



**UEPB**

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

**VINÍCIUS NUNES DE QUEIROZ**

**TEORIA ELETROMAGNÉTICA APLICADA A PROJETOS DE ARRANJOS DE  
ANTENAS PATCHES FRACTAL DE MICROFITA PARA A FAIXA DE  
FREQUÊNCIA DAS MICRO-ONDAS**

**PATOS  
2022**

VINÍCIUS NUNES DE QUEIROZ

**TEORIA ELETROMAGNÉTICA APLICADA A PROJETOS DE ARRANJOS DE  
ANTENAS PATCHES FRACTAL DE MICROFITA PARA A FAIXA DE  
FREQUÊNCIA DAS MICRO-ONDAS**

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

**Área de concentração:** Física Aplicada.

**Orientador:** Prof. Dr. Elder Eldervitch Carneiro de Oliveira.

**PATOS  
2022**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma 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.

Q3t Queiroz, Vinicius Nunes de.

Teoria eletromagnética aplicada a projetos de arranjos de antenas Patches Fractal de microfita para a faixa de frequência das micro-ondas [manuscrito] / Vinicius Nunes de Queiroz. - 2022.

57 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências Exatas e Sociais Aplicadas, 2022.

"Orientação : Prof. Dr. Elder Eldervitch Carneiro de Oliveira, Coordenação do Curso de Física - CCEA."

1. Teoria eletromagnética. 2. Antenas Patches Fractal. 3. Comunicação sem fio. 4. Equações de Maxwell. I. Título

21. ed. CDD 537

VINÍCIUS NUNES DE QUEIROZ

**TEORIA ELETROMAGNÉTICA APLICADA A PROJETOS DE ARRANJOS DE  
ANTENAS PATCHES FRACTAL DE MICROFITA PARA A FAIXA DE  
FREQUÊNCIA DAS MICRO-ONDAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Departamento de Física da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciatura em Física.

Área de concentração: Física Aplicada.

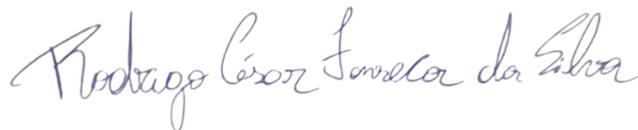
Aprovada em: 26/07/2022.

**BANCA EXAMINADORA**



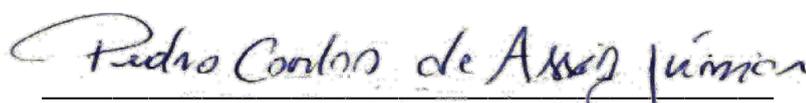
---

Prof. Dr. Elder Eldervitch Carneiro de Oliveira (Orientador)  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



---

Prof. Dr. Rodrigo César Fonseca  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



---

Prof. Dr. Pedro Carlos de Assis Júnior  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

A todas as vítimas do COVID-19 que não puderam realizar o sonho da graduação, e aqueles que não puderam realizar o sonho de verem seus filhos graduados, DEDICO.

## **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.

A meu avô e minha avó, Sargento Cândido e Gorete Nunes, os quais me educaram, sempre me incentivaram a estudar e correr atrás dos meus sonhos.

A minha mãe, Gina Carla, por ter me dado liberdade para trilhar meu próprio caminho e por sempre me incentivar apesar de morarmos distantes um do outro.

Ao meu tio, Glauber Nunes, por sempre ter sido meu guia, me ajudando e segurando minha mão em todas as dificuldades. Muito obrigado por todos seus conselhos durante a graduação, eles tornaram mais leve minha graduação e consegui lecionar com qualidade nas escolas as quais trabalhei.

Ao Professor Dr. Rodrigo Fonseca, que me conheceu no segundo período do curso, conseguimos produzir o projeto de impressão 3D e com isso apresentamos para diversos alunos e ajudamos os profissionais da saúde durante a pandemia do Covid-19 com a produção dos protetores faciais.

Ao Professor Dr. Pedro que me incentivou e me apoiou durante o curso e me fez acreditar que poderia me tornar um grande profissional e um excelente professor de Física.

Aos Professores que me ajudaram durante a minha trajetória acadêmica, com oportunidades de trabalho e conselhos profissionais.

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 dos Cursos de Física e Matemática da UEPB, que sempre estiveram à disposição para me ajudar e tirar minhas dúvidas. E principalmente pelas dicas de aprendizado das disciplinas mais difíceis da graduação.

Ao Professor Dr. Elder Eldervitch por todo auxílio, 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.

