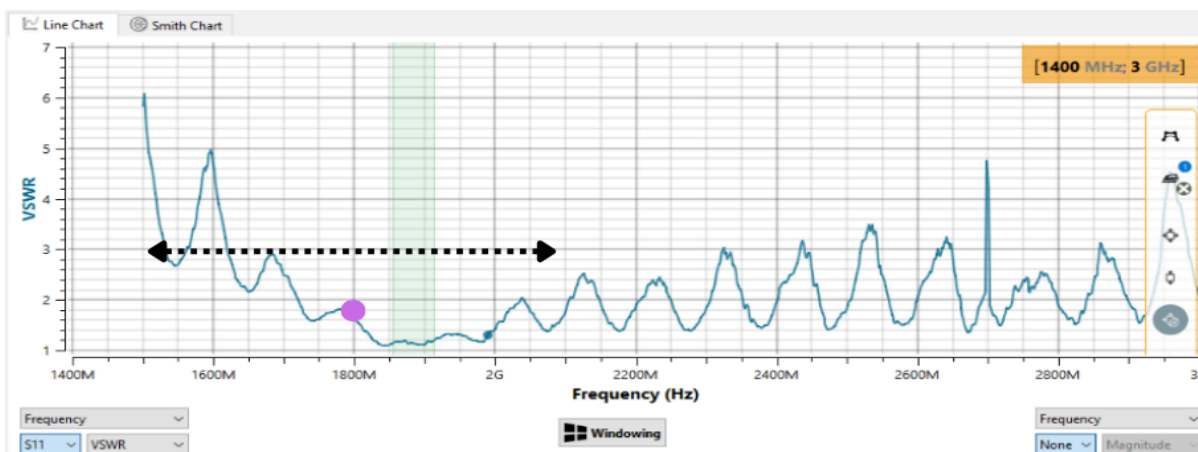
Figura 55 – Antena G (Γ) - Marcações



Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 56 apresenta o resultado obtido no Pocket VNA para o VSWR, exibindo gráficos do VSWR em função da frequência (em Hertz) na antena G, com as marcações dos pontos no plano horizontal.

Figura 56 – Antena G (VSWR) - Marcações



Fonte: Autoria própria (2024).

4.2.10 Considerações Antena Dipolo Planar

Nos testes realizados para antena D, comparando os resultados das Figuras 45 e 47, observa-se que o coeficiente de reflexão indica que a configuração mais adequada para a antena de dipolo planar é a orientação vertical, pois permite maximizar a irradiação. Além disso, verifica-se que, na frequência de 1,2 MHz — próxima à frequência de ressonância desejada de 1,5 MHz —, o coeficiente de reflexão apresenta um valor de ganho mais consistente para o plano vertical, também é possível observar no ponto vermelho que o coeficiente de reflexão encontra seu melhor valor de ganho dB, além de atender também o critério do VSWR estar próximo de zero, que indica melhor adaptação de impedância conforme apresentado na Figura 46, diferente na Figura 48 na configuração horizontal apresentar o valor de VSWR próximo de dois.

Nos testes realizados para antena E, comparando os resultados obtidos das Figuras 49 e 51, observa-se que o coeficiente de reflexão indica que a configuração mais adequada para a antena dipolo planar é a orientação vertical, mostrando o valor próximo a -50 dB. Além disso, verifica-se que, na largura de banda de 1 GHz até 2 GHz mostrou possuir diversos pontos que o coeficiente de

reflexão se encontra inferior ou igual a -10 dB, diferente da configuração horizontal, que por sua vez mostrou o comportamento igual ou inferior a -10 dB somente de 1 GHz até 1,5 GHz. Para a análise do VSWR apresentado nas Figuras 50 e 52 ambas apresentaram o valor próximo de zero na frequência de 1,25 GHz, próxima a frequência desejada para o projeto de 1,5 GHz.

Nos testes realizados para antena F e G, possuem a frequência desejada de 1,44 GHz e 2,44 GHz respectivamente na posição horizontal.

Para a antena F, a análise, representada em roxo, indica que o maior coeficiente de reflexão ocorre em 1,1 GHz, conforme apresentado na Figura 53. Observa-se que, na frequência desejada, o coeficiente de reflexão não atinge valores inferiores ou iguais a -10 dB. Além disso, o VSWR próximo de 1 sugere que a antena está operando predominantemente em 1,1 GHz, conforme apresentado na Figura 54.

