



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS VII – GOVERNADOR ANTÔNIO MARIZ
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E SOCIAIS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
CURSO DE LICENCIATURA PLENA EM FÍSICA**

JOSÉ RUAN CARNEIRO

**APLICAÇÃO DA SUPER EQUAÇÃO DE JOHAN GIELIS NA CRIAÇÃO DE
PROJETOS DE ANTENAS DE MICROFITA**

**PATOS-PB
2025**

JOSÉ RUAN CARNEIRO

**APLICAÇÃO DA SUPER EQUAÇÃO DE JOHAN GIELIS NA CRIAÇÃO DE
PROJETOS DE ANTENAS DE MICROFITA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Estadual da
Paraíba, como requisito parcial à
obtenção do título de licenciatura em
Física.

Área de concentração: Física aplicada
ao Eletromagnetismo.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Carlos de Assis Junior

**PATOS-PB
2025**

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto em versão impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que, na reprodução, figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

C289a Carneiro, Jose Ruan.

Aplicação da super equação de Johan Gielis na criação de projetos de antenas de microfita [manuscrito] / Jose Ruan Carneiro. - 2025.

57 f. : il. color.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências Exatas e Sociais Aplicadas, 2025.

"Orientação : Prof. Dr. Pedro Carlos de Assis Júnior, Coordenação do Curso de Física - CCEA".

1. Antenas de microfita. 2. Apoio pedagógico. 3. Eletromagnetismo aplicado. I. Título

21. ed. CDD 537.5

JOSE RUAN CARNEIRO

APLICAÇÃO DA SUPER EQUAÇÃO DE JOHAN GIELIS NA CRIAÇÃO DE
PROJETOS DE ANTENAS DE MICROFITA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso
de Física da Universidade Estadual da
Paraíba, como requisito parcial à
obtenção do título de Licenciado em
Física

Aprovada em: 22/05/2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado eletronicamente por:

- **Guillermo Francisco Palacios Roque** (***.822.124-**), em **02/06/2025 14:30:18** com chave **40c5a50a3fd711f09cfd06adb0a3afce**.
- **Rodrigo Cesar Fonseca da Silva** (***.640.044-**), em **02/06/2025 14:47:14** com chave **9e98e6f43fd911f0907006adb0a3afce**.
- **Pedro Carlos de Assis Júnior** (***.670.524-**), em **02/06/2025 14:29:19** com chave **1dc4d9903fd711f0b4e11a1c3150b54b**.

Documento emitido pelo SUAP. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse https://suap.uepb.edu.br/comum/autenticar_documento/ e informe os dados a seguir.

Tipo de Documento: Folha de Aprovação do Projeto Final

Data da Emissão: 02/06/2025

Código de Autenticação: 88fedc



"O próprio Senhor irá à sua frente e estará com você; ele nunca o deixará, nunca o abandonará. Não tenha medo! Não se desanime!" – (Deuteronômio 31:8)

Dedico aos meus pais e a minha querida namorada por todo apoio na minha vida acadêmica de estudante, aos futuros alunos do curso que poderão utilizar este presente trabalho como material de estudos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, por me ajudar a ultrapassar todos os obstáculos encontrados dentro e fora da graduação, por sempre ter me mantido firme e perseverante durante toda essa caminhada.

Aos meus pais, Maria José e Ricardo de Lima, que me educaram e sempre me incentivaram a estudar e correr atrás dos meus sonhos e por me terem dado a liberdade de poder trilhar meu próprio caminho e por todo o cuidado que tiveram comigo durante as viagens de ônibus para a universidade.

A minha adorável e amada namorada, Naiany da Silva, que sempre vem me ajudando e segurando minha mão durante todas as dificuldades dentro e fora da universidade. E por todos os momentos de dificuldades e divertidos que passamos juntos nas viagens de ônibus indo para a universidade. Muito obrigado por sua presença e por seus amáveis conselhos durante todo o processo, eles tornaram não só a graduação mais leve, como também a minha vida. Graças a isso, pude melhorar meu desempenho no geral na universidade, você tem sido a luz de Deus na minha vida.

Ao professor Dr. Pedro Carlos, que me conheceu no terceiro período do curso e desde então me incentivou e me apoiou com suas orientações durante todo o curso e me fez acreditar que podia me tornar um grande profissional e um ótimo professor de Física e além de tudo, pela oportunidade de PIBIC e por me incentivar sempre a buscar melhorias e novas formações acadêmicas. Obrigado pela disponibilidade de sempre estar disposto a sanar minhas dúvidas.

Ao professor Dr. Elder Eldervitch por todo auxílio e parceria nos trabalhos de PIBIC e disponibilidade para ajudar com dúvidas sobre os projetos.

Aos colegas de classe pelos momentos de apoio, e pelas noites em claro que passamos fazendo trabalhos e tirando dúvidas sobre as disciplinas.

Aos Professores do curso de Física da UEPB que me ajudaram durante a minha trajetória acadêmica, com oportunidades de projetos e conselhos profissionais. E principalmente pelas dicas de aprendizado das disciplinas mais difíceis da graduação. obrigado por toda paciência e por transmitir os seus conhecimentos.

RESUMO

As tecnologias voltadas ao ramo das telecomunicações vêm passando por inúmeras inovações em termos de aplicações em serviços, principalmente com o aparecimento das tecnologias 3G, 4G e 5G. Mediante tal cenário, as antenas de microfita entram como uma inovação devido às suas muitas vantagens, tais como: bom custo benefício, são pequenas e de fácil construção. Esses fatores levaram ao destaque nas pesquisas atuais envolvendo o eletromagnetismo aplicado. Nesse contexto, este trabalho de conclusão de curso, no modelo monografia, tem como objetivo apresentar algumas antenas de microfita desenvolvidas no decorrer de três projetos de iniciação científica. Foram três anos de pesquisa onde construímos antenas de microfita inéditas e que podem ser estudadas por estudantes de graduação que se interessem pelo tema. Nesta monografia abordamos a teoria eletromagnética e as telecomunicações associada as antenas de microfita. Todos os parâmetros conceituais relevantes nesse estudo são definidos servindo de apoio didático pedagógico. Nossos projetos são do tipo quantitativos e experimentais usando a equação do botânico Johan Gielis como uma ferramenta para encontrar novas geometrias usadas como elementos geométricos polares para a radiação dessas antenas. Como ferramenta computacional de verificação da funcionalidade das antenas de microfita usamos o software comercial Ansoft Designer®. Essa ferramenta computacional é fundamental no processo de definição da antena de microfita que desejamos construir. Como parâmetros e interesse temos: coeficiente de perda de retorno, a carta de Smith, o VSWR, e a impedância de entrada. Essas medidas definem muito bem as características de uma antena de microfita. Existem técnicas na literatura para melhorar a resposta de uma antena de microfita como o aumento de largura de banda ou a teoria de conjunto (arranjos), permitindo otimizar a resposta final de uma antena de microfita. Concluimos esse trabalho com a certeza de que deixaremos um conjunto valioso de informações para futuras pesquisas em antenas de microfita. Este trabalho de monografia ficará na biblioteca do Campus VII da UEPB e disponível para qualquer estudante.

Palavras-Chave: Antenas de Microfita; Apoio Pedagógico; Eletromagnetismo Aplicado.

ABSTRACT

Technologies aimed at the telecommunications sector have been undergoing numerous innovations in terms of service applications, especially with the emergence of 3G, 4G and 5G technologies. In this scenario, microstrip antennas have become an innovation due to their many advantages, such as: low cost-benefit, small size and easy construction. These factors have led to their highlight in current research involving applied electromagnetism. In this context, this course completion work, in the monograph format, aims to present some microstrip antennas developed during three scientific initiation projects. There were three years of research in which we built new microstrip antennas that can be studied by undergraduate students interested in the subject. In this monograph, we address the electromagnetic theory and telecommunications associated with microstrip antennas. All relevant conceptual parameters in this study are defined, serving as didactic pedagogical support. Our projects are quantitative and experimental, using the equation of botanist Johan Gielis as a tool to find new geometries used as polar elements for the radiation of these antennas. As a computational tool to verify the functionality of the microstrip antennas, we use the commercial software Ansoft Designer®. This computational tool is fundamental in the process of defining the microstrip antenna that we want to build. The parameters of interest are: return loss coefficient, Smith chart, VSWR, and input impedance. These measurements define the characteristics of a microstrip antenna very well. There are techniques in the literature to improve the response of a microstrip antenna, such as increasing bandwidth or set theory (arrays), allowing better adjustment of the final response of a microstrip antenna. We conclude this work with the certainty that we will leave a set of very rich information for future research on microstrip antennas. This monograph work will be in the library of Campus VII of UEPB and available to any student.

Keywords: Microstrip Antennas; Pedagogical Support; Applied Electromagnetism.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Carga elétrica positiva e carga elétrica negativa.....	16
Figura 2 – Duas cargas elétricas de mesmo sinal interagindo.....	16
Figura 3 – Duas cargas de sinais diferentes interagindo	17
Figura 4 – Balança de Torção de Coulomb.....	17
Figura 5 - A agulha magnética é um elemento de prova do campo magnético em um ponto.....	18
Figura 6 - Sentido e direção do campo magnético	19
Figura 7 – Estrutura de uma antena de microfita.....	20
Figura 8 – Exemplos de formas geométricas básicas utilizadas na criação das antenas patch de Microfita.	21
Figura 9 - Lobos do diagrama de radiação	23
Figura 10 - Antena patch alimentada por linha de microfita.....	25
Figura 11 - Gráfico da curva do Coeficiente de Perda de Retorno;.....	27
Figura 12 - Carta de Smith caracterizando o casamento de impedância;	28
Figura 13 - Carta de Smith caracterizando o casamento e impedância	28
Figura 14 - Caracterização da Largura de Banda (BW) de uma antena	29
Figura 15 - a e b Exemplos de possíveis formas geométricas que podem ser encontradas usando a super equação;.....	30
Figura 16 - Exemplo de formas geométricas bio-inspiradas na natureza;	30
Figura 17 - Exemplo de geométricas geradas com pétalas;	32
Figura 18- Forma geométrica de uma geometria em espiral;.....	33
Figura 19 - Forma geométrica encontrada no MATLAB®	35
Figura 20 - Antena 1 Simulada usando patch de geometria Polar.....	35
Figura 21 - Adesivo da Antena 1 simulada	36
Figura 22 - Momentos do processo de adesivação e da corrosão.....	37
Figura 23 - Forma geométrica 2 encontrada no MATLAB®.....	37
Figura 24 - Antena 2 Simulada usando patch de geometria Polar.....	38
Figura 25 - Momentos do processador de adesivação e corrosão	39
Figura 26 - Antena 3 Simulada usando patch de geometria Polar com aplicação do DGS	41
Figura 27 - Antena 3 (frente e verso) após a corrosão.....	42
Figura 28 - Forma geométrica 3 encontrada no MATLAB®.....	42

Figura 29 - Antena 4 Simulada usando patch de geometria Polar com aplicação do DGS	43
Figura 30 - Antena 4 (frente e verso) após a corrosão	43
Figura 31 - Antena 5 Simulada usando patch de geometria Polar com aplicação do DGS	44
Figura 32 - Gráfico da Perda de Retorno da antena 1 medida e simulada;	46
Figura 33 - Carta de Smith da Antena 1;.....	46
Figura 34 - VSWR da Antena 1;.....	47
Figura 35 - Parâmetros de irradiação da antena 1;	48
Figura 36 - Gráfico da Perda de Retorno da antena 2 medida e simulada;	48
Figura 37 - Carta de Smith da antena 2;.....	49
Figura 38 - Parâmetros de irradiação da antena 2;	50
Figura 39 - Gráfico da Perda de Retorno da antena 3 medida e simulada;	51
Figura 40 - Carta de Smith da antena 3;.....	51
Figura 41 - Parâmetros de Irradiação da antena 3;	52
Figura 42 - Gráfico da Perda de Retorno da antena 4 medida e simulada;	53
Figura 43 - Gráfico da Perda de Retorno da antena 5 medida e simulada;	53
Figura 44 - Cartas de Smith da antena 4 e 5;.....	54
Figura 45 – Parâmetros de Irradiação da Antena 4;.....	54
Figura 46 - Paramentos de Irradiação da Antena 5;.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões da Antena 1	36
Tabela 2 - Dimensões da Antena 2	38
Tabela 3 - Dimensões da Antena 3;	41
Tabela 4 - Dimensões da Antena 4	43
Tabela 5 - Dimensões da Antena 5;	45
Tabela 6 - Medições dos parâmetros da antena 1;	48
Tabela 7 - Medições dos parâmetros da antena 2;	50
Tabela 8 - Medições dos parâmetros da antena 3;	52
Tabela 9 - Medições dos parâmetros da antena 4 e 5;	55

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. TEORIA ELETROMAGNÉTICA	14
3. ANTENAS DE MICORFITA.....	19
3.1 Caracterização de uma antena de microfita	20
3.2 Parâmetros fundamentais de uma antena de microfita	22
3.2.1 Diagrama de irradiação	22
3.2.2 Características do diagrama de irradiação: Lobos.	22
3.2.3 Ganho e Diretividade.....	23
3.3 Casamento de Impedância e Casamento de impedância	24
3.3.1 Linha de alimentação de uma antena de microfita	24
3.3.2 Impedância de entrada e o casamento de impedância	25
3.3.3 Carta de Smith, VSWR e o Coeficiente de perda de retorno.....	26
4 A SUPER EQUAÇÃO DE JOHAN GIELIS	29
5 Elementos Geométricos polares	32
6. Antenas patch de microfita com elementos geométricos polares.....	33
6.1. Tipos de elementos geométricos polares irradiantes abordados	33
6.1.1. Elemento geométrico circular	34
6.1.2. Antena 1 com geometria polar	34
6.1.3. Antena 2 com geometria polar	37
6.1.4. Outros Modelos de Antenas com Geometria Polar	39
6.1.4.1. Aplicações da Falha DGS no Plano Terra.....	40
6.1.5. Antenas 3, 4 e 5 com geometria polar e com aplicações das falhas DGS no plano terra	40
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
6.1. Antena 1:	45
6.2. Antena 2:	48
6.3. Antena 3:	50
6.4. Antena 4 e 5 (As menores):.....	52
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
8. REFERÊNCIAS	56

1. INTRODUÇÃO

Estamos vivendo na era moderna, e esta é marcada por uma revolução sem precedentes com o surgimento das tecnologias, impulsionada pela criação e integração de sistemas e dispositivos avançados como computadores, imagens de ressonância, carros computadorizados, smartphones, Ipods, bancos virtuais, dentre outros. A sociedade atual depende fortemente dessas tecnologias. São dispositivos que estão notoriamente presentes na vida dos seres humanos do século XXI. Atualmente, nos deparamos com muitos dispositivos eletrônicos conectados a redes de internet, através de redes Wi-Fi, são eletrodomésticos, meios de transportes, fabricação de equipamentos, entre muitos outros. Destacamos os meios de comunicações sem fio. Nesse cenário, as telecomunicações sem fio emergem como ferramentas indispensáveis, conectando pessoas, dispositivos e sistemas de maneira eficiente e global. Desde a popularização do Wi-Fi e Bluetooth até a crescente adoção de dispositivos IoT (Internet das Coisas), a faixa de frequência de 2,4 GHz desponta como uma escolha amplamente utilizada devido ao seu equilíbrio entre alcance, capacidade de transmissão e disponibilidade no espectro de rádio.

Com o avanço tecnológico ocorrido nos últimos anos e o contínuo aumento da oferta de serviços de comunicação, em especial nos meios de comunicação sem fio (wireless), tem sido cada vez maior a procura por dispositivos eletrônicos controlados que operem em alta frequência, e que atendam a algumas características, tais como: a largura de banda, seletividade, dimensões e pesos reduzidos, baixo custo, etc. (MONTALVÃO et al, 2011). Esse avanço nas telecomunicações é sustentado pela base teórica eletromagnética, cujas leis e princípios, baseiam-se matematicamente nas equações do físico escocês James Clerk Maxwell e com o apoio da computação, fornecem a estrutura necessária para que sejamos capazes de compreender e projetar tais sistemas de comunicações modernos. A física associada a teoria eletromagnética, guiou inovações incríveis que vão desde a transmissão de rádio até as redes 5G, capazes de suportar alta densidade de dispositivos conectados, baixa latência e velocidades de transmissão que transformam setores como saúde, transporte e educação. O impacto das redes 5G em particular, tem potencializado aplicações críticas em cidades inteligentes e veículos autônomos, solidificando-se como um pilar do progresso econômico e social. (ANATEL, 2022).