“E Deus disse:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot D &= \rho, \\ \nabla \cdot B &= 0, \\ \nabla \times E &= -\frac{\partial B}{\partial t}, \\ \nabla \times H &= J + \frac{\partial D}{\partial t},\end{aligned}$$

então fez-se a luz.”  
(parafraseando o livro do Gênesis.)

## RESUMO

O desenvolvimento das telecomunicações é um marco no desenvolvimento tecnológico e científico, e isso decorre dos estudos de James Clerk Maxwell e da aplicabilidade de suas equações no eletromagnetismo. O grande avanço nas redes de Telecomunicações e mais precisamente nas redes e comunicações móveis, a exemplo das redes 4,5G e 5G, tornam a busca por dispositivos compactos, com propriedades multifrequência bem atrativos a essas aplicações. Por esses motivos as antenas, arranjos de antenas e os circuitos planares são excelentes dispositivos capazes de funcionar nessas aplicações, isso em virtude de suas características, tais como: baixo custo, baixo peso e capacidade de operar em altas frequências. Nesse contexto, este trabalho consiste no projeto numérico e experimental de um arranjo de antenas de microfita log-periódico quase-fractal fazendo uso da curva de Koch nível 2. O arranjo foi projetado para operar na faixa de frequência de 2,44 GHz, onde temos muitas aplicações, além de ser uma faixa livre para testes pertencente a banda ISM (*Industrial Scientific and Medical*). O arranjo foi projetado por meio do *software Ansys Designer™*, onde foi possível conseguir um dispositivo menor, com uma redução de aproximadamente 41% quando comparado a um arranjo retangular convencional para a mesma faixa de frequência. Uma vez o dispositivo projetado, o mesmo passou por uma série de simulações com o intuito de investigar o comportamento em frequência desse dispositivo. Para isso, foi realizada medições dos parâmetros de espalhamento (parâmetros S) associados ao arranjo de antenas proposto. A estrutura apresentou boas características de radiação e baixas perdas de retorno, com os resultados concordando muito bem entre si.

**Palavras-Chave:** Arranjo log-periódico quase-fractal, Curva de Koch, Comunicação sem fio, Equações de Maxwell.

## ABSTRACT

The development of telecommunications is a milestone in technological and scientific development, and this stems from the studies of James Clerk Maxwell and the applicability of his equations in electromagnetism. The great advance in Telecommunications networks and more precisely in networks and mobile communications, such as 4.5G and 5G networks, make the search for compact devices with multifrequency properties very attractive to these applications. For these reasons, antennas, antenna arrays and planar circuits are excellent devices capable of working in these applications, due to their characteristics, such as: low cost, low weight and ability to operate at high frequencies. In this context, this work consists of the numerical and experimental design of a quasi-fractal log-periodic microstrip antenna array using the level 2 Koch curve. The array was designed to operate in the 2.44 GHz frequency range, where we have many applications, in addition to being a free range for tests belonging to the ISM (Industrial Scientific and Medical) band. The array was designed using Ansys Designer™ software, where it was possible to achieve a smaller device, with a reduction of approximately 41% when compared to a conventional rectangular array for the same frequency range. Once the device was designed, it went through a series of simulations in order to investigate the frequency behavior of this device. For this, measurements of the scattering parameters (S parameters) associated with the proposed antenna array were performed. The structure showed good radiation characteristics and low return losses, with the results agreeing very well with each other.

**Keywords:** Quasi-fractal log-periodic array, Koch curve, Wireless communication, Maxwell's equations.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Carga Pontual (positiva).....	19
Figura 2 – Duas cargas pontuais de mesmo sinal.....	20
Figura 3 – Duas cargas pontuais de sinais diferentes.....	20
Figura 4 – Balança de Torção de Coulomb.....	21
Figura 5 – A agulha magnética é um elemento de prova do campo magnético em um ponto.....	22
Figura 6 – Diagrama do campo vetorial para uma barra magnética (ímã).....	23
Figura 7 – Diagrama das linhas de campo para uma barra magnética (ímã).....	23
Figura 8 – Os gráficos das funções seno (vermelho sólido) e cosseno (azul pontilhado) são sinusóides de diferentes fases.....	25
Figura 9 – Um gerador conectado a dois fios, e assim, formando uma linha de transmissão AB.....	29
Figura 10 – Definição de largura de banda.....	32
Figura 11 – Exemplos de fractais naturais: a) flor de araucária; b) brócolis; c) asas de libélula; d) vasos sanguíneos; e) floco de neve; f) raio; g) cachoeira; h) vasos pulmonares.....	33
Figura 12 – Fractal conjunto de Mandelbrot.....	34
Figura 13 – Fractal samambaia de Barnsley.....	34
Figura 14 – Construção do fractal ilha de Minkowski.....	35
Figura 15 – Construção do fractal floco de neve de Koch.....	36
Figura 16 – Fractal textura de Perlin.....	36
Figura 17 – Diferentes níveis da curva fractal (a) Koch, (b) Minkowski.....	37
Figura 18 – Fractal triângulo de Sierpinski.....	37
Figura 19 – Fractal esponja de Menger formado a partir de um cabo.....	38
Figura 20 – Geração da curva de Koch com uso do sistema-L: a) gerador; b) regra.....	39
Figura 21 – Curva de Koch pelo método IFS.....	42
Figura 22 – Geração da curva fractal de Koch.....	43
Figura 23 – Arranjo log-periódico nível 1 (AKR1).....	44
Figura 24 – Estrutura do Arranjo log-periódico nível 2 (AKR2).....	45