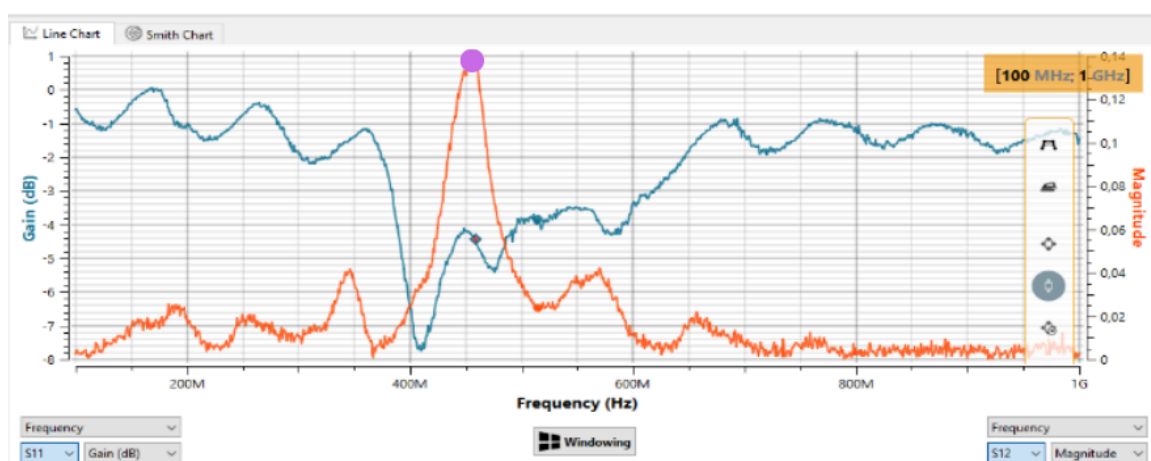
Na antena G, a análise revela que o coeficiente de reflexão atinge seu menor valor em 1,8 GHz, registrando -30 dB. A largura de banda, compreendida entre 1,5 GHz e 2,1 GHz, não atende ao critério estabelecido para a frequência desejada de 2,44 GHz. Além disso, conforme mostrado na Figura 56, o valor de VSWR indica que a antena não opera adequadamente nessa frequência, apresentando um valor próximo de zero apenas em 1,8 GHz.

Então, nos testes práticos com o dipolo de meia onda de mesmo comprimento, foi observado um comportamento semelhante ao mencionado por Aliakbari e Lau (2019), que, em sua análise, observam que “há um compromisso entre a estabilidade do padrão de radiação e a largura de banda de impedância conforme a largura do dipolo varia”. Além disso, os autores mencionam que “um deslocamento no ponto de alimentação leva a uma degradação tanto na largura de banda modal quanto na largura de banda de impedância”. Esses resultados coincidem com minhas observações, onde a alteração na largura do dipolo afetaram diretamente a eficiência da antena.

4.2.11 Antena Espiral

A Figura 57 apresenta o resultado obtido no Pocket VNA para o coeficiente de reflexão (em azul) da antena espiral, exibindo gráficos de magnitude (laranja) e ganho em função da frequência (em Hertz) da antena espiral em teste na posição vertical com marcações.