Ao tentar aplicar essa nova tecnologia de quinta geração (5G) em novos dispositivos com aplicações em dados móveis, exigem-se mais recursos aplicados aos novos dispositivos móveis de telecomunicações, além de que, sempre existirá novos estudos para desenvolver novos dispositivos, mais leves e compactos e mais robustos computacionalmente. A tecnologia 5G, proporcionará uma

melhoria significativa nas redes móveis, possibilitando atender às necessidades de comunicação de bilhões de dispositivos conectados instantaneamente, com um equilíbrio justo entre o aumento da velocidade, baixa latência e custo mais acessível. (ANATEL, 2022).

Dispositivos leves, compactos e com um custo reduzido tem chamado a atenção de técnicos, engenheiros e pesquisadores da área das telecomunicações. Essas características tornam as estruturas planares multibanda atrativas para aplicações em sistemas de comunicação móveis, comunicação por satélite e radar. Não resta dúvida de que a redução das dimensões e a operação em várias faixas de frequência são requisitos desejáveis aos aparelhos de comunicação modernos (ALMEIDA FILHO, 2010). Esse grande avanço tecnológico aliado as limitações de espaço cada vez mais perceptíveis nos equipamentos modernos, fazem das tecnologias de circuitos planares um importante recurso para projetos de dispositivos móveis para possíveis aplicações nas mais diversas áreas de interesse (OLIVEIRA, 2008).

Tais dispositivos se apresentam como candidatos em potencial a aplicações em sistemas de comunicações sem fio, uma vez que a miniaturização desses dispositivos e o funcionamento em várias faixas de frequências são requisitos requeridos pelos aparelhos de comunicação modernos (MALEK, et al., 2019). Diversas técnicas de miniaturização dos dispositivos estão sendo estudadas e aplicadas envolvendo estruturas planares através da utilização de substratos dielétricos de alta permissividade elétrica (CHAUDHURI, et al. 2013). Neste sentido, o constante surgimento de novas tecnologias sem fio (Wireless) resulta em uma alta demanda por estudos de novos dispositivos compactos, que permitam a sua aplicação em diferentes tipos de tecnologias Wireless que funcionem a base do Wi-Fi em dispositivos sem perdas de desempenho e que sejam de baixo custo. Neste cenário, o desenvolvimento de dispositivos eficientes e compactos que operem na faixa de 2,4 GHz ganha ainda mais relevância. As antenas de Microfita, por serem de baixo custo e flexibilidade de design, destacam-se como soluções ideais para atender às demandas tecnológicas emergentes. Ampliando sua aplicabilidade, essas antenas são projetadas para operar em sistemas multibanda, radares e satélites, consolidando sua posição como elementos centrais no avanço das telecomunicações.

Durante estudos para implementar novos designs para as antenas de Microfita, foram realizados testes usando a descrição da equação do botânico Johan Gielis, que permitem modelar e criar uma infinidade de geometrias polares para aplicações nos mais diversos tipos de trabalhos sobre antenas de Microfita. A equação de Gielis, originalmente desenvolvida para descrever formas naturais, exemplifica como a interdisciplinaridade pode impulsionar a inovação tecnológica. Suas aplicações são diversas na busca por geometrias polares para as antenas de microfita, refletindo o encontro entre matemática, física e engenharia, possibilitando otimizações geométricas que

melhoram o desempenho enquanto minimizam o tamanho e os custos de fabricação. Esse avanço técnico está alinhado com a busca contínua por soluções mais leves, compactas e sustentáveis, características indispensáveis em um mundo cada vez mais conectado.

Neste contexto, o objetivo geral desse trabalho de conclusão de curso consiste em abordar a teoria eletromagnética, relação entre campo elétrico e magnético, definição de uma antena de microfitas, construção e caracterização de uma antena de microfitas e apresentação das antenas de microfitas construídas no decorrer de três anos de iniciação científica. A base do nosso projeto de antenas de Microfitas, seguiu o uso de elementos geométricos polares usando a equação do botânico Johan Gielis, operando na banda ISM (Industrial Scientific and Medical), mais precisamente na frequência de 2,44 GHz. A base computacional desse trabalho foram as simulações realizadas no software Ansys Designer que tem como objetivo específico abordar a teoria do eletromagnetismo aplicado à uma modelagem numérica da antena de microfitas desejada.

2. TEORIA ELETROMAGNÉTICA

O eletromagnetismo se consolida como uma das áreas mais fascinantes e intrigantes da física aos olhos de qualquer pessoa. O simples fato de uma pessoa pensar em como funciona os aparelhos eletrônicos e fiação elétrica já é algo de se deixar a imaginação correr solta ou até mesmo o simples fenômeno de uma bússola pode deixar as pessoas de boquiabertas com tamanha “magia” que reage com agulhas e que leva a imaginação as alturas. Até mesmo na antiguidade já se falava sobre essas “coisas grandiosas e maravilhosas enviada dos deuses”, propriedades essas encontradas em pedras que possuía vidas que teriam origens divinas.

Esse tema tão mágico é o responsável por descrever a interação entre os campos elétricos e magnéticos. Onde, desde a antiguidade ocorrem observações dessas propriedades magnéticas de pedras capazes de atrair metais, observações essas que estão datadas para a antiga Grécia com a lenda do pastor Magnes, ou à região de Magnésia, na atual Turquia. Ao longo dos séculos, essas propriedades foram utilizadas em aplicações práticas, como a bússola, fundamental para a navegação desde 2000 a.C. na China e amplamente ampliada na Europa durante a Idade Média.

A princípio, o estudo sistemático mais aprofundado no magnetismo teve um grande avanço durante os séculos 16 e 18, quando William Gilbert publicou *De Magnete*, defendendo que a Terra se comporta como um grande ímã. No século XVIII, Charles-Augustin de Coulomb formulou a lei da força eletrostática, descrevendo matematicamente a interação entre cargas elétricas. E foi no início do século 19, que Hans Christian Ørsted descobriu que correntes elétricas produzem campos

magnéticos, revelando a ligação entre eletricidade e magnetismo. Que posteriormente viria a ser aprofundado por Michael Faraday, que comprovou que a indução eletromagnética era verdadeira demonstrando que um campo magnético variável é capaz de gerar correntes elétricas. Tais descobertas realizadas por Faraday e posteriormente completadas por Joseph Henry, foram muito importantes na história da consolidação da teoria do eletromagnetismo.

No entanto, um dos maiores avanços no eletromagnetismo se deu através do matemático James Clerk Maxwell, que através das bases teóricas fundadas pelos os seus antecessores, ele fortaleceu ainda mais essas bases teóricas através da elaboração das equações de Maxwell para o eletromagnetismo, fortalecendo ainda mais a relação entre os conceitos de eletricidade, campos elétricos e magnéticos e o magnetismo. E foi então a partir dessa grande contribuição de Maxwell para o eletromagnetismo, que se tornou possível a invenção e construção de novas grandes tecnologias, como por exemplo, o motor elétrico, a produção de energia nas usinas hidrelétricas, ondas de rádio e televisão, aparelhos de telecomunicação etc.

2.1 Campo Elétrico e o Campo Magnético

2.1.1 Campo Elétrico

Perceba que sempre que tivermos uma carga elétrica, teremos que ela possui um determinado campo elétrico. Em outras palavras, ao analisarmos os casos de uma carga elétrica estacionária, perceberemos que na presença desse campo elétrico, qualquer carga que se aproximar desse campo elétrico produzido por outra carga, estará sujeita a ação do mesmo através dos efeitos da força elétrica causado pelo módulo do campo elétrico naquela região. E podemos representar essa força elétrica como:

$$\vec{F} = \vec{E} \cdot q_0 \quad (1)$$

onde:

$\vec{F}$: é a força elétrica;

$\vec{E}$: é o campo magnético;

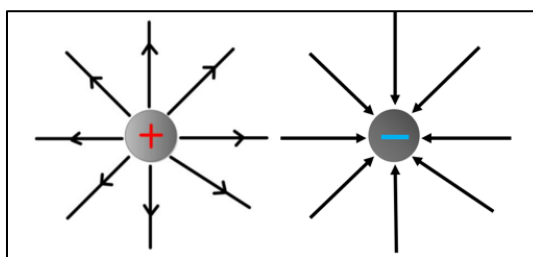
q_0 : é a carga elétrica de prova.

A carga de prova descrita na Eq. 1, são partículas com uma determinada quantidade mínima de carga elétrica. Elas são usadas para analisar campos elétricos sem que ocorra desnecessariamente uma interferência que afete na caracterização original da distribuição de cargas. Em outras palavras,

se tivermos duas cargas iguais (positivas ou negativas) elas iram tender a se repelir. E se forem, cargas diferentes, iram se atrair.

Uma forma simplificada de explicar o que é um campo elétrico, é dizer que o campo elétrico pode ser representado linhas de vetores que estão em volta da carga elétrica. Usando essa ideia, podemos deduzir campos mais fracos ou mais intensos. Campos mais intensos possuem um número maior de linhas de campo e essas linhas ficam mais próximas umas das outras. Campos menos intensos, possuem menos linhas e mais distantes umas das outras. Essa representação visual permite comparar direção, sentido e intensidade do campo.

Figura 1– Carga elétrica positiva e carga elétrica negativa

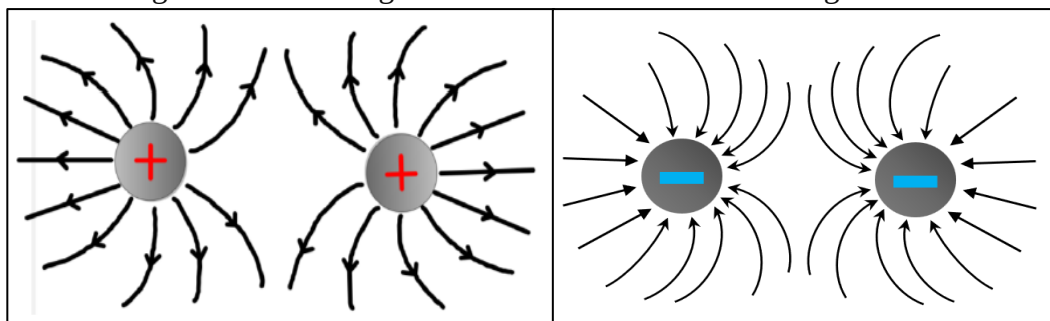


Fonte: Autor, 2025.

Na figura 1, a carga elétrica positiva tem suas linhas de campo se estendendo até o infinito, pois a carga é positiva. Já se mudássemos a carga para um valor negativo os vetores do campo elétrico se originariam no infinito assim como mostra na figura 1 o exemplo de uma carga elétrica negativa.

Veja agora o exemplo da força de atração e de repulsão de cargas com as mesmas cargas elétricas e sinais iguais.

Figura 2 – Duas cargas elétricas de mesmo sinal interagindo

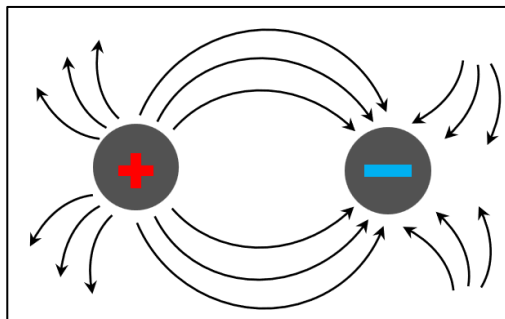


Fonte: Autor, 2025.

No caso da Figura 2 temos duas cargas de mesmo modulo (sinais iguais positivo) tendo suas linhas de campo mostrando o caso de repulsão das duas cargas. E nas áreas em branco entre as duas cargas, o campo elétrico será nulo pela sua ausência.

Como podemos ver na Figura 3 as cargas de sinais opostos se atraem, portanto, as linhas de campo partem da carga positiva para a carga negativa.

Figura 3 – Duas cargas de sinais diferentes interagindo



Fonte: Autor, 2025.

2.1.2 Lei de Coulomb

Entre os anos de 1785 e 1791, Charles-Augustin de Coulomb pesquisou as interações entre cargas elétricas. Ele utilizou um equipamento chamado balança de torção de sua própria autoria. Esse equipamento inovador consiste em uma haste suspensa por um fio tendo em cada uma das extremidades uma esfera eletricamente carregada. Ao aproximar uma terceira esfera eletrizada, a interação elétrica causava uma torção no fio, cujo ângulo permitia calcular a força elétrica envolvida. Através de repetidos experimentos, Coulomb estabeleceu que, a força elétrica é inversamente proporcional ao quadrado da distância (r^2) entre as cargas. A força é diretamente proporcional ao módulo do produto das cargas ($Q_1 \cdot Q_2$). Essas relações deram origem à **Lei de Coulomb**, expressa pela equação:

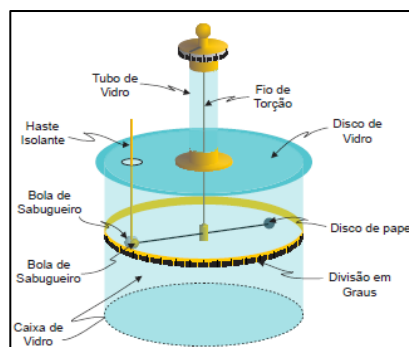
$$\vec{F}_e = K \cdot \frac{|Q_1 \cdot Q_2|}{r^2} \quad (2)$$

Onde,

$$K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8,99 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2, \text{ é a constante eletrostática;} \quad (3)$$

$$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 \cdot c^2} = 8,854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N.m}^2 \text{ é a permissividade no vácuo.} \quad (4)$$

Figura 4 – Balança de Torção de Coulomb



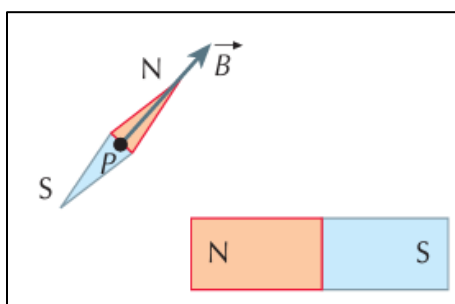
Fonte: Autor, 2025.

2.1.3 Campo Magnético

Na eletrostática, vimos que uma carga elétrica puntiforme fixa origina, no espaço que a envolve, um campo elétrico. A cada ponto P do campo, associou-se um vetor campo elétrico $\vec{E}$. Analogamente, a cada ponto de um campo magnético, associaremos um vetor $\vec{B}$, denominado vetor de indução magnética ou, simplesmente, vetor campo magnético. Genericamente, define-se como campo magnético toda a região do espaço em torno de um condutor percorrido por corrente ou em torno de um ímã, neste caso devido a particulares movimentos que os elétrons executam no interior de seus átomos.

Uma agulha magnética, colocada em um ponto desta região, orienta-se na direção do vetor $\vec{B}$ (Figura 5), o polo norte da agulha aponta no sentido de $\vec{B}$. A agulha magnética serve como elemento de prova da existência do campo magnético num ponto.

Figura 5 - A agulha magnética é um elemento de prova do campo magnético em um ponto.

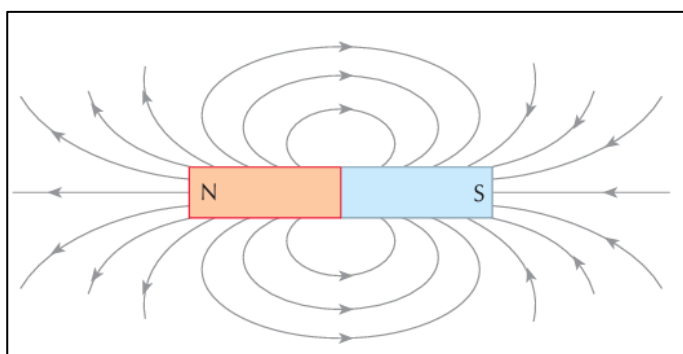


Fonte: Autor, 2025.

No Sistema Internacional de Unidades (S.I.), a unidade de intensidade do vetor $\vec{B}$ denomina-se tesla (T).

Se colocarmos fragmentos de ferro em torno de um ímã, notar-se-á que eles se transformam em pequenas bússolas e se orientam formando certas linhas, sendo que estas linhas recebem o nome de linhas de indução, conforme mostrado na Figura 7. As linhas de indução são em cada ponto tangentes ao vetor $\vec{B}$. É costume orientar as linhas de indução no sentido do vetor $\vec{B}$. Deste modo dizemos que as linhas de indução partem do polo norte e chegam no polo sul. Onde as linhas de indução estão mais próximas, o campo magnético é mais intenso. E à medida que nos afastamos do ímã, as linhas de campo se tornam mais espaçadas, indicando que o campo magnético é mais fraco nessa região e consequentemente objetos não são atraídos com mesma facilidade.