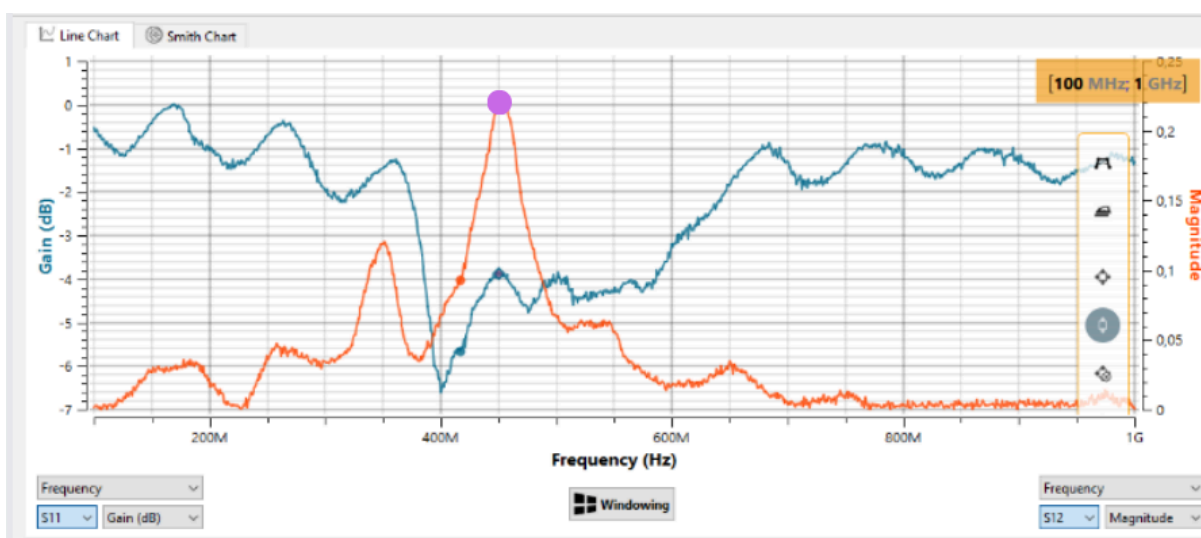
Figura 57 – Antena Espiral (Γ) - Marcações Vertical



Fonte: Autoria própria (2024)

A Figura 58 apresenta o resultado obtido no Pocket VNA para o coeficiente de reflexão (em azul) da antena espiral, exibindo gráficos de magnitude (laranja) e ganho em função da frequência (em Hertz) da antena espiral em teste na posição horizontal com marcações.

Figura 58 – Antena Espiral (Γ) – Marcações Horizontal

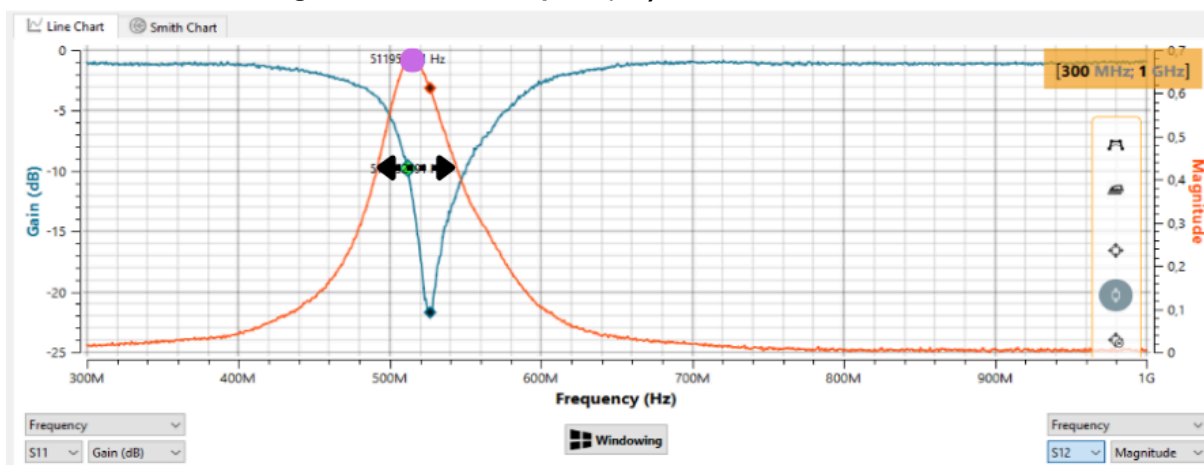


Fonte: Autoria própria (2024)

Com base nos testes do coeficiente de reflexão da antena espiral, observa-se que as frequências de corte medidas (458,6 MHz implementando a topologia vertical e 450,5 MHz para a topologia horizontal) estão muito próximas do valor proposto pelo fabricante, indicando que a antena está operando conforme o esperado, apresentado nas Figuras 57 e 58. Os resultados experimentais demonstram boa concordância com as previsões teóricas, no entanto o valor do coeficiente de reflexão (em azul) não apresenta um valor igual ou inferior a -10dB. Novo teste foi realizado com a posição das antenas bem próximas para observar o valor da onda de magnitude(em laranja) e o coeficiente de reflexão (em azul).

A Figura 59 apresenta o resultado obtido no Pocket VNA para o coeficiente de reflexão (em azul), exibindo gráficos de magnitude (laranja) e ganho em função da frequência (em Hertz) da antena espiral testada na posição próxima com marcações.

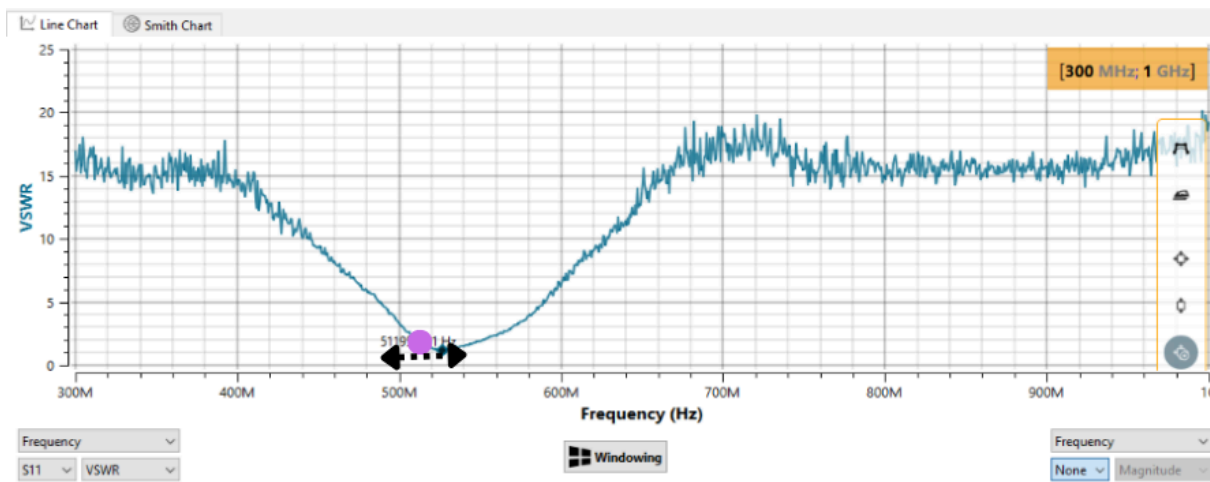
Figura 59 - Antena Espiral (Γ) - Marcações Próximas



Fonte: Autoria própria (2024)

A Figura 60 apresenta o resultado obtido no Pocket VNA para o VSWR, exibindo gráficos de VSWR (adimensional) em função da frequência (em Hertz) da antena espiral testada próximas com marcações.

Figura 60 - Antena Espiral (VSWR) - Marcações Próximas



Fonte: Autoria própria (2024)

Como abordado anteriormente, foi realizado novo teste agora com as antenas bem próximas e foi encontrado uma frequência aproximadamente de 510 MHz, como apresentado na Figura 59 da antena sem a conexão de entrada.

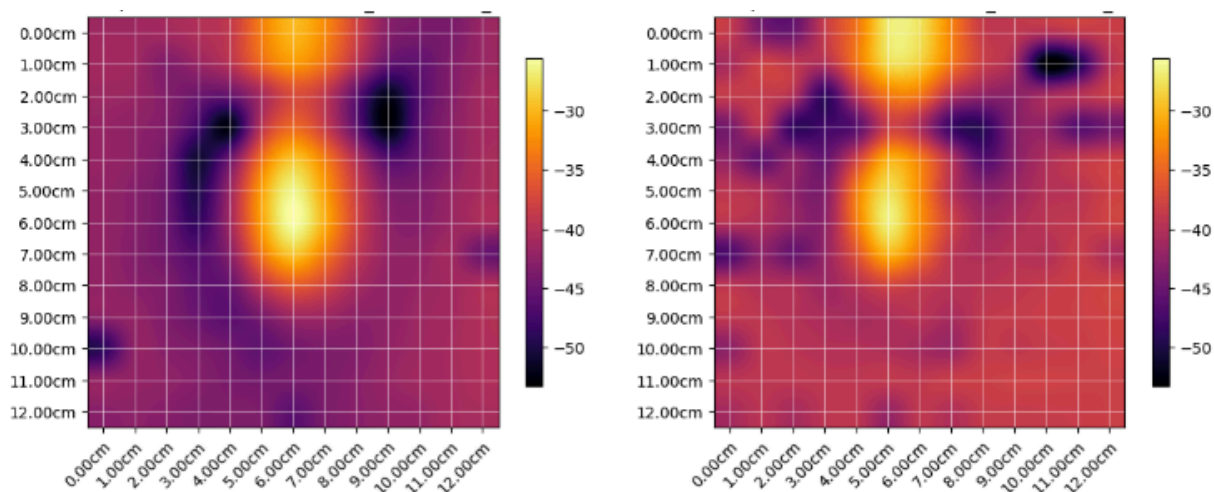
A pequena diferença entre as frequências em diferentes configurações pode ser atribuída a fatores como variações dimensionais ou influências do ambiente de teste. Diferenças da ordem de alguns MHz são justificáveis devido a variações no processo de fabricação ou às condições do ambiente de medição.