Figura 6 - Sentido e direção do campo magnético



Fonte: Autor, 2025.

3. ANTENAS DE MICROFITA

As antenas de microfita desempenham um papel essencial que as representam como uma das tecnologias mais importantes e essenciais no ramo das telecomunicações, sendo elas, dispositivos que são discretos, moldáveis a superfícies planas e não-planas, de construção simples e de baixo custo. Com a tecnologia de circuitos impressos, essas antenas são mecanicamente robusta quando montadas em superfícies rígidas, compatíveis com projetos MMIC e, [...] são muito versáteis em termos de frequência de ressonância, polarização e uma vasta variação de diagramas (Balanis, 2005). Além disso, elas conseguem desempenhar um papel fundamental no desenvolvimento de novas tecnologias de rede de comunicação sem fio que funcionem a base de Wi-Fi, como por exemplo, tecnologias como Drones, satélites, carros, Smartphones, computadores etc. Isso ocorre devido à sua capacidade de combinar alto desempenho com uma estrutura simples e adaptável, proporcionando soluções versáteis para uma ampla gama de aplicações.

Dentre as mais diversas vantagens que as antenas de microfita possuem sobre outros modelos de antenas, é o fato dela ser mais moldável, leve e compacta, que facilita na hora de fazer

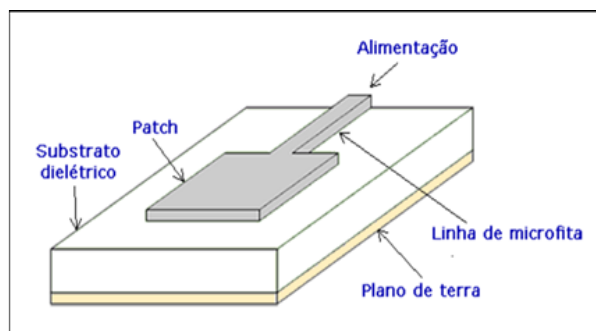
a mobilidade para a adaptação em sistemas dos mais diferentes tipos. Além de ser muito versátil, também se destaca no fato de ter um custo baixo de fabricação, ou seja, seu custo de produção é relativamente bem menor do que os outros tipos de antenas, podendo ela trabalhar com banda larga alcançando um excelente desempenho de varredura, captação de frequência, irradiação e polarização das ondas eletromagnéticas no espaço. Como uma desvantagem na utilização das antenas de microfitas, podemos destacar a largura de banda que é considerada estreita, por isso, o ganho fica reduzido. No entanto, essa desvantagem pode ser considerada mínima, pois é possível contornar se utilizando de métodos e técnicas apropriadas na hora da simulação e da fabricação. É possível repensar alguns itens como: o plano terra e a linha de alimentação, ou mesmo, utilizando arranjos de antenas. O resultado final poderá ser bastante promissor.

Os primeiros trabalhos publicados a respeito das antenas de microfita datam de meados de 1953, com Deschamps nos Estados Unidos e depois na década de 1955, com Gutton e Baissinot na França. Entretanto, essas pesquisas sobre antenas planares somente ganharam força de fato na década de 1970. Desde então, as antenas de microfita foram desenvolvidas para diversas aplicações comerciais, industriais, médicas, civis e militares. Atualmente, essas antenas planares, fabricadas sobre substratos flexíveis, são bastante usadas como antenas vestíveis. O estudo das antenas de microfita não apenas contribui para o avanço de soluções tecnológicas mais eficazes, mas também capacita os profissionais a enfrentar desafios com criatividade e competência. Compreender suas características técnicas e práticas é essencial para explorar plenamente o potencial dessa tecnologia revolucionária.

3.1 Caracterização de uma antena de microfita

A estrutura dessas antenas é composta por três elementos principais: o patch condutor, o substrato dielétrico e o plano de terra. O patch é uma camada fina de material condutor, como cobre ou ouro, posicionada sobre o substrato. Este, por sua vez, é um material isolante que influencia diretamente as propriedades elétricas e magnéticas da antena. O plano de terra serve como uma referência elétrica, contribuindo para o controle da radiação emitida. Neste contexto, as antenas de microfita vêm surgindo como uma boa alternativa para suprir essa necessidade; nas palavras de BALLANIS (1982, p.5): “As antenas de microfita são de baixo perfil..., simples e baratas de fabricar usando a moderna tecnologia de circuito impresso”. A interação entre esses componentes resulta em um sistema compacto, eficiente e ajustável para operar em diferentes frequências do espectro eletromagnético.

Figura 7 – Estrutura de uma antena de microfita

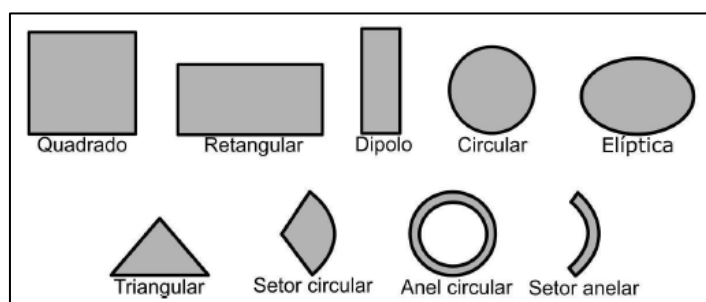


Fonte: Revista Principia. Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB, N° 21.

Normalmente existem dois modelos de alimentação de antenas de microfita, os tipos de alimentação de forma direta e de forma indireta. Os tipos de alimentação direta, tem como exemplo, a alimentação por linha de alimentação com cabo coaxial. Os tipos de alimentação de forma indireta, nada mais é do que as formas de alimentação por aproximação. A escolha do modelo de alimentação vai depender das exigências do projeto a ser executado.

O funcionamento das antenas de microfita baseia-se no princípio da ressonância. O patch condutor atua como uma cavidade ressonante, onde as ondas eletromagnéticas são geradas e irradiadas. O tamanho do patch é projetado com precisão para corresponder a uma fração do comprimento de onda da frequência de operação, garantindo elevada eficiência de radiação. O método de alimentação da antena, seja por linha de microfita, sonda coaxial ou acoplamento eletromagnético é fundamental para transferir energia ao patch de forma eficaz e confiável.

Figura 8 – Exemplos de formas geométricas básicas utilizadas na criação das antenas patch de Microfita.



Fonte: Autor, 2025.

A aplicação prática das antenas de microfita é diversa e significativa. Em dispositivos móveis, como smartphones e tablets, elas garantem conectividade eficiente e confiável. No setor de satélites, são indispensáveis para transmissão de dados e comunicação em órbita. Em redes sem fio, como Wi-Fi, Bluetooth e 5G, essas antenas desempenham um papel fundamental na manutenção de conexões rápidas e estáveis, tanto em ambientes domésticos quanto industriais. Elas também são amplamente utilizadas em radares e sensores, áreas cruciais para segurança, automação e exploração.

3.2 Parâmetros fundamentais de uma antena de microfita

Os parâmetros fundamentais (ressonantes e de irradiação) são utilizados para descrever o funcionamento das antenas. São parâmetros ressonantes: frequência de ressonância, largura de banda, coeficiente de onda estacionária, coeficiente de reflexão, perda de retorno, impedância de entrada, entre outros. São parâmetros de irradiação: diagrama de irradiação, densidade de potência irradiada, intensidade de irradiação, largura de feixe, diretividade, eficiência, ganho, relação frente/costas, polarização, densidade de corrente, entre outros. Muitos desses parâmetros são interrelacionados e nem todos precisam ser definidos para uma completa análise do funcionamento das antenas.

3.2.1 Diagrama de irradiação

O diagrama de irradiação pode ser definido como uma representação gráfica e matemática em função das coordenadas espaciais esféricas que mostra as propriedades de irradiação de uma antena no espaço, possibilitando a visualização das direções em que a antena irradia, BALLANIS (1982, p.28). As propriedades de irradiação de uma antena podem ser representadas na forma de um gráfico, e incluem alguns dados que podem ser obtidos a partir do diagrama de irradiação, que são: diretividade, ganho, intensidade de campo, intensidade de irradiação, largura de feixe, relação frente/costas.

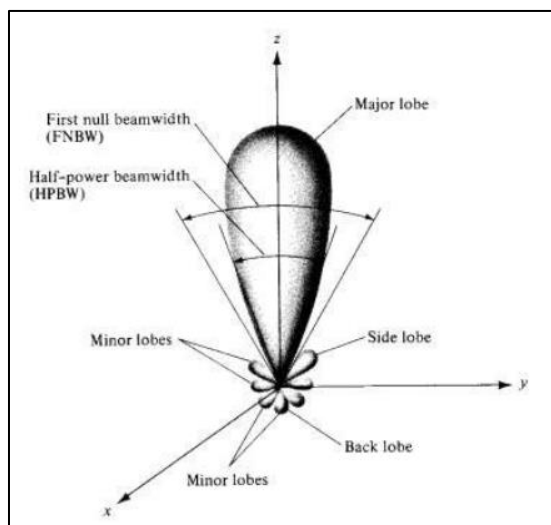
O padrão de radiação de uma antena, como também é chamado o diagrama de radiação, pode assumir diferentes formatos, por esse motivo, as antenas podem ser classificadas de acordo com esse parâmetro. Em outras palavras, o diagrama de irradiação é uma maneira de representar como a energia é irradiada para o espaço livre. O diagrama de irradiação de uma antena pode ser obtido através de simulações computacionais, por exemplo, utilizando o ANSYS Designer™, ou por medições em uma câmara anecóica.

3.2.2 Características do diagrama de irradiação: Lobos.

Dentro dos estudos dos diagramas de irradiação de uma antena de microfita, existem regiões e tópicos que valem a pena serem destacados como forma de aprofundamento de estudo. Os lobos, como são chamados, são porções do diagrama de radiação que classificam a intensidade da radiação em determinadas direções (BALLANIS, 1982). O lobo principal ou feixe principal é o feixe de irradiação que aponta na direção de máxima irradiação da antena. O lobo menor é qualquer lobo que não seja o principal, podendo esses serem classificados em lobos laterais ou posterior. Um lobo lateral é um lobo que está no mesmo hemisfério do lobo principal, já o lobo posterior, é o que

se posiciona no hemisfério oposto ao principal, normalmente caracterizam radiação transmitida (ou recebida) em direções indesejadas (BALLANIS, 1982).

Figura 9 - Lobos do diagrama de radiação



Fonte: BALLANIS, p. 31, 1982.

No diagrama de irradiação da figura acima, destacamos a largura de feixe de meia potência (na imagem, é apresentada como “Half-power beamwidth”), como sendo abertura angular definida pelos feixes nos quais a potência radiada é metade do valor da potência radiada na direção máxima (BALLANIS, 1982). Quanto menor for essa abertura angular, mais diretiva é a antena, ou seja, seu feixe principal de radiação é mais concentrado e estreito, permitindo que o sinal alcance maiores distâncias.

3.2.3 Ganho e Diretividade

Outro parâmetro extremamente importante para obter em um projeto de antena é o ganho diretivo, que pode ser definido basicamente como sendo um indicativo da capacidade de uma antena de irradiar em uma dada direção (STUTZMAN, 1981). Pela sua definição matemática, o ganho diretivo é uma grandeza adimensional. Ele é escrito como:

$$D(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{P_{med}} \quad (5)$$

Onde,

$P(\theta, \phi)$ a densidade de potência radiada em uma determinada direção;

P_{med} é a densidade de potência média.

O ganho, por ser um parâmetro de importância, ele é usado como um meio para se medir e descrever o desempenho de uma antena. Quando o ganho de uma antena é medido em relação a uma antena isotrópica, o valor do ganho é medido em (dBi); quando o ganho é medido

em relação à uma antena dipolo, o valor do ganho é medido em (dBd). Este parâmetro está relacionado a outros dois: a eficiência da antena e sua diretividade. Considerando-se uma linha de transmissão, bem casada com a antena, a perda de retorno será aproximadamente nula e a potência irradiada total da antena se aproxima da potência de entrada. Portanto, mesmo a direção do ganho não sendo especificada, o ganho pode ser calculado na direção de máxima irradiação.

De forma geral, o ganho medido em antenas patch de microfita se aproxima de uma faixa que fica em torno de 6,0 dBi na direção *broadside*. Para antenas do tipo monopolo impresso, o ganho é inferior ao de uma antena patch, com valor em torno de 3,0 dBi. Esta diferença de ganho entre os dois tipos de antenas, se dá através do fato de que a antena monopolo impresso irradia em duas direções, enquanto que, a antena patch apenas irradia em uma direção.

Em 1973, a diretividade de uma antena ficava definido como o ganho diretivo na direção de máxima irradiação, onde, portanto, hoje se conhece como uma medida de focalização do lobo principal do diagrama de irradiação. No entanto, nos tempos atuais, se é usado de uma forma mais comum essa ideia que ficou definida basicamente como o termo diretividade. Portanto, a diretividade de uma antena nos termos atuais é um parâmetro usado para medir a capacidade de irradiar em uma determinada direção. Se a direção não for especificada, fica subentendido que o termo diretividade estará fazendo referência à irradiação da antena na direção do lobo principal (BALLANIS, 1982).

Um diferencial interessante a se comentar, seria o caso da diretividade de uma antena isotrópica que é igual a 1, pois ela irradia igualmente em todas as direções possíveis. Portanto, percebe-se que neste caso, a diretividade e o ganho são relativamente iguais (BALLANIS, 1982). Ademais, BALLANIS (1982, p. 44) pontua em seu livro que para todas as outras antenas, a diretividade sempre será maior do que 1. Então, a partir desta ideia, somos levados a concluir então, que a diretividade de menor valor possível é o da fonte isotrópica.

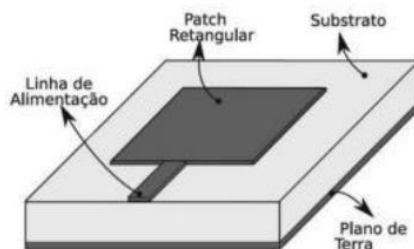
3.3 Linha de alimentação e Casamento de impedância

3.3.1 Linha de alimentação de uma antena de microfita

Normalmente existem dois modelos de alimentação de antenas de microfita, os tipos de alimentação de forma direta e de forma indireta. Os tipos de alimentação direta, tem como exemplo, a alimentação por linha de alimentação com cabo coaxial. Os tipos de alimentação de forma indireta, nada mais é do que as formas de alimentação por aproximação (OLIVEIRA *et al*, s.d, p.1). A escolha do modelo de alimentação vai depender das exigências do projeto executado.

Neste cenário, temos que a linha de alimentação é um meio com dois terminais que é capaz de guiar e transmitir energia de um ponto a outro, onde, um desses terminais será conectado ao transmissor de cargas e o outro terminal será conectado a antena patch de microfita, (SOARES; SILVA, 2003, p.11).

Figura 10 - Antena patch alimentada por linha de microfita.



Fonte: Doc player³.

A princípio, uma linha de alimentação perfeita não deveria ter perdas. Entretanto, na prática, as linhas de alimentação dissipam energia de três formas (SOARES; SILVA, 2003):

- Irradiação: a linha de alimentação se comporta como uma antena, irradiando para o espaço.
- Aquecimento: as perdas nesta modalidade estão associadas ao efeito joule, ou seja, dissipação de energia por calor, aumentando a temperatura do material.
- Reflexão: parte da irradiação pode ser refletida no final da linha de transmissão, caracterizando uma parcela de potência que não foi irradiada.

Normalmente, em projetos de antenas patch sempre se procuram se preocupar em amenizar essas eventuais perdas de resultados. A modalidade de perda que mais se dá atenção no caso das antenas é a por reflexão. As ondas que se propagam dentro da linha de transmissão, ao atingirem o fim da trajetória serão refletidas. Estas, ao interagirem com as ondas incidentes, formarão um padrão de ondas estacionárias ao longo da linha de alimentação de microfita (SOARES; SILVA, 2003).

3.3.2 Impedância de entrada e o casamento de impedância

A impedância de entrada é um conceito muito importante dentro de um projeto de antenas patch de microfita. Onde, ela é um dos parâmetros fundamentais para o desenvolvimento de um bom projeto para que o mesmo tenha um bom desempenho, pois esse parâmetro afeta diretamente na eficiência de funcionamento da antena. ESTEVES (1980, p. 63) destaca que este tipo de parâmetro como sendo a impedância que a antena apresenta à linha de transmissão ou à estrutura de acoplamento através da qual ela é alimentada. Ou seja, o conhecimento desta grandeza é de

fundamental importância pois está relacionada com a transferência de energia do transmissor para a antena ou da antena para o receptor (ESTEVES, 1980). Além disso, essa impedância depende de fatores como as dimensões da antena, o tipo de substrato utilizado, a frequência de operação e o método de alimentação empregado (BALANIS, 2016).