Para validar os testes realizados e caracterizar a antena espiral cônica em operação com polarização circular, foi utilizado um rastreador de campo próximo em diferentes ensaios. O objetivo foi observar a formação do campo elétrico de polarização circular tanto na comparação da frequência especificada pelo fabricante quanto na frequência obtida nos testes realizados com o Pocket VNA, também na comparação dos ensaios realizados com a antena alinhadas de forma vertical, ou seja, também conhecida como *line-on-sight*, ou *LOS* (em linha visada) e no alinhamento horizontal.

Para finalizar, o teste relacionado com a antena espiral comercial, mostrou que obteve os dados mais interessantes, também será testada no equipamento de rastreador de campo próximo. Para este ensaio, foi observado duas relações de comparação, sendo observadas a seguir:

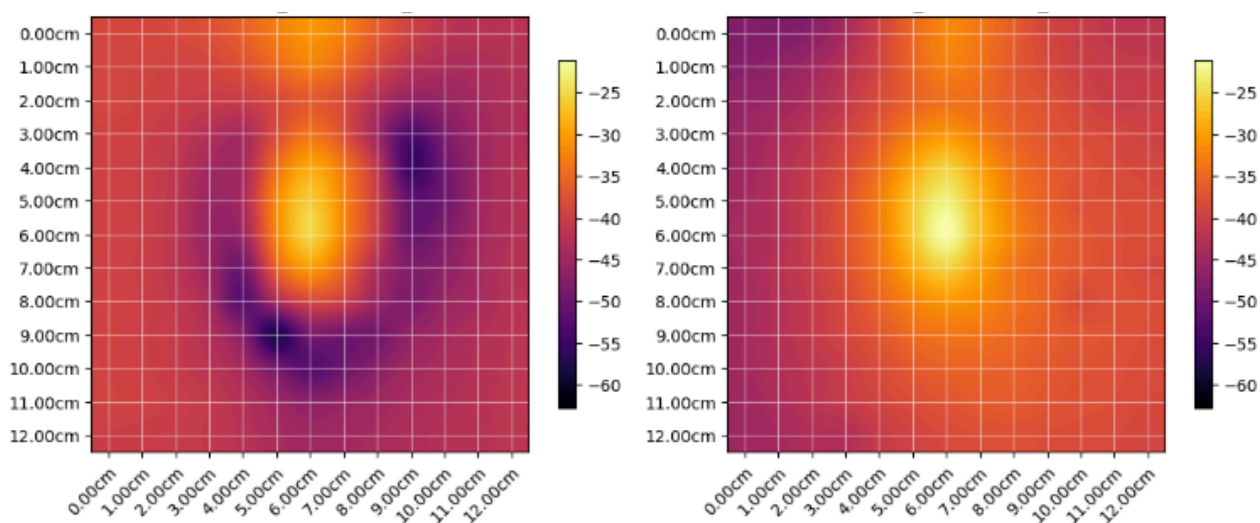
- Comparação 01: Frequência de alinhamento vertical de 458 MHz com a frequência de alinhamento horizontal de 450 MHz, apresentada na Figura 61.
- Comparação 02: Frequência da informação comercial de 433 MHz com a frequência encontrada no Pocket VNA teste próximo de 510 MHz. Apresentada na Figura 62.

Figura 61 - Comparação 01 (450 MHz vs 458 MHz)



Fonte: Elaboração Própria

Figura 62 - Comparação 02 (433 MHz vs 510 MHz)



Fonte: Elaboração Própria

Na comparação 01, comparando as duas imagens, pode-se notar que os padrões de radiação mudam entre os alinhamentos horizontal e vertical. Isso pode indicar variações no acoplamento da antena com o ambiente ou diferenças na diretividade, no caso, como as antenas testadas têm formato espiral, a distribuição de campo pode sugerir como a geometria influencia a radiação e a interação com o ambiente próximo.

Na comparação 02, em 433 MHz, o campo apresenta uma região intensa de radiação (amarela) centralizada, mas com áreas de interferência e possíveis cancelamentos (zonas escuras), o que ocorre de forma diferente para 510 MHz, a radiação parece mais homogênea, sem grandes regiões de cancelamento, sugerindo um padrão de irradiação mais uniforme.

Sendo assim, se a antena foi projetada para operar em 433 MHz, mas sua ressonância real está em 510 MHz, pode haver uma perda de eficiência e um aumento da impedância refletida na frequência original. Isso pode resultar em menor ganho e desempenho abaixo do esperado na aplicação original.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O cenário tecnológico atual impõe desafios cada vez maiores para os projetistas de antenas, desde a necessidade de miniaturização até o aumento das frequências de operação dos sistemas de comunicação. Isso exige o uso de equipamentos avançados para análises mais detalhadas de grandezas como padrão de radiação, impedância, coeficiente de reflexão e eficiência da antena. Ferramentas como analisadores de redes vetoriais (VNA), rastreador de campo próximo tornam-se essenciais para o teste e averiguação do desempenho de antenas em diferentes topologias.

Neste contexto, buscou-se um estudo aprofundado sobre a influência da geometria e funcionamento das antenas, a fim de entender seus impactos no desempenho e na eficiência da irradiação em diferentes configurações. Assim, ao longo do trabalho, foram explorados os conceitos fundamentais de antenas, bem

como análises experimentais para uma melhor compreensão do comportamento eletromagnético das estruturas testadas.

A análise das antenas A e B, realizada com o Pocket VNA, demonstrou que ambas atendem ao critério da frequência de corte, situando-se próximas do valor ideal projetado de 740 MHz. Além disso, o coeficiente de reflexão permanece na faixa de -10 dB para a frequência analisada, e o valor de VSWR é próximo de zero, indicando um bom desempenho na operação desejada.

Na antena C, observou-se que a frequência de corte está significativamente mais próxima da frequência desejada. Conforme indicado em roxo na Figura 68, esse valor foi identificado próximo de 690 MHz. Além disso, a forma de onda da magnitude revela que a antena C apresenta uma maior diretividade em comparação ao dipolo de meia onda, que, por sua vez, possui uma largura de banda mais ampla.

As placas de dipolo planar D, E, F e G apresentaram uma largura de banda maior quando testadas na topologia vertical em comparação com a topologia horizontal, sendo essa a característica mais evidente nas análises realizadas com o Pocket VNA. Através do parâmetro S11, foi possível observar o coeficiente de reflexão, enquanto o S12 permitiu avaliar a magnitude do sinal transferido entre as antenas, validando os testes realizados. Conforme afirmado por Akinola et al., "a largura de banda também pode ser aumentada com a modificação do patch de geometria" (AKINOLA; HASHIMU; SINGH, 2019), o que se mostrou válido ao comparar esses resultados com os da antena de dipolo de meia onda apresentada anteriormente.

Os testes realizados com a antena espiral, apresentaram resultados satisfatórios quanto à emissão. Isto comprovou que as antenas espirais dependem da forma que está disposta para propagação, sendo semelhante a uma antena direcional, embora mais larga e sem necessidade de ajuste fino de diretividade.