Outro termo bastante utilizado entre a comunidade acadêmica e os engenheiros de telecomunicações se trata do casamento de impedância, que estará diretamente associado ao quão eficiente é essa antena. O casamento de impedância por si só é considerado um aspecto fundamental para garantir a máxima transferência de energia e potência entre a linha de alimentação e a antena, reduzindo perdas por reflexão e aumentando a eficiência do sistema. Entretanto, qualquer alteração feita na linha de alimentação que cause um desajuste na impedância de entrada, poderá resultar em uma elevação das ondas estacionárias (ROE), ocasionando assim grandes perdas significativas e comprometendo assim o bom funcionamento e desempenho da antena (Balanis, 2016). Para alcançar esse ajuste, diversas técnicas são empregadas, tais como a implementação de transformadores em um quarto de onda, a modificação da largura da linha de alimentação e a inserção de elementos reativos, como *stubs* e *slots*, na estrutura da antena (POZAR, 2012).

3.3.3 Carta de Smith, VSWR e o Coeficiente de perda de retorno

Um outro dado parâmetro que é de muita importância e é extremamente fundamental para dizer o quanto o casamento de impedância foi bom, seria a carta de smith e o VSWR (no inglês *voltage standing wave ratio*), cujos parâmetros são responsáveis por mostrar o que de fato ocorre quando a potência de entrada está sendo refletida. Para o casamento de impedância ser considerado de fato o ideal, ou seja, perfeito, o coeficiente de onda estacionária deverá ter valor igual 1 ou algo muito próximo a isso, o que significa um casamento de impedância perfeito entre a linha de transmissão e a antena. O coeficiente de onda estacionária se relaciona com outro parâmetro, que é o coeficiente de reflexão, pela equação:

$$\Gamma = \frac{1+|S|}{1-|S|} \quad (6)$$

Onde:

Γ : é o coeficiente de onda estacionária;

S : é o coeficiente de reflexão.

O coeficiente de reflexão S se relaciona com a potência na terminação da linha de transmissão através de:

$$|S|^2 = \frac{P_{\text{ref}}}{P_{\text{inc}}} \quad (7)$$

Onde:

P_{ref} : é a potência refletida de volta para o transmissor;

P_{inc} : é a potência incidente.

Pode-se ainda definir o parâmetro de perda de retorno, pela equação:

$$RL = -20 \log_{10} |S_{11}| \quad (8)$$

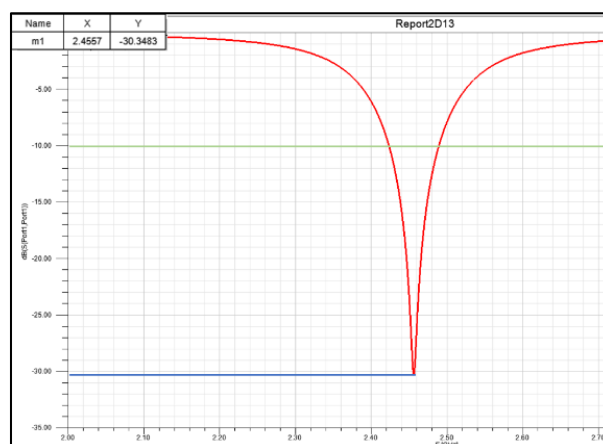
Onde:

[RL]: é dado em decibéis (dB).

Para uma antena projetada para operar numa banda de frequência pertencente à banda ISM (2.45GHz), o valor mínimo aceitado para o coeficiente de perda de retorno é 10dB. Ou seja, para estes dispositivos de baixa potência, aceita-se até no máximo 10% de potência sendo refletida.

Ter conhecimento sobre esses parâmetros em um projeto de antenas de microfita é de extrema importância. Pois, quando ocorrer de que existam reflexões na linha de transmissão, mais potência na onda incidente é necessária, o que pode levar a maiores voltagens na linha, podendo causar rupturas (SOARES; SILVA, 2003). Diante desse cenário, as reflexões também podem danificar os circuitos de potência do transmissor. Além disso, o projeto de casamento de impedância deve levar em consideração fatores como a permissividade dielétrica do substrato e a frequência de operação, a fim de garantir um desempenho otimizado (GARG et al., 2001). Portanto, em operações sobre ótimas condições, como já foi comentado, sempre busca-se um coeficiente de onda estacionária mais próxima de 1 quanto possível. Dessa forma, um adequado casamento de impedância não apenas melhora a eficiência do sistema, mas também assegura a estabilidade da antena em aplicações de comunicação sem fio. Veja abaixo exemplos de como seriam abordados os parâmetros em formas de gráficos em um projeto de antenas patch de microfita.

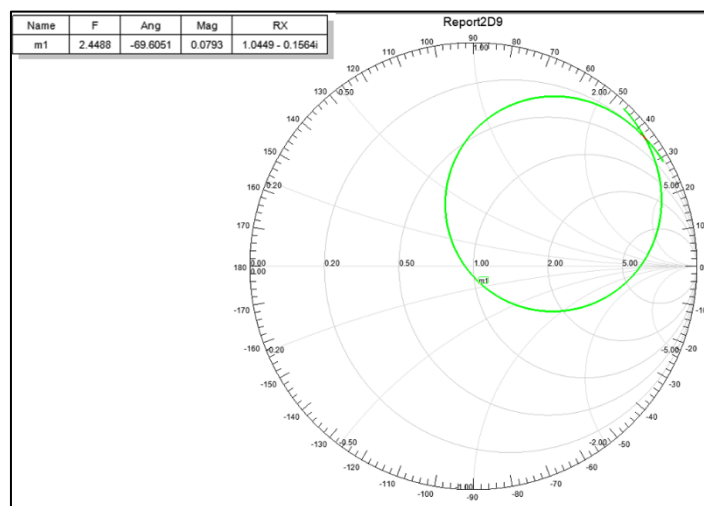
Figura 11 - Gráfico da curva do Coeficiente de Perda de Retorno;



Fonte: Autor, 2025.

Para este projeto introdutório usado como exemplo, foi obtido um determinado parâmetro de perda de retorno usando a Eq. 8, assim como está destacado na imagem pela linha vermelha, que foi de -30.3483 dB (note que o coeficiente de perda de retorno é o que chamamos de $|S_{11}|$). Para esta mesma antenna, pode-se conferir o gráfico do coeficiente de onda estacionária nas figuras 12 e 13.

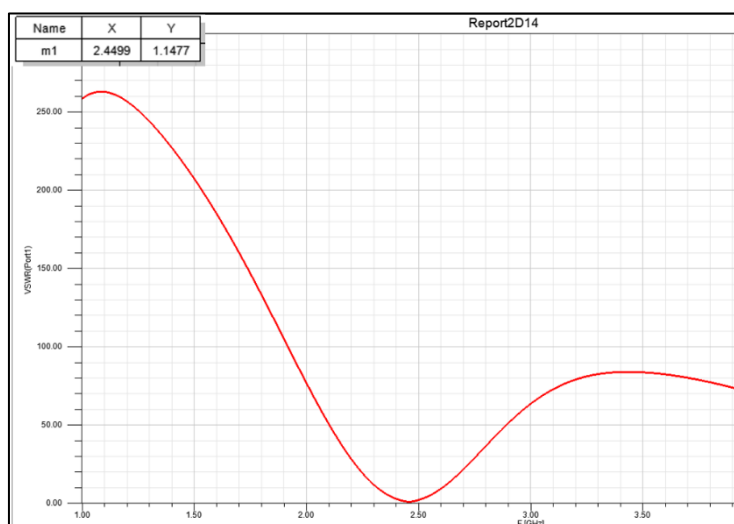
Figura 12 - Carta de Smith caracterizando o casamento de impedância;



Fonte: Autor, 2025.

Para a frequência de 2.44 GHz a antenna possui $|\Gamma| = 1.1477$, muito próximo do ideal. Este valor significa que 0.66% da potência incidente está sendo refletida e também caracteriza um casamento de impedâncias quase perfeito para esta frequência.

Figura 13 - Carta de Smith caracterizando o casamento e impedância

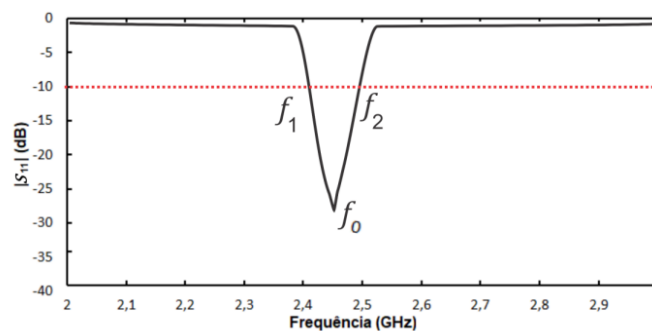


Fonte: Autor, 2025.

3.3.4 Largura de Banda

A largura de banda de uma antena patch de microfita é um outro parâmetro muito interessante que se é utilizado para descrever a eficiência de uma antena. A largura de banda pode ser dada em termos de sua frequência de ressonância central, F_c . Para definir a largura de banda, BW, adota-se como critério uma faixa de frequências com módulo do coeficiente de reflexão abaixo de -10 dB, que corresponde à diferença entre a frequência superior, F_2 , e a frequência inferior, F_1 , conforme o gráfico da Figura 14 abaixo.

Figura 14 - Caracterização da Largura de Banda (BW) de uma antena



Fonte: Augusto, 2019.

A largura de banda pode ser expressa em termos do valor absoluto, dado por:

$$BW = F_2 - F_1 \quad (9)$$

E em termos de porcentagem, teremos:

$$BW(\%) = \frac{F_2 - F_1}{F_c} \times 100 \quad (10)$$

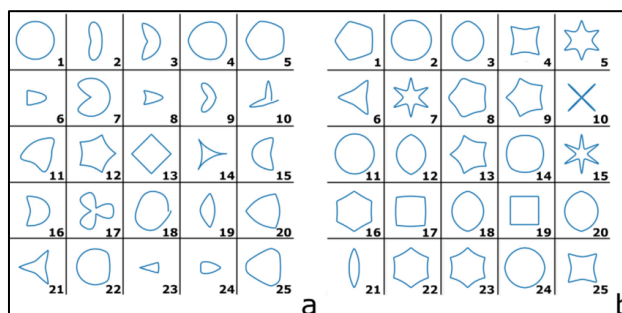
No capítulo à seguir será apresentado um estudo focado no uso da equação do Botânico, Arquiteto e Matemático Belga Johan Gielis. Onde será apresentado uma super equação capaz de gerar inúmeras geometrias que busquem “imitar formas reais” usando recursos computadorizados para a realização dos cálculos e o geramento das geometrias, além da aplicação do conceito da super equação na criação de projetos de antenas.

4 A SUPER EQUAÇÃO DE JOHAN GIELIS

A super equação, elaborada e proposta pelo engenheiro, matemático e botânico Belga Johan Gielis no início dos anos 2000, foi um marco muito importante no ramo das engenharias por

se tratar de uma expressão matemática que generaliza a representação de criação de curvas e superfícies que buscam imitar formas reais encontradas na Natureza (GIELIS, 2003). Sua equação polar permite descrever uma imensa variedade de formas, incluindo estrelas, folhas, conchas e padrões geométricos complexos.

Figura 15 - a e b Exemplos de possíveis formas geométricas que podem ser encontradas usando a super equação;



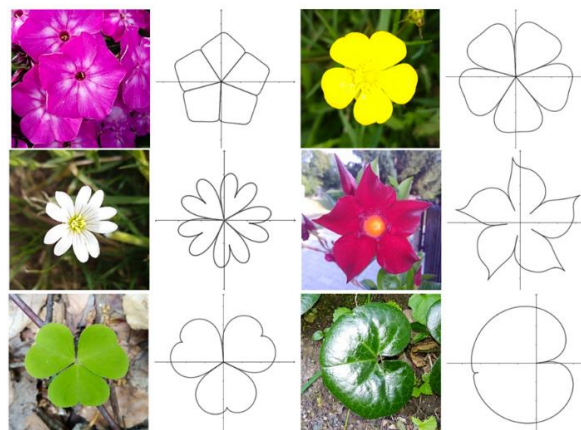
Fonte: Research Gate, 2013.

A partir da fórmula do círculo, Gielis ampliou os conceitos para criar um modelo matemático flexível e aplicável em diversas áreas do conhecimento (GIELIS, 2017). A expressão matemática da Super equação é definida por:

$$r(\theta) = \frac{1}{\left\{ \left[\left(\left| \frac{1}{d} \cos\left(\theta \frac{m}{4}\right) \right| \right)^{n2} + \left(\left| \frac{1}{k} \sin\left(\theta \frac{m}{4}\right) \right| \right)^{n3} \right]^{1/n1} \right\}} \quad (11)$$

Onde d, m, k, n1, n2 e n3 são parâmetros que podem ser usados para controlar a simetria, a curvatura e o nível de complexidade da forma gerada. Esses parâmetros são importantes pois permitem criar diversos tipos de geometrias, desde as mais simples até figuras geométricas mais complexas, tendo a possibilidade de modelar tais geometrias de acordo com a ideia de planejamento, permitindo a modelagem até mesmo de padrões encontrados na natureza, chamados de padrões orgânicos, padrões esses demonstrados já na Figura 9. Tal versatilidade tornou-a uma ferramenta extremamente importante e valiosa em diversos tipos de áreas, como por exemplo, na biologia, arquitetura, computação gráfica e design. Na biologia, a equação auxilia na descrição de formas naturais, como flores e folhas, permitindo uma compreensão matemática de padrões biológicos (GIELIS, 2017).

Figura 16 - Exemplo de formas geométricas bio-inspiradas na natureza;



Fonte: Site Research Outreach, 2021.

Além das diversas aplicações já citadas, estudos mais recentes indicam a possibilidade de que a super equação de Gielis pode ser usada para descrever inúmeros padrões em sistemas complexos encontrados na natureza, além de que, pode ser usada para descrever padrões emergentes, como as redes neurais artificiais e modelagem de crescimento celular, que também é uma possibilidade. A possibilidade de parametrizar variações de forma a partir de um modelo matemático unificado tem implicações significativas na bioengenharia e em algoritmos de aprendizado de máquina (GIELIS, 2017).

A super equação de Gielis, também tem se destacado em pesquisas avançadas em nanotecnologia e também em diversos setores da física teórica. Na nanotecnologia, tal equação pode ser utilizada para projetar materiais com propriedades geométricas específicas, possibilitando assim o desenvolvimento de novas superfícies funcionais e estruturas avançadas com características únicas de aderência e resistência (PEITGEN; JÜRGENS; SAUPE, 2004). Já na física teórica e na astronomia, sua flexibilidade permite modelar formações cósmicas, órbitas planetárias e a distribuição de matéria no universo, fornecendo novas abordagens para descrever fenômenos astrofísicos ainda pouco compreendidos (GIELIS, 2017).

O estudo aprofundado da super equação de Johan Gielis nos mostra como a matemática pode ser interessante e como ela está relacionada a modelagem de formas na natureza, de forma que, tal equação nos fornece uma ferramenta poderosa para aplicações em diversas áreas de conhecimentos, seja, na Física aplicada, na Biologia e na própria matemática. Sua capacidade de capturar e desenhar as linhas complexas dos padrões das formas da natureza vai muito além do que se imagina, o que o torna essa equação algo magnífico de se presenciar, através dela é possível evidenciar a elegância da matemática na descrição da natureza e do mundo ao nosso redor.

Dessa forma, a super equação, continua a inspirar suas aplicações em diversas novas pesquisas e aplicações em projetos, unindo assim com precisão a beleza da ciência física com a

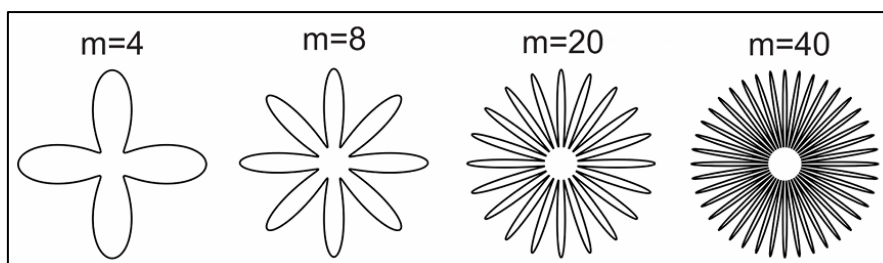
magnificência da matemática presentes na natureza. E com a evolução dos meios da computação e das técnicas de simulações virtuais, espera-se que seu uso se expanda-se em aplicações de projetos, consolidando seu papel como um modelo fundamental para a representação de formas naturais e artificiais.

5 ELEMENTOS GEOMETRICOS POLARES

O contexto das geometrias polares é uma abordagem matemática muito importante em projetos, pois ela é utilizada para representar figuras e curvas no plano por meio de coordenadas radiais e angulares, ao invés do tradicional sistema cartesiano. Nesse novo tipo de sistema, cada ponto é descrito através de pares, onde indica a distância em relação à origem e define o ângulo em relação a um eixo de referência θ e ρ . Essa formulação simplifica a modelagem de elementos geométricos como círculos, espirais, rosáceas e outras curvas com simetria polar, sendo amplamente empregada na descrição de padrões naturais e fenômenos físicos (STEWART, 2013). A super equação de Johan Gielis expande as possibilidades de modelagem dessas figuras, permitindo a criação de formas geométricas complexas por meio da equação 11, já citada anteriormente.

Entre os principais elementos das geometrias polares, como já citados, os mais comuns em serem descritos pela super equação então as geometrias em formas e flores. Esse tipo de padrão é formado por múltiplos lóbulos distribuídos usando o parâmetro m para distribuir ao redor da origem da geometria. Ajustando esse parâmetro m , é possível gerar desde simples pétalas ou até mesmo formas mais bem elaboradas com muitas pétalas.

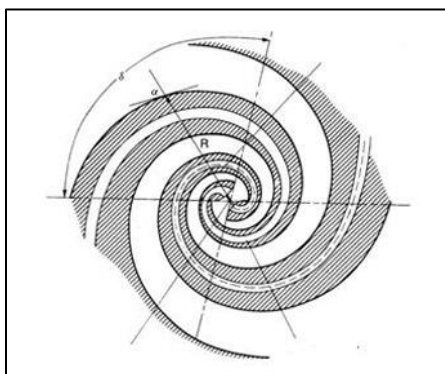
Figura 17 - Exemplo de geométricas geradas com pétalas;



Fonte: Autor, 2025.

Outra aplicação relevante está na modelagem de espirais, essenciais para a compreensão de fenômenos naturais, como a estrutura das galáxias, padrões de crescimento de plantas e formações de conchas marinhas (ADLER, 2005).

Figura 18- Forma geométrica de uma geometria em espiral;



Fonte: MILLIGAN, 2005.

Diante dos fatos apresentados, os elementos geométricos polares, quando são descritos e elaborados com o auxílio da super equação de Gielis, oferecem uma ampla abordagem única e unificada para a compreensão e criação dos mais diversos tipos de formas complexas. Tal equação versátil não apenas faz com que ocorra um aprofundamento os estudos no âmbito da geometria matemática, mas também nos proporciona uma vasta e ampla gama de aplicações práticas, tornando-se uma incrível ferramenta que é essencial para diversas áreas na matemática, na física e nas engenharias.

6. ANTENAS DE PATCH DE MICROFITA COM ELEMENTOS GEOMETRICOS POLARES

Nesta seção, iremos abordar alguns conceitos referentes a utilização da super equação de Johan Gielis que foi descrita anterior mente como a equação 11. A princípio iremos focar em sua aplicação na geração das geométricas dos elementos irradiantes das antenas patch deste presente trabalho.

6.1. Tipos de elementos geométricos polares irradiantes abordados

Os elementos geométricos polares das antenas abordados neste presente trabalho são eles definidos pela equação 11 já citada anteriormente (Super equação de Johan Gielis), foram assim desenvolvidas com auxilio tecnológico e computadorizado, a partir de ferramentas de CAD (Computer-Aided Design) como o Corel Draw e também a partir da implementação de algoritmos usando um software chamado MATLAB®. Tais elementos geométricos encontrados com o auxílio desse software são convertidos em arquivos com formato DXF (Drawing Exchange Format)

através de uma biblioteca apropriada. Esta conversão possibilita a importação deste arquivo no ambiente do Ansoft Designer®, software de análise de onda completa utilizado para a análise eletromagnética das antenas desenvolvidas neste projeto do presente trabalho.

6.1.1. Elemento geométrico circular

O elemento geométrico circular, é uma das formas primarias da geometria, de forma que, ela serve como base para a construção de diversas outras estruturas e composições. simetria perfeita e continuidade fazem dele um ponto de partida essencial em áreas como arquitetura, design e engenharia, permitindo a criação de padrões complexos e formas derivadas, como esferas, cilindros, arcos e estrelas com diversas pontas. Por possuir uma natureza deveras de interessante e equilibrada, existe a possibilidade do uso do círculo em diversos tipos de projetos, onde tal geometria se destaca como uma das formas mais versáteis da geometria.

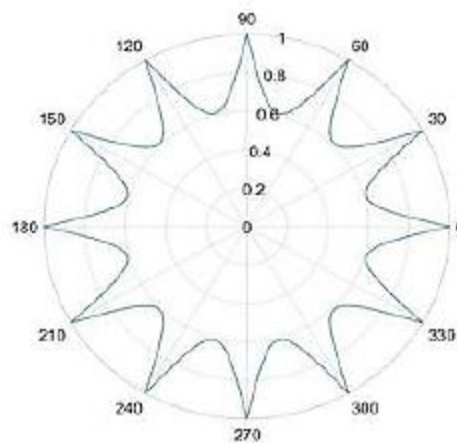
Em projetos de antenas Patch de microfita, tais parâmetros de um patch circular já são pré definidos, e são projetadas a partir de um patch circular convencional. A geometria em questão pode ser encontrada tanto pela equação 11 como também já poderia ser obtida diretamente no Ansoft Designer, pois o software já dispõe desta geometria como ferramenta de projeto.

Neste presente trabalho, usaremos como base a equação 11 e a geometria circular faremos a implementação do MATLAB® como base para a obtenção de novas geometrias que serão modificadas de acordo com as necessidades e requisitos de analises de parâmetros que já foram citadas anteriormente no capítulo 3 deste trabalho.

6.1.2. Antena 1 com geometria polar

O primeiro tipo de elemento patch que encontramos para a realização da analise de parâmetros no Ansoft Designer, se deu através do uso do MATLAB® e da equação 11, onde, adotamos os seguintes valores para cada grandeza de parâmetros da super equação de Gielis: $n_1 = 0.7$; $n_2 = 1$; $n_3 = 1$; $m = 8$; $d = 1$; $k = 1$. Onde o parâmetro de grandeza m representa o número de pontas em que serão inseridas no patch da antena.

Figura 19 - Forma geométrica encontrada no MATLAB®

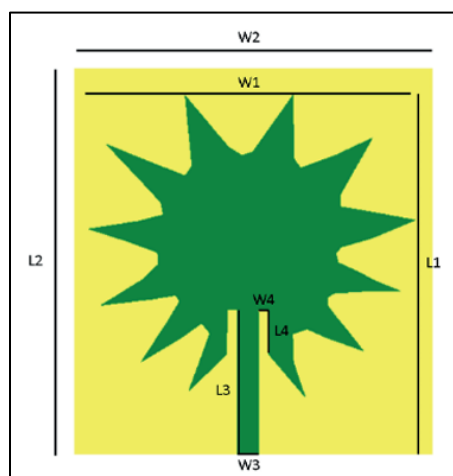


Fonte: Autor, 2025.

Os procedimentos para a simulação da criação da antena de microfita, é necessário que seja feitas escolhas de calibração no programa Ansoft Designer que são específicas para cada tipo de antena. Nesse projeto usamos a calibração do tipo: (MS-FR4[Er=4.4] 0.030 inch, 0.5 oz Copper), tendo como principal objeto de condutividade o cobre. O FR4 [Er= 4.4] é um tipo do material dielétrico isolante de fibras de vidro, muito utilizado em projetos de antenas, por se tratar de um material de baixo custo e de fácil acesso de mercado. A espessura de foi 0,030 polegadas, com uma camada fina de 0.5 Oz (141,7 Gramas) de cobre no meio das placas dielétricas.

Feita a calibração do programa, ficamos aptos para começar as tentativas de simulação no Ansoft Designer. Obviamente, inserimos a geometria encontrada anteriormente com o auxílio do software do MATLAB® e do COREL DRAW, onde a partir deste fato, foi possível obter a seguinte antena, onde batizaremos ela de Antena 1.

Figura 20 - Antena 1 Simulada usando patch de geometria Polar



Fonte: Autor, 2025.

As linhas destacadas em Preto na Figura 20 correspondem as respectivas medidas da antena 1, cujas medidas podem ser conferidas na Tabela 1.

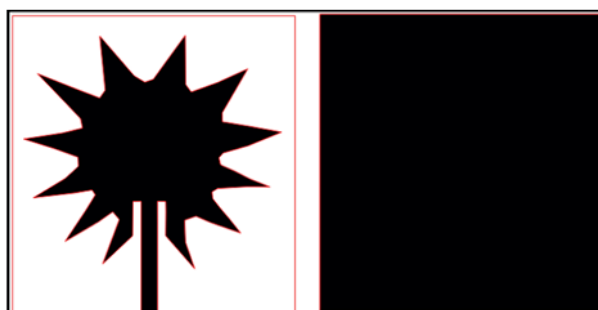
Tabela 1 - Dimensões da Antena 1

Dimensões da Antena 1	
W1 (Largura)	116 mm
W2 (Largura)	127 mm
W3 (Largura)	51.3 mm
W4 (Largura)	3.75 mm
L1 (Comprimento)	127 mm
L2 (Comprimento)	137 mm
L3 (Comprimento)	51.3 mm
L4 (Comprimento)	15.8 mm

Fonte: Autor, 2025.

O processo de construção de uma antena de microfita é relativamente simples e que pode ser feita de maneira artesanal. Onde tal processo consiste em basicamente em um adesivo feito com o COREL DRAW (veja a Figura 15) que é impresso e colado ao uma placa de cobre, cujos lados são cobreados e a parte interna é de fibra de vidro (FR-4), o que corresponde ao substrato dielétrico. O adesivo corresponde a frente e o verso da antena.

Figura 21 - Adesivo da Antena 1 simulada



Fonte: Autor, 2025.

Após feito o procedimento de colagem do adesivo na placa de cobre, o protótipo é mergulhado em uma solução de água com Percloroeto de Ferro diluído que é uma espécie de ácido

utilizado para correr metais como o cobre por exemplo, assim como mostra a Figura 20. A ideia por trás desse procedimento é que o ácido irar corroer toda a superfície do nosso protótipo de cobre, com exceção da região em que o adesivo está colado. O processo em questão da corrosão do protótipo dura em média de 10 a 20 minutos, aproximadamente.

Figura 22 - Momentos do processo de adesivação e da corrosão



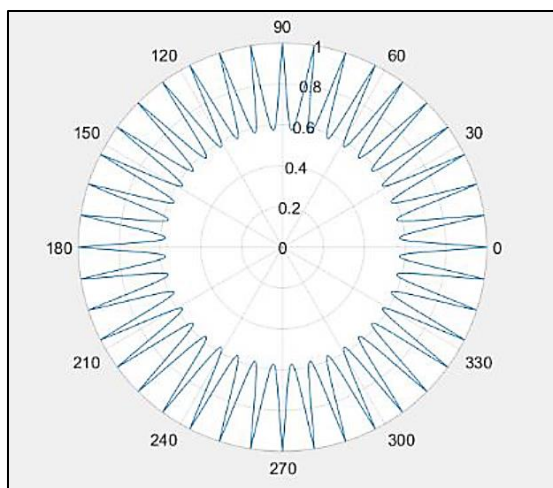
Fonte: Autor, 2025.

6.1.3. Antena 2 com geometria polar

Um segundo projeto de antenas também foi pautado, onde temos que sua geometria também está pautada para o uso das geometrias dos elementos geométricos polares utilizando a super equação de Gielis (Equação 11). A nova antena em questão batizaremos de Antena 2. Onde sua geometria é similar a primeira antena, porem esta antena 2 possui alguns diferenciais em relação a primeira antena.

Nesta nova antena, foram abordados os seguintes valores para aplicações nos parâmetros de grandezas na equação 11, que forma: $n_1 = 0.5$; $n_2 = 1,2$; $n_3 = 1,2$; $m = 40$; $d=1$; $k=1$. E como já citado anteriormente, o m implica no total de pontas que a geometria terá. Veja a figura abaixo encontrada usando esses valores e com o auxílio do MATLAB®.

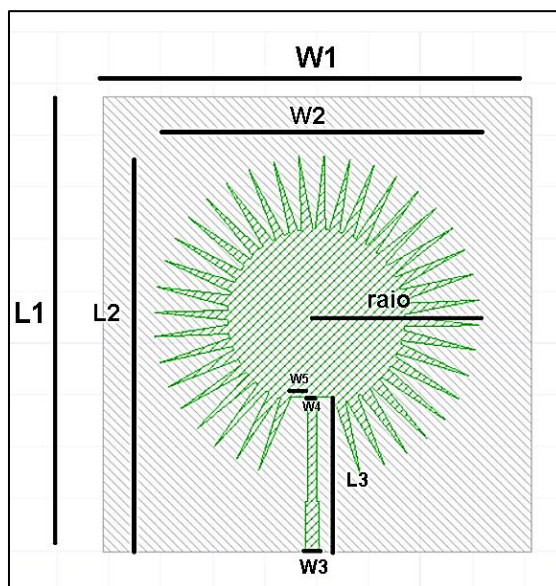
Figura 23 - Forma geométrica 2 encontrada no MATLAB®



Fonte: Autor, 2025.

Feita a calibração do programa, ficamos aptos para começar as tentativas de simulação no Ansoft Designer. Obviamente, inserimos a geometria encontrada anteriormente com o auxílio do software do MATLAB® e do COREL DRAW, onde a partir deste fato, foi possível obter a seguinte antena. Veja a figura 23.

Figura 24 - Antena 2 Simulada usando patch de geometria Polar



Fonte: Autor, 2025.

As linhas destacadas em Preto na Figura 23 correspondem as respectivas medidas da antena 2, cujas medidas podem ser conferidas na Tabela 2.

Tabela 2 - Dimensões da Antena 2

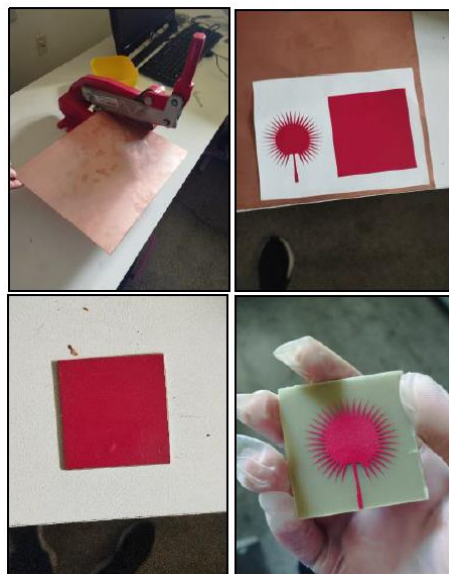
Dimensões da Antena 2	
W1 (Largura)	47.8 mm

W2 (Largura)	35.2 mm
W3 (Largura)	1.49 mm
W4 (Largura)	1.01 mm
W5 (Largura)	1.74 mm
L1 (Comprimento)	49.3 mm
L2 (Comprimento)	43.1 mm
L3 (Comprimento)	16.9 mm

Fonte: Autor, 2025.

Após a etapa de simulação, passamos para a etapa de fabricação da antena operante. Ver figura 20.

Figura 25 - Momentos do processo de adesivação e corrosão



Fonte: Autor, 2025.

6.1.4. Outros Modelos de Antenas com Geometria Polar

Um terceiro projeto de 3 antenas de microfita foi pautado fazendo uso das geometrias dos elementos geométricos polares, fazendo uso das atribuições de geometrias obtidas através da super equação de Gielis. Através disso, adotaremos essas como Antena 3, antena 4 e a antena 5, onde todas essas três antenas desse terceiro projeto tiveram como foco principal o trabalho no

desenvolvimento do DGS que consiste basicamente em uma “falha” desenhada no plano terra da antena.

6.1.4.1. Aplicações da Falha DGS no Plano Terra

O método DGS (Defected Ground Structure) consiste em uma ideia bastante arriscada e inovadora que busca introduzir de uma forma proposital algumas irregularidades ou “defeitos” em formas de geometrias no plano terra através dos circuitos de micro-ondas, com o objetivo de modificar o funcionamento das propriedades eletromagnéticas de tal estrutura.