Por fim, considerando a utilização do equipamento Pocket VNA para análise de antenas no caráter exploratório, com que a extensão do estudo e os testes práticos realizados, pode-se concluir que a geometria e a configuração das antenas desempenham um papel crucial no desempenho das antenas. Dependendo da aplicação desejada, certas modificações podem otimizar a eficiência da

irradiação e a adaptação de impedância, enquanto outras podem comprometer o desempenho da antena. Além disso, evidencia-se que, tão importante quanto projetar a estrutura de irradiação, é garantir uma boa correspondência de impedância, que variações nesse parâmetro impactam diretamente o coeficiente de reflexão, afetando a eficiência da transferência de potência e o desempenho geral da antena.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Recomenda-se, para trabalhos futuros, a realização de testes com diferentes geometrias de antenas, variações nos parâmetros dimensionais e alterações no layout, com o objetivo de avaliar o impacto dessas modificações no desempenho. Também é indicado investigar a influência de distintos materiais de substrato e técnicas de fabricação, além da análise do comportamento dos campos elétrico e magnético em uma faixa ampliada de frequências, proporcionando uma compreensão mais abrangente da performance das antenas em diversas condições.

Adicionalmente, destaca-se o potencial do Pocket VNA como ferramenta didática em disciplinas institucionais voltadas ao estudo de antenas. Sua aplicação prática contribui significativamente para o aprofundamento teórico e experimental dos conceitos envolvidos na área.

REFERÊNCIAS

- AKINOLA, Segun; HASHIMU, Iddi; SINGH, Ghanshyam. Gain and bandwidth enhancement techniques of microstrip antenna: a technical review. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL INTELLIGENCE AND KNOWLEDGE ECONOMY (ICCIKE), 2019, Dubai, Emirados Árabes Unidos. Anais [...] [S.l.]: Amity University, 2019. p. [1-6]. Acesso em: 10 dez. 2024.
- ALIAKBARI, H.; LAU, B. K. Characteristic mode analysis of planar dipole antennas. In: 13TH EUROPEAN CONFERENCE ON ANTENNAS AND PROPAGATION (EUCAP 2019). [S.l.]: IEEE, 2019. p. [páginas]. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8739305>. Acesso em: 10 nov. 2024.
- BALANIS, Constantine A. Antenna theory: analysis and design. 3. ed. [S.l.]: Wiley, 1997.
- BIDINOTTO, Jorge Henrique; MORAES, Marcus Vinícius Pereira de. *Princípios de aviônica e navegação*. 2017. Disponível em: <https://docplayer.com.br/229253321-Jorge-henrique-bidinotto-marcus-vinicius-pereira-de-moraes-principios-de-avionica-e-navegacao-capitulo-7-antenas.html>. Acesso em: 14 fev. 2025
- BOGATIN, Eric. *Signal and Power Integrity - Simplified*. 3. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2018.
- CINAY, Aykut; KURT, Erol; CELIK, Kayhan. Design and implementation of a 2.4 GHz Yagi-Uda antenna and dependence of the antenna parameters to the structural parameters. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL, COMMUNICATION AND COMPUTER ENGINEERING (ICECCE), 3., 2021, Kuala Lumpur. Anais [...] IEEE, 2021.
- FERNANDES, António S. C. *Antenas de Onda Estacionária: Métodos e Modelos de Análise*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1980.
- KELLER, Reto B. Design for electromagnetic compatibility - in a nutshell: theory and practice. Cham: Springer, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-14186-7>. Acesso em: 10 dez. 2024.
- LIU, Yuan; HU, Aiguo Patrick. Power density distribution analysis of an IPT system based on Poynting vector. [Nome da Revista], [s.l.], v. X, n. Y, p. Z-Z, 2024. ieeexplore.ieee.org/document/8289250. Acesso em: 10 dez. 2024.
- LOESCH, Silmara; RAMBO, Carlos Alberto; FERREIRA, Jacques Lima. A pesquisa exploratória na abordagem qualitativa em educação. *Revista Ibero-Americana de Estudos em Educação*, v. 18, p. 1-15, 2022. DOI: <https://doi.org/10.21723/riaee.v18i00.17958>.

LUIZ, A. SISTEMA AUTOMÁTICO DE RASTREAMENTO DE CAMPO PRÓXIMO. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto Federal de Santa Catarina. 2022.

OLIVEIRA, Francisco José Dantas de. Análise paramétrica de antenas anelares de microfita. 2019. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Eletrônica) — Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró.

ORLANDES, Sancelir; SCHLICHTING, Luis Carlos Martinhago. Estudo do crosstalk utilizando o Pocket-VNA. In: *9º SEMINÁRIO DE ENSINO, PESQUISA, EXTENSÃO E INOVAÇÃO DO IFSC (SEPEI)*, 2023, Joinville. Anais... Joinville: IFSC, 2023. Vol. 1, p. 157899. ISSN 2357-836X. Oral - Presencial.

OTT, Henry W. Electromagnetic compatibility engineering. Rev. ed. Hoboken: Wiley, 2009. ISBN 978-0-470-18930-6.

PINHEIRO, Christian; SOUSA, Édson dos Santos; CORDEIRO, Jean Almeida; ALMEIDA, José Felipe. Antena dipolo planar. In: XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES (SBRT 2007), 2007, Recife, PE. Anais [...] Recife: SBrT, 2007.

POCKET VNA. *Manual do Pocket VNA*. [S.l.]: PocketVNA, [2025?]. Disponível em: https://docs.google.com/document/d/1EEMBrSMAF8PqhVpCFavtOTwVPbuzsg1uB_m7AVQ6yQ. Acesso em: 2 fev. 2025.

POZAR, David M. Microwave engineering. 4. ed. [S.l.]: Wiley, 2012.

RIOS, Luiz Gonzaga; PERRI, Eduardo Barbosa. *Engenharia de antenas*. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2002.

SCHLICHTING, L. C. M. Contribuição ao Estudo da Compatibilidade Eletromagnética Aplicada aos Conversores Estáticos. Tese (Doutorado). Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 2003. Disponível em: . Acesso em: 8 jul 2024.

SILVA, Adriano de Oliveira; BARBOSA, Francisco de Assis; LIMA, José de Sousa. Caracterização e confecção de uma antena de microfita para recepção de sinais de TV digital. *Revista Principia*, João Pessoa, v. 1, n. 1, p. 1-8, 2012. Disponível em: <https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/download/144/114>.

SONAWANE, Amol D.; BORMANE, Dattatraya S. Half wave dipole antenna performance parameter measurement and comparison at 900 and 1800 MHz frequency. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY 4.0 TECHNOLOGY (I4TECH), 2022, Pune, Índia. Anais [...] Pune: Vishwakarma Institute of Technology, 2022. p. 5. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9952418>. Acesso em: 10 dez. 2024.

SOARES, Antonio José Martins; SILVA, Franklin da Costa. Antenas e propagação. 2003. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica.

SOARES, Antonio José Martins; SILVA, Franklin da Costa. Projeto de uma Antena Dipolo Planar Curvado para Aplicações na Indústria 4.0. *R4EM - Revista de Engenharia e Meio Ambiente*, v. X, n. Y, p. Z-Z, 2003. Disponível em: <https://periodicos.ufersa.edu.br/r4em/article/view/9577/10328>. Acesso em: 20 mar. 2025.

STUTZMAN, Warren L. Estimating directivity and gain of antennas. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, v. 40, n. 4, p. 546-551, 1992. DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/document/215202>. Acesso em: 15 dez. 2024.

TEKTRONIX. *Manual do Analisador de Rede Vetorial TTR500 Series*. 2017. Disponível em: <https://www.tek.com/en/spectrum-analyzer/ttr500-manual/ttr500-series>. Acesso em: 24 fev. 2025.

WANG, Bing; SHEN, Zhongxiang; GAN, Theng Huat; LEE, Yee Hui. Radiation pattern improvement of a wide-band planar monopole antenna. *Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, [s.l.], v. X, n. Y, p. 1-10, 2024. Firenze, Italy, 2024, pp. 2219-2220, doi: 10.1109/AP-S/INC-USNC-URSI52054.2024.10686352. Acesso em: 10 dez. 2024.

YOUSIF, Suzi. *Estudo de técnicas aplicadas à redução do efeito crosstalk em placas de circuito impresso*. 2021. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Eletrônica) – Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021. Disponível em: https://repositorio.ifsc.edu.br/bitstream/handle/123456789/2358/TCC-SuziYousif_final_17-10-2021.pdf?isAllowed=y&sequence=1. Acesso em: 08 jan. 2025