Neste contexto de aplicações desses métodos em antenas de microfita, tal uso dessas técnicas DGS tem se mostrado bastante promissoras e eficazes tanto para a miniaturização de novos dispositivos sem comprometer a performance além de proporcionar um bom aumento da largura de banda. Diante desses fatos, Silva (2015) destaca que esse método contribui para uma ótima adaptação no casamento de impedância e contribui constantemente para uma ótima melhoria em diversos parâmetros em projetos de antenas e na ampliação do desempenho.

Além da miniaturização, essa técnica conhecida como DGS também é capaz de fornecer uma melhoria considerável nos parâmetros da eficiência da irradiação da antena e a diminuição dos acoplamentos eletromagnéticos entre os elementos dos circuitos da antena. Estudos recentes apontam que a modificação do plano de terra reduz perdas parasitárias e minimiza interferências, garantindo a integridade do sinal em aplicações críticas (OLIVEIRA et al., 2014). Dessa forma, a utilização da técnica do DGS é capaz de promover uma ótima otimização de diversos parâmetros em um projeto de uma antena de microfita, que resulta em dispositivos mais robustos.

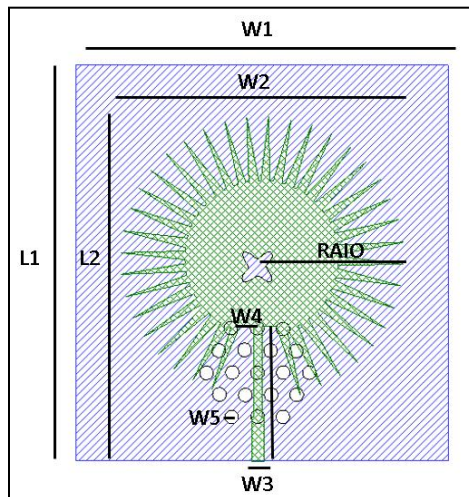
Em síntese, a aplicação DGS em antenas de microfita representam um grande marco inovador que amplia os resultados nos projetos, tal ferramenta consolida uma grande melhoria que contribuem na miniaturização, aprimoramento das características fundamentais da antena, assim como também, melhora a adaptação de impedância de entrada, aumenta consideravelmente a largura de banda e a eficiência de irradiação da antena. Essa abordagem tem impulsionado avanços tecnológicos em áreas como comunicações sem fio, sistemas de radar e Internet das Coisas (IoT), consolidando o DGS como uma ferramenta valiosa no desenvolvimento de dispositivos modernos e de alto desempenho.

6.1.5. Antenas 3, 4 e 5 com geometria polar e com aplicações das falhas DGS no plano terra

- Antena 3:

A antena 3 mostrada na figura 25, foi feita com base na antena já obtida anteriormente como mostra assim a figura 23. Podem com um pequeno diferencial, que foi a aplicação de pequenos defeitos DGS em formas de pequenos círculos no seu plano terra.

Figura 26 - Antena 3 Simulada usando patch de geometria Polar com aplicação do DGS



Fonte: Autor, 2025.

As linhas destacadas em Preto na Figura 21 correspondem as respectivas medidas da antena 3, cujas medidas podem ser conferidas na Tabela 3.

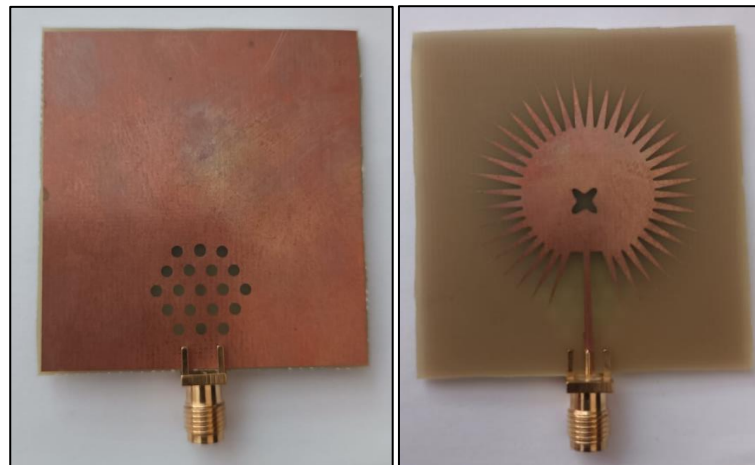
Tabela 3 - Dimensões da Antena 3

Dimensões da Antena 3	
W1 (Largura)	47.8 mm
W2 (Largura)	35.2 mm
W3 (Largura)	1.49 mm
W4 (Largura)	1.01 mm
W5 (Largura)	0.82 mm
L1 (Comprimento)	49.3 mm
L2 (Comprimento)	43.1 mm
L3 (Comprimento)	16,9 mm

Fonte: Autor, 2025.

Após a etapa de simulação, passamos para a etapa de fabricação da antena operante. Ver figura 26.

Figura 27 - Antena 3 (frente e verso) após a corrosão

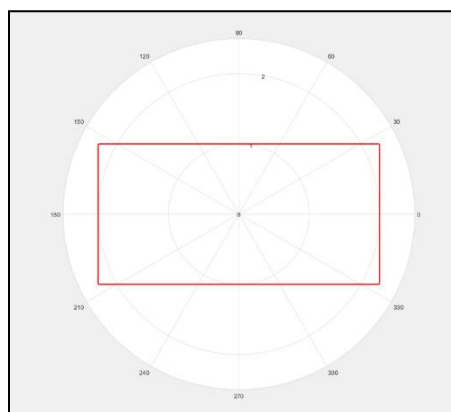


Fonte: Autor, 2025.

- Antena 4:

E além disso, também tivemos uma outra geometria encontrada no MatLab, que foi, A antena 4 mostrada na figura 27, nos mostra um novo tipo de modelo de antenas, sendo ela formada com barras retangulares. Onde também tivemos a aplicação do DGS no plano terra, onde esse formato de DGS se consolidou através de vários testes até chegar no seguinte modelo em forma de um quadrado com uma espécie de um desenho de um circuito no centro, e além disso, ela possui duas linhas de alimentação iguais.

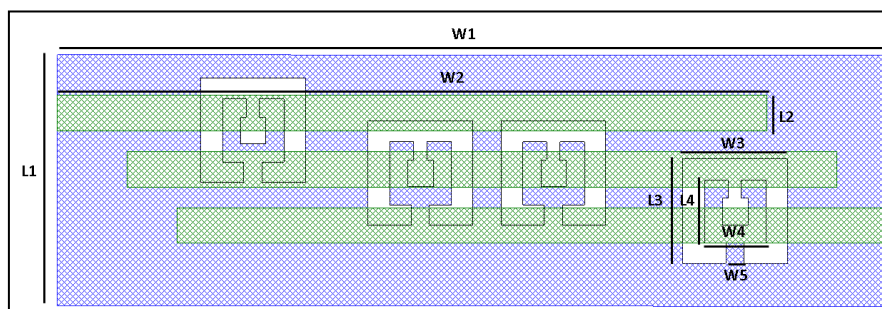
Figura 28 - Forma geométrica 3 encontrada no MATLAB®



Fonte: Autor, 2025.

Onde, os valores adotados para chegar em tal geometria foram: $m = 4$, $n_1 = 0.01$, $n_2 = 0.01$, $n_3 = 0.01$, $d = 1$, $k = 1$;

Figura 29 - Antena 4 Simulada usando patch de geometria Polar com aplicação do DGS



Fonte: Autor, 2025.

As linhas destacadas em Preto na Figura 28 correspondem as respectivas medidas da antena 4, cujas medidas podem ser conferidas na Tabela 4.

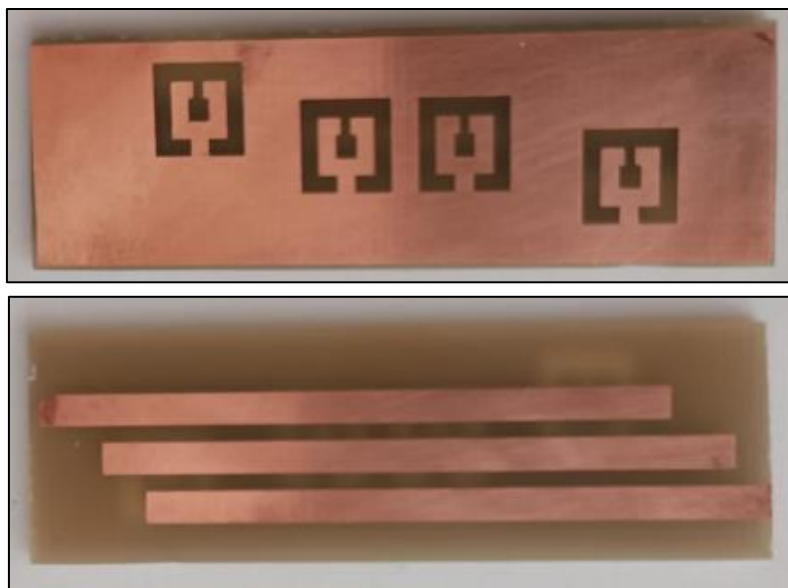
Tabela 4 - Dimensões da Antena 4

Dimensões da Antena 4	
W1 (Largura)	46.8 mm
W2 (Largura)	40 mm
W3 (Largura)	5.90 mm
W4 (Largura)	3.47 mm
W5 (Largura)	1.02 mm
L1 (Comprimento)	14.20 mm
L2 (Comprimento)	2 mm
L3 (Comprimento)	5.90 mm
L4 (Comprimento)	3.55 mm

Fonte: Autor, 2025.

Após a etapa de simulação, passamos para a etapa de fabricação da antena operante. Ver figura 29.

Figura 30 - Antena 4 (frente e verso) após a corrosão

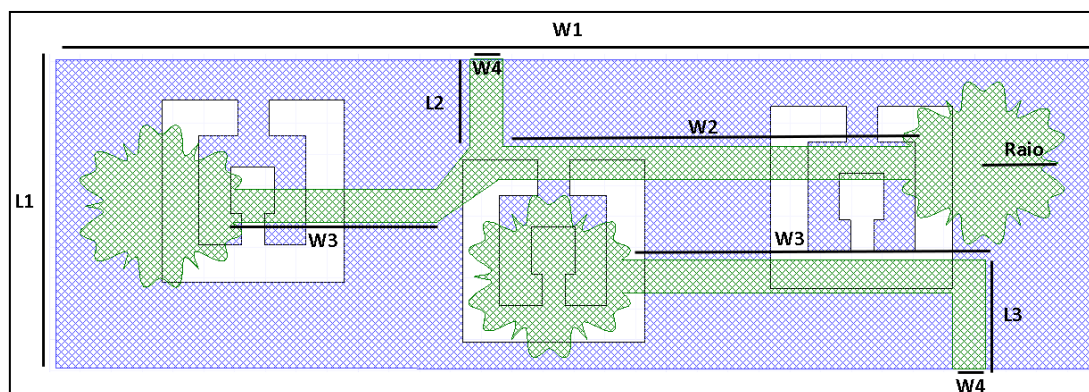


Fonte: Autor, 2025.

- Antena 5:

A antena mostrada na figura 30, nos mostra um modelo bastante interessante, sendo um novo modelo para esse projeto, e assim com a antena 4, essa antena 5 também possui duas linhas de alimentação. Para a sua construção, foi inspirada com base nos modelos das quatro antenas anteriores, de forma que em comparação a elas, essa ficou ainda menor. A geometria dessa antena, se consolidou como uma pequena variação da geometria das antenas 1, 2 e 3, de forma que, foram feitas pequenas alterações no seu formato no próprio Ansoft Designer. Após determinar tal modelo, tivemos a aplicação do DGS no plano terra, onde esse formato de DGS em forma de quadrado em forma de um quadrado com uma espécie de um desenho de um circuito no centro, é o mesmo modelo da antena 4, mostrada nas figuras da antena 4 (figuras 28 e 29). Veja agora a antena 5, mostrada na Fig. 30.

Figura 31 - Antena 5 Simulada usando patch de geometria Polar com aplicação do DGS



Fonte: Autor, 2025.

As linhas destacadas em Preto na Figura 26 correspondem as respectivas medidas da antena 5, cujas medidas podem ser conferidas na Tabela 5.

Tabela 5 - Dimensões da Antena 5

Dimensões da Antena 5	
W1 (Largura)	33.60 mm
W2 (Largura)	13.20 mm
W3 (Largura)	6.58 mm
W4 (Largura)	1.07 mm
W5 (Largura)	11.80 mm
Raio	2.49 mm
L1 (Comprimento)	10 mm
L2 (Comprimento)	2.82 mm
L3 (Comprimento)	3.52 mm

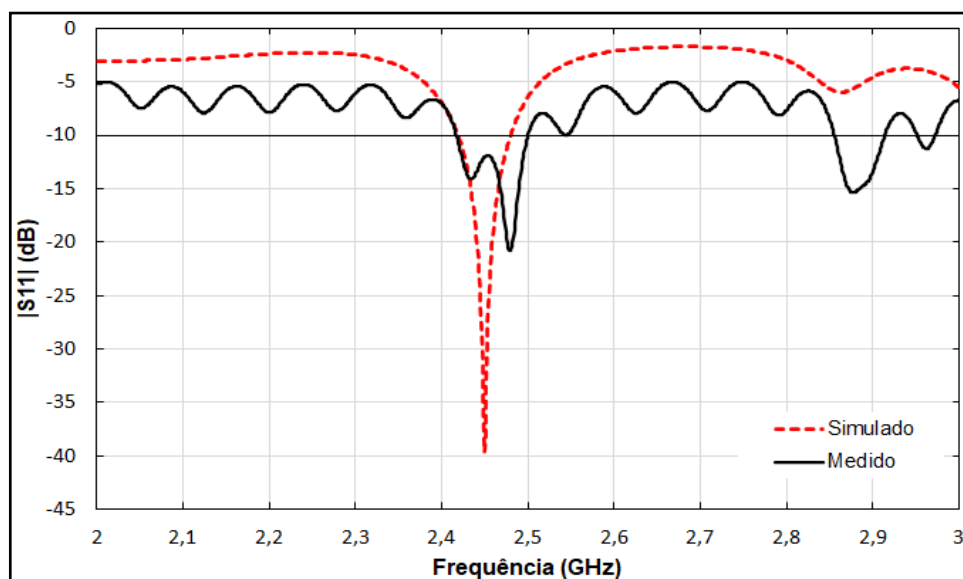
Fonte: Autor, 2025.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. Antena 1:

O primeiro resultado experimental das antenas obtidas nesse trabalho de dispositivos experimentais propostos, consiste na perda de retorno dado em função do seu coeficiente de reflexão (parâmetro S_{11}). Que consiste em medir a relação entre as potências incidentes e refletidas no conector de cargas da antena. E matematicamente falando, podemos representar ela através da equação 8, já mostrada anteriormente. Veja o resultado experimental mostrado na figura 31.

Figura 32 - Gráfico da Perda de Retorno da antena 1 medida e simulada;

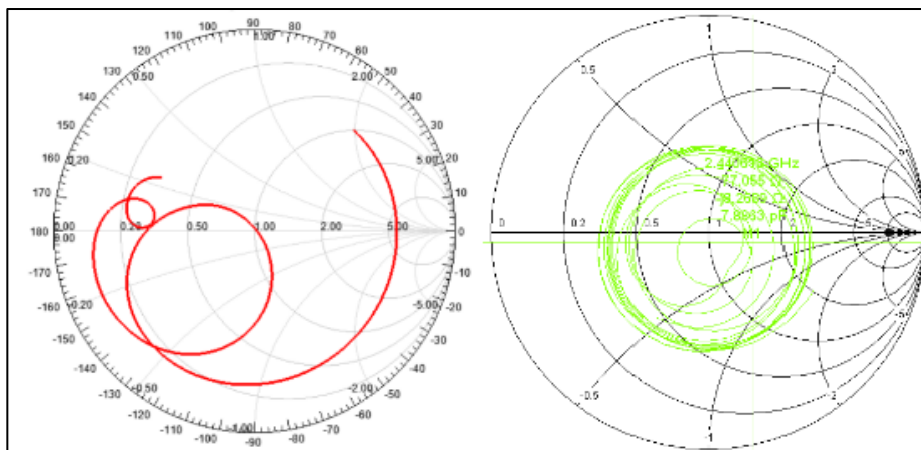


Fonte: Autor, 2025.

Os resultados obtidos a partir da fig. 27 mostra uma boa comparação entre os resultados numéricos obtidos na simulação com o resultado medido no analisador de rede vetorial. Desse resultado podemos ver que em teoria, a semelhança entre os resultados medidos deveria ser de 100%, porém, na realidade sempre temos diferenças. Constatamos diferenças em decibéis (dB), caindo de -40dB para aproximadamente -22dB. Enquanto que, a frequência de radiação caiu de 2.45 GHz (frequência simulada) para uma frequência de 2.48 GHz (frequência experimental). Esse resultado foi interessante porque ainda está dentro do esperado. Pois, ocorreu um aumento na frequência de radiação de 2,45GHz para 2,48GHz. Temos uma antena que funciona em 2,48 GHz.

Entre muitos outros parâmetros que podemos citar, a carta de Smith é considerada uma ferramenta muito importante, no âmbito de captar e mostrar o melhor resultado possível em relação ao casamento de impedância, pois enquanto mais próximo do 1 estiver, melhor vai ser o desempenho da antena num todo. Veja abaixo, o coeficiente de reflexão da antena 1, mostrado na figura 32.

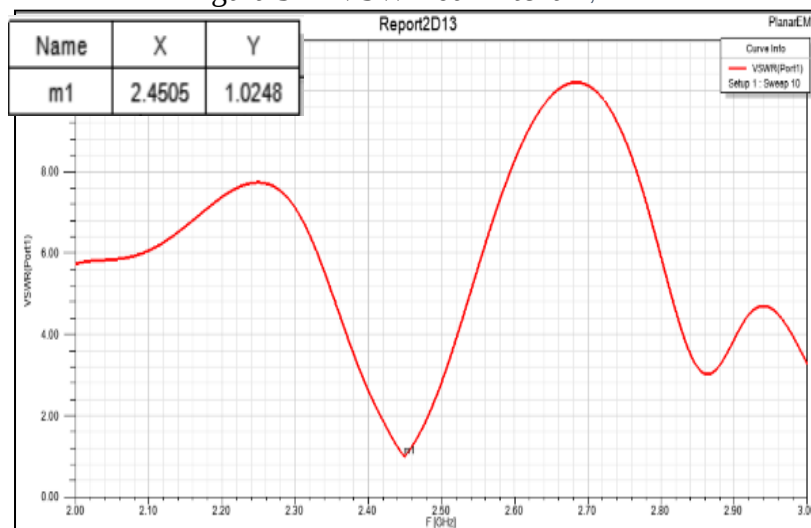
Figura 33 - Carta de Smith da Antena 1;



Fonte: Autor, 2025.

Percebemos que houve uma pequena diferença entre a carta de Smith simulada e experimental. A simulada apresentou resultado melhor com medição próxima de 1 enquanto que o resultado experimental foi de 0.89. Desse fato, podemos imaginar que foi por isso do porquê de nossa antena ter perdido desempenho. O gráfico VSWR mostrado na fig. 29, é uma outra forma de ver o resultado obtido na carta de Smith.

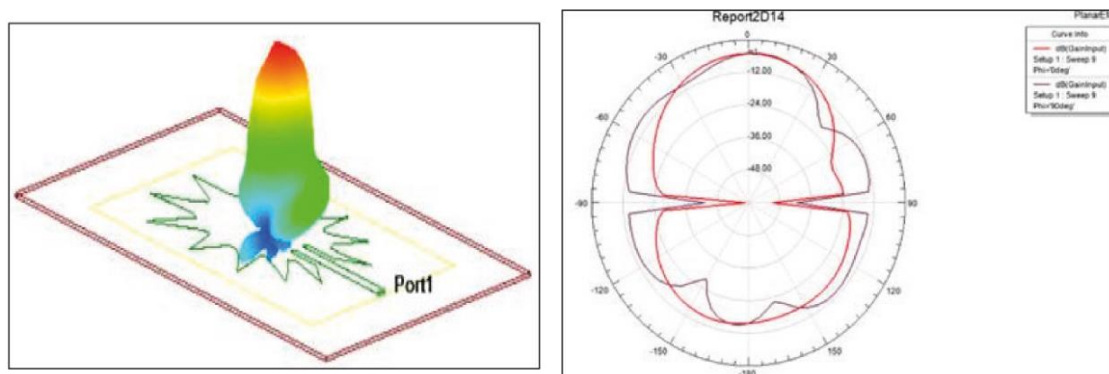
Figura 34 - VSWR da Antena 1;



Fonte: Autor, 2025.

Na figura 34, temos o parâmetro de irradiação em 2D (duas dimensões) e em 3D (três dimensões). Onde podemos observar o comportamento da antena 1 irradiando para os dois lados. O gráfico em 2D, mostrará os feixes potência da antena nas duas direções. O gráfico em 3D mostra um ganho direto de 7.33 dB de irradiação em ambas direções.

Figura 35 - Parâmetros de irradiação da antenna 1;



Fonte: Autor, 2025.

A tabela 6 mostra as medições dos resultados dos parâmetros da antenna 1. Veja abaixo:

Tabela 6 - Medições dos parâmetros da antenna 1;

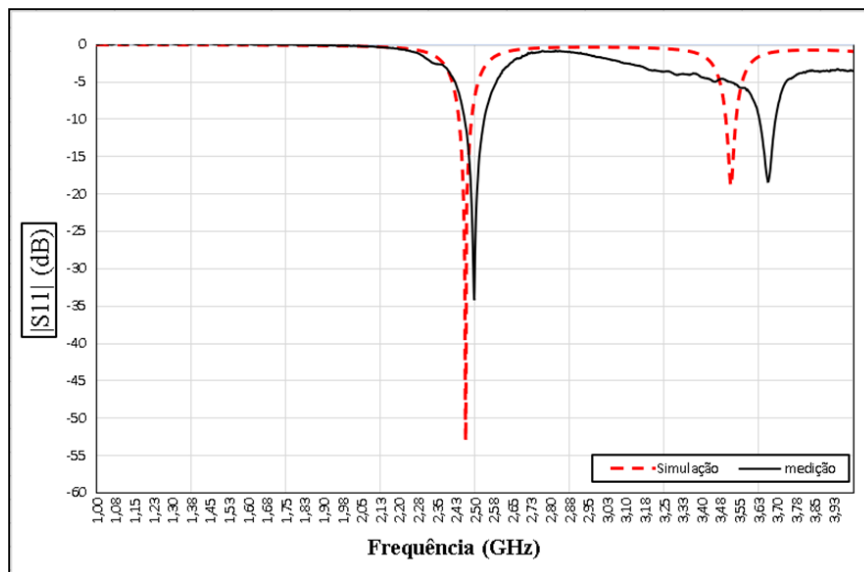
RESULTADOS	SIMULADOS	MEDIDOS
Frequência (GHz)	2.45 GHz	2.48 GHz
Perda de Retorno (RL)	- 40.00 dB	-22.00 dB
Largura de Banda (BW)	60 MHz	100 MHz
Carta de Smith	1.02	0.89
Ganho	7.33 dB	-----

Fonte: Autor, 2025.

6.2. Antena 2:

Na perda de retorno da antenna 2, constatamos uma pequena perda de resultados em decibéis (dB), onde nosso resultado de -52dB caiu para -34dB, foi uma perca considerável de resultados, porém ainda sim é um resultado excelente. Enquanto que, a sua frequência de ressonância saiu de 2.46 GHz (frequência simulada) para uma frequência de 2.49 GHz (frequência experimental medida). Esse resultado foi interessante porque ainda está dentro do que esperávamos. Pois, houve apenas uma pequena mudança na frequência de ressonância de 2,46GHz para 2,49GHz. Temos uma antenna que funciona em 2,49 GHz. Veja a o parâmetro da perda de retorno da antenna 2, na figura 35.

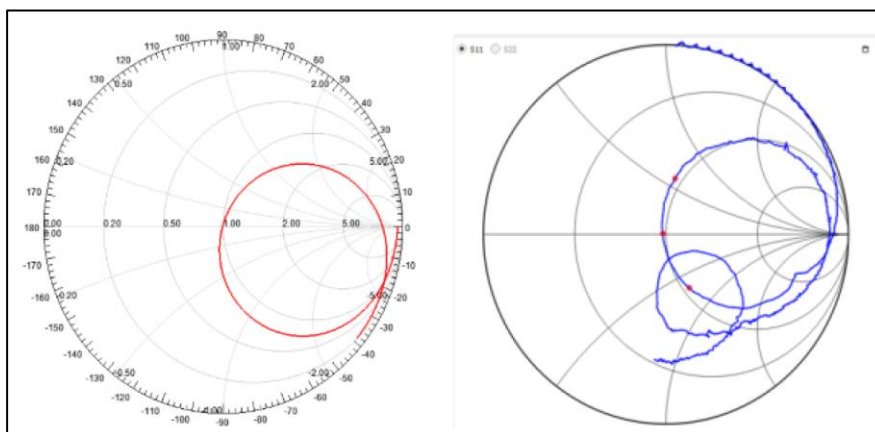
Figura 36 - Gráfico da Perda de Retorno da antenna 2 medida e simulada;



Fonte: Autor, 2025.

Perceba que as cartas de Smith da antena 2 não tiveram quase nenhuma diferença. Temos um resultado de medição muito satisfatório, de forma que, ambas cartas de Smith simulada e medida experimentalmente, tiveram resultados similares onde tiveram seus pontos de medição bem em cima do 1, logo podemos concluir que tivemos uma diferença quase nula nos resultados do casamento de impedância. Dito isso, podemos dizer que esse foi um resultado muito satisfatório e promissor. Veja a figura 36.

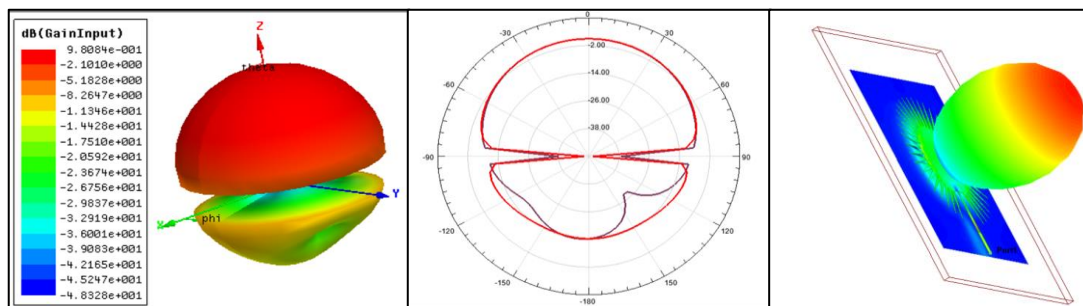
Figura 37 - Carta de Smith da antena 2;



Fonte: Autor, 2025.

Na figura 37, temos o parâmetro de irradiação da antena 2 em duas dimensões (2D) e de três dimensões (3D). 2D e 3D. Observamos o comportaram irradiando para os dois lados. O gráfico em 2D, mostrará os feixes potência da antena nas duas direções. O gráfico em 3D mostra um ganho diretivo de 9.8084 dB de irradiação em ambas direções.

Figura 38 - Parâmetros de irradiação da antena 2;



Fonte: Autor, 2025.

A tabela 7 mostra as medições dos resultados dos parâmetros da antena 2. Veja a tabela 7:

Tabela 7 - Medições dos parâmetros da antena 2;

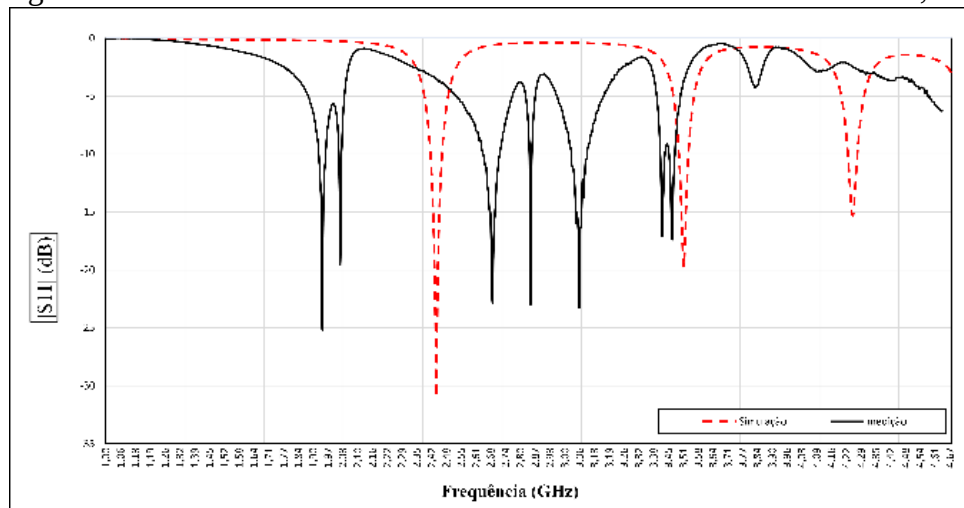
RESULTADOS	SIMULADOS	MEDIDOS
Frequência (GHz)	2.46 GHz	2.49 GHz
Perda de Retorno (RL)	-52.95 dB	-34.09dB
Largura de Banda (BW)	47.80 MHz	75.00 MHz
Carta de Smith	1.02	0.99
Ganho	9.80	-----

Fonte: Autor, 2025.

6.3. Antena 3:

Na antena 3, constatamos uma pequena perda de resultados em decibéis (dB), onde a antena teria atingido -30,00 dB e caiu para -25,00 dB, foi uma perda muito pequena. Mas em compensação, a nossa antena 1 medida teve um aumento considerável em faixas de frequência, onde ela saiu de 2.44 Ghz de frequência para varias outras menores, o que a torna uma antena que atua em mais de duas faixas de frequência, tornando-a uma antena multibanda. Veja a figura 38.

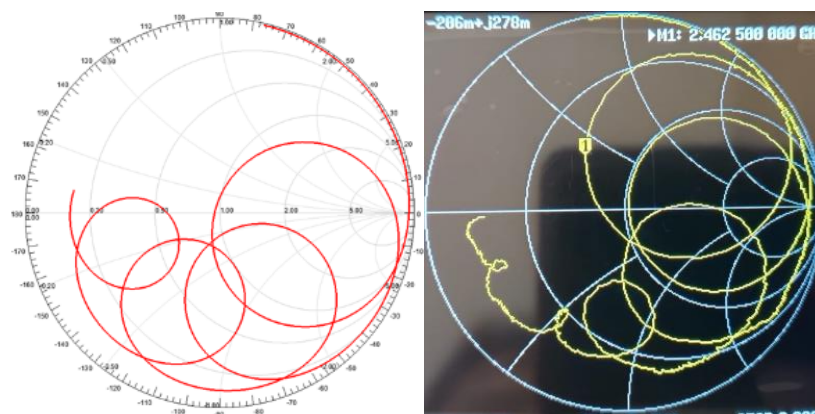
Figura 39 - Gráfico da Perda de Retorno da antena 3 medida e simulada;



Fonte: Autor, 2025.

Perceba que na antena 1, tivemos algumas diferenças na carta de Smith. Apesar de termos tido um pequeno decaimento nos resultados na carta de Smith medida, isso poderia explicar algumas perdas de potência na perda de retorno (s_{11}). Apesar disso, ainda podemos dizer que temos um resultado de medição muito satisfatório, de forma que, ambas cartas de Smith simulada e medida experimentalmente, tiveram resultados similares onde tiveram seus pontos de medição bem próximos do 1, logo podemos concluir que tivemos uma diferença pequena nos resultados do casamento de impedância. Dito isso, podemos dizer que esse foi um resultado muito satisfatório e promissor.

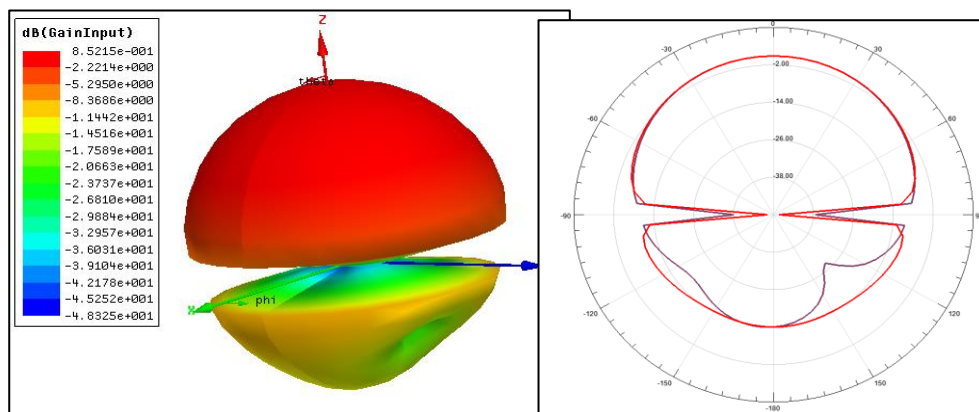
Figura 40 - Carta de Smith da antena 3;



Fonte: Autor, 2025.

Na figura 35, temos os parâmetros de irradiação das antenas em duas dimensões (2D) e de três dimensões (3D) da antena 3, onde se constatou ter um ganho de 8.52 dB nos parâmetros de irradiação da antena.

Figura 41 - Parâmetros de Irradiação da antena 3;



Fonte: Autor, 2025.

A tabela 8 mostra as medições dos resultados dos parâmetros da antena 3. Veja abaixo:

Tabela 8 - Medições dos parâmetros da antena 3;

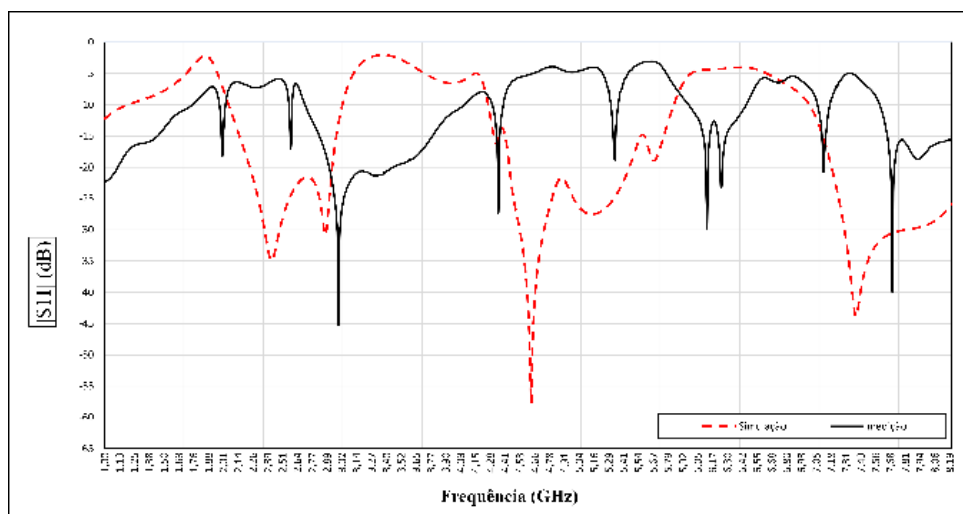
RESULTADOS	SIMULADOS	MEDIDOS
Frequência (GHz)	2.44 GHz	1.96 GHz
Perda de Retorno (RL)	-30.98 dB	-25.00 dB
Largura de Banda (BW)	46.10 MHz	72 MHz
Carta de Smith	0.87	0.92
Ganho	8.52 dB	-----

Fonte: Autor, 2025.

6.4. Antena 4 e 5 (As menores):

Na antena 4, também teve uma pequena perda de resultados, onde seu pico máximo de potência em dB foi de -57,76 dB numa faixa de frequência de 4.63 GHz (frequência simulada), caindo para -45,12 dB numa faixa de frequência de 2.92 GHz (frequência medida). Apesar de que tivemos uma pequena perda de resultados, ainda podemos dizer que a antena 2 ainda pode ser considerada uma antena muito boa, por ser uma antena miniaturizada, e também por possuir uma potência em dB bastante boa mesmo com as perdas, além de termos uma largura de banda boa, ela ainda pode ser considerada multi-banda.

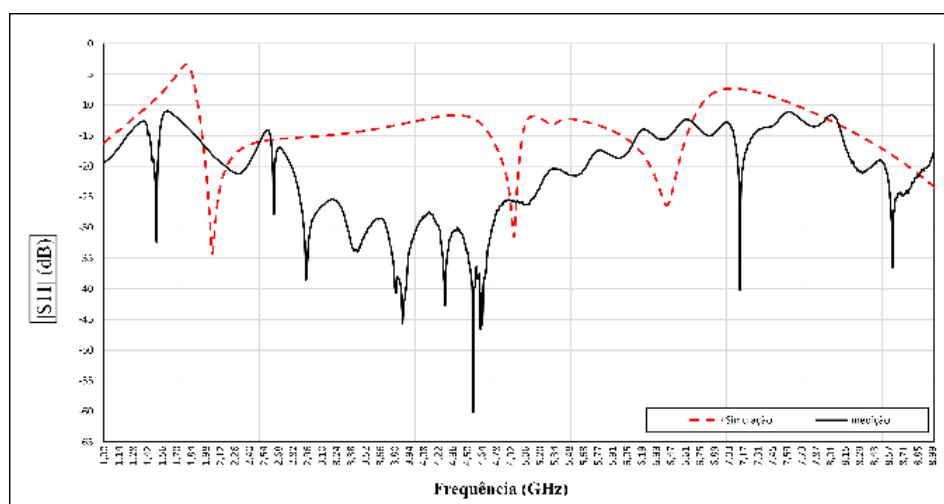
Figura 42 - Gráfico da Perda de Retorno da antena 4 medida e simulada;



Fonte: Autor, 2025.

Na antena 5, não tivemos perdas de resultados, muito pelo contrário, tivemos um grande aumento em todas as suas características de resultados. Na simulação tivemos que essa antena alcançou -34,00 dB a uma faixa de frequência de 2.05 GHz (frequência simulada), e tivemos um incrível aumento, onde ela em sua maior faixa, ela alcançou os incríveis -60,00 dB a uma faixa de frequência de 4.58 GHz (frequência medida). Além de que, a sua largura de banda também aumentou, onde na medida todos os pontos de frequência ficaram a baixo de -10,00 dB, ou seja temos aqui um caso de antena de ultra-banda larga, além de que essa antena é muito pequena, ou seja, ela é a miniaturização das antenas que eram miniaturizada.

Figura 43 - Gráfico da Perda de Retorno da antena 5 medida e simulada;

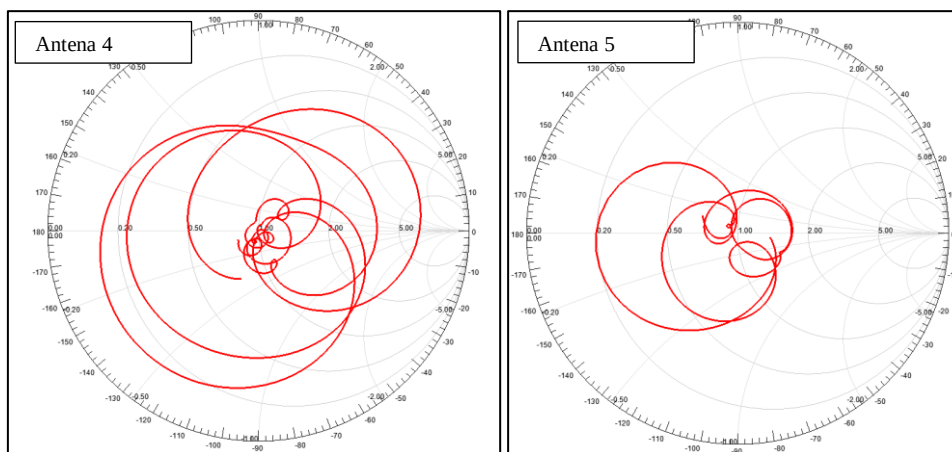


Fonte: Autor, 2025.

Nas cartas de Smith das antenas 4 e 5, contatou-se ótimos resultados nos parâmetros do casamento de impedância. Onde ambas as antenas tiveram a linha passando bem em cima do 1.

Isso implica em dizer que ambas tiveram máxima transmissão de energia, o que explica os ótimos resultados mostrados nas figuras 36 e 37. Veja abaixo as figuras das cartas de Smith das antenas 4 e 5.

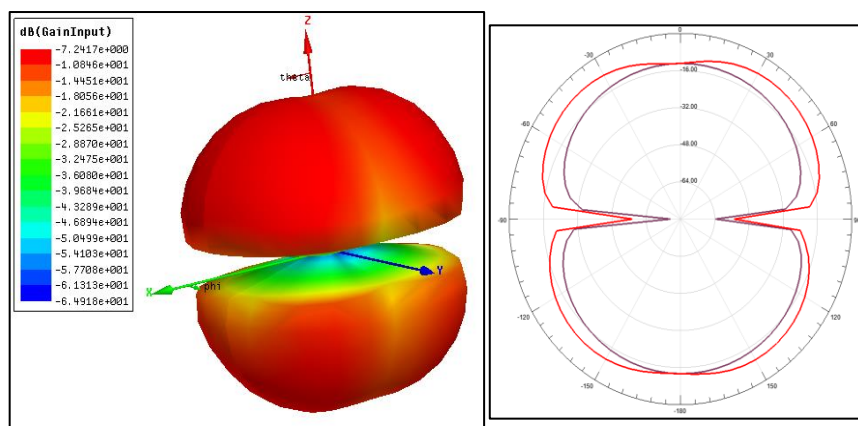
Figura 44 - Cartas de Smith da antena 4 e 5;



Fonte: Autor, 2025.

Na figura 39, temos os parâmetros de irradiação das antenas em duas dimensões (2D) e de três dimensões (3D) da antena 4, onde se constatou ter um ganho de 7.24 dB nos parâmetros de irradiação da antena.

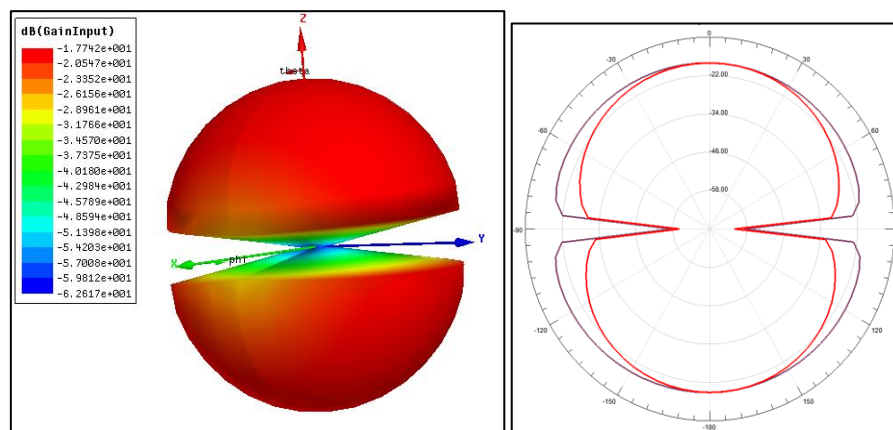
Figura 45 – Parâmetros de Irradiação da Antena 4;



Fonte: Autor, 2025.

E na figura 40, temos os parâmetros de irradiação das antenas em duas dimensões (2D) e de três dimensões (3D) da antena 5, onde se constatou ter um ganho de 1.77 dB nos parâmetros de irradiação da antena.

Figura 46 - Paramentos de Irradiação da Antena 5;



Fonte: Autor, 2025.

A tabela 9 mostra as medições dos resultados dos parâmetros da antena 4 e 5. Veja abaixo:

Tabela 9 - Medições dos parâmetros da antena 4 e 5;

Antenas	Antena 4		Antena 5	
Resultados	SIMULADOS	MEDIDOS	SIMULADOS	MEDIDOS
Frequência (GHz)	4.63 GHz	2.96 GHz	2.05 GHz	4.58 GHz
Perda de Retorno (RL)	-57.74 dB	-45.00 dB	-34.18 dB	-60.00 dB
Largura de Banda (BW)	1.56 GHz	1.29 GHz	3.84 GHz	9.00 GHz
Carta de Smith	1.01	0.92	0.97	1.00
Ganho	-7.24 dB	-----	-1.77 dB	-----

Fonte: Autor, 2025.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O crescente interesse por inovações no campo das telecomunicações está diretamente ligado ao avanço das tecnologias de comunicação sem fio. Nesse cenário, as antenas de microfita surgem como soluções promissoras por apresentarem baixo custo de fabricação, fácil acesso e bom desempenho para atender às exigências das novas tecnologias.

Este trabalho investigou o uso da super equação de Gielis como abordagem para o desenvolvimento de modelos miniaturizados de antenas de microfita com geometrias polares. Os resultados indicam que essa técnica oferece vantagens significativas, como melhor desempenho e facilidade de miniaturização, além de permitir maior flexibilidade no design e bom casamento de impedância. Apesar das qualidades, essas antenas ainda apresentam algumas limitações. Para equilibrar teoria e prática, utilizamos simulações como base teórica e a fabricação dos protótipos como parte prática. Diversas técnicas retiradas da literatura foram aplicadas com sucesso para mitigar as desvantagens observadas.

Outro destaque foi o uso da técnica DGS (Defected Ground Structure), que, quando combinada com as geometrias geradas pela equação de Gielis, demonstrou resultados muito satisfatórios, especialmente nos modelos de antenas 3, 4 e 5. A integração dessas duas abordagens se mostrou eficaz e promissora para o desenvolvimento de antenas de microfita com melhor desempenho.

As contribuições deste trabalho com a certeza de que a aplicação da super equação de Gielis na criação de projetos de antenas de microfita, bem como a implementação da técnica do DGS, percebe-se que resultaram em avanços significativos em desempenho e miniaturização das antenas de microfita, onde foi possível obtermos um conjunto de informações riquíssimas. Este trabalho de monografia ficará na biblioteca do Campus VII da UEPB e disponível para qualquer estudante que deseje. E sugere-se que em caso de futuras pesquisas sobre o tema abordado, aprofundem-se na exploração da miniaturização de antenas, buscando sempre manter um dB melhor e implementar novas técnicas visando um amplo resultado combinando a alta largura de banda, um dB muito bom e que seja miniaturizada e sempre avaliando seu impacto em faixas de frequência variadas e em aplicações emergentes, como redes operantes em 2.45GHz e em 5G e dispositivos IoT.

8. REFERÊNCIAS

- [1] GIELIS, Johan. A generic geometric transformation that unifies a wide range of natural and abstract shapes. *American Journal of Botany*, v. 90, n. 3, p. 333-338, 2003.
- [2] GIELIS, Johan. *The Mathematics of Nature: Superformula and Natural Geometry*. Antwerp: Genicap, 2017.
- [3] MILLIGAN, Thomas A. **Modern Antenna Design. Second Edition - IEEE Press.** WileyInterscience, 2005.

- [5] ANATEL. **Agência Nacional de Telecomunicações**. Disponível em: <https://www.gov.br/anatel/pt-br/assuntos/5G/tecnologia-5g>. Acesso em: 16 de Mar. 2022.
- [6] OLIVEIRA, E. E. C. **Antenas de Microfita com Patch Quase-Fractal para Aplicações em Redes WPAN/WLAN**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.
- [7] MALEK, N. A.; SABRI, N. A. C.; ISLAM, M. R.; MOHAMAD, S. Y.; ISA, F. N. M. **Design of Hybrid Koch-Minkowski Fractal Dipole Antenna for Dual Band Wireless Applications**, IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE), 2019.
- [8] CHAUDHURI, S; MISHRA, M.; KSHETRIMAYUM, R. S.; SONKAR, R. K. **Wideband Rectangular Dielectric Resonator Antenna Array for ISM Band Applications**. 2020 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP), 2020.
- [9] Ansoft Designer (part of ANSYS SInc.)[Online].Available: www.ansoft.com.
- [10] C. A. Balanis, **Antenna theory - analysis and design, 2nd**, New York: John Wiley & Sons, 1997.
- [11] MatLab (parto of Matrix Laboratory Inc.) [Online].Avaliable: <https://www.mathworks.com/products/matlab-online.html>.
- [12] MONTALVÃO, E. S. R. et al. **Um método simples para ajustar a frequência de ressonância de uma FSS**. Curitiba, out. 2011.
- [13] OLIVEIRA, M. A. D.; OLIVEIRA, E. E. C. BATISTA, F. F.; SILVA, P. H. D. F. **Técnicas de Casamento de Impedâncias por Linha de Microfita em Antenas Patch Circular para Tecnologia ISM em 2,4 GHz**.Dissertação (Pós-Graduação em EngenhariaElétrica) - Instituto Federal da Paraíba. João Pessoa-PB, Brasil.
- [14] MORETTI, Isabella. “Regras da ABNT para TCC: conheça as principais normas”. 2017. Disponível em: <<https://viacarreira.com/regras-da-abnt-para-tcc-conheca-principais-normas>>. Acesso em: 16 de Out. 2024.
- [15] SEARS, Francis W.; ZEMANSKY, Mark W. *Fundamentos de física: eletricidade e magnetismo*. 13. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2012.
- [16] CHEN, X.; YU, W. **Defected Ground Structures: Fundamentals and Applications in Microstrip Antennas**. IEEE Trans. Microwave Theory Tech, 2008.
- [17] FERREIRA, R. et al. **Performance improvement of microstrip antennas using DGS**. J. Electromagnetics, 2017.
- [18] LIU, Z.; WANG, G. **Impedance matching of microstrip antennas using DGS**. Microwave Journal, 2012.