Figura 25 – Arranjo log-periódico AKR2 construído.....	47
Figura 26 – Resultado de simulação e medição para o arranjo AKR2.....	49
Figura 27 – Simulação e medição para o arranjo AKR2 mini proposto.....	50
Figura 28 – Resultado medido e simulado de VSWR para arranjo AKR2 mini.....	50
Figura 29 – Diagrama de irradiação 2D e 3D para o arranjo de antenas log- periódico AKR2 mini.....	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1-	Valores de $\theta_i$ , $t_{x_i}$ e $t_{y_i}$ para geração da curva de Koch pelo método IFS.....	41
Tabela 2 –	Dimensões do arranjo AKR2 log-periódico proposto.....	46
Tabela 3 –	Dimensões do arranjo AKR2 mini log-periódico proposto.....	48
Tabela 4 –	Resultados simulados e medidos para o arranjo de antenas quase-fractal AKR2 mini proposto.....	51

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

4,5G	Quarta + geração de padrões e tecnologias de telefonia móvel
5G	Quinta geração de padrões e tecnologias de telefonia móvel
ANATEL	Agência nacional de telecomunicações
BW	Largura de Banda ( <i>Bandwidth</i> )
BW%	Largura de Banda Percentual ( <i>Bandwidth</i> )
CF	Fator de Compressão
Fr	Frequência de Ressonância
FM	Modulação em Frequência
FR4	Fibra de Vidro
GSM	Sistema Global para Comunicações Móveis
GPS	Sistema de Posicionamento Global
HPBW	Largura de feixe de meia potência ( <i>Half Power Beam Width</i> )
IoT	Internet das Coisas
IP	Identificação de Interface de Hospedeiro
ISM	Industrial, científica e médica ( <i>industrial, Scientific and Medical</i> )
IFS	Sistema de funções iteradas ( <i>Iterated Functions System</i> )
RF	Radiofrequência
RL	Perda de retorno ( <i>Return Loss</i> )
SMA	Sub miniatura versão A ( <i>Sub thumbnail version A</i> )
TLM	Linha de Transmissão
UEPB	Universidade Estadual da Paraíba
VSWR	Coefficiente de onda estacionária de tensão ( <i>Voltage Standing Wave Ratio</i> )
WLAN	Rede local sem fio ( <i>Wireless Local Area Network</i> )

## LISTA DE SIMBOLOS

BW1	Primeira largura de banda
BW2	Segunda largura de banda
D	Dimensão fractal
E	Conjunto do espaço Euclidiano
F	Caractere do sistema-L
$f_0$	Frequência de ressonância central
$f_1$	Primeira frequência de ressonância
$f_2$	Segunda frequência de ressonância
h	Espessura do substrato dielétrico
i	Número imaginário
j	Índice
k	Constante eletrostática
L <sub>n</sub>	Comprimento do patch
n	Nível de iteração fractal
N	Número máximo de iterações fractais
S	Fator de escala fractal
S <sub>i</sub> ,S <sub>j</sub>	Posição no Campo de Weiss
S <sub>11</sub>	Módulo do coeficiente de reflexão
t <sub>x</sub>	Parâmetro relacionado à rotação
t <sub>y</sub>	Parâmetro relacionado à translação
W	Largura do patch
W <sub>1</sub>	Largura da linha de alimentação
x	Abcissa de um ponto no plano cartesiano
y	Ordenada de um ponto no plano cartesiano
Z <sub>0</sub>	Impedância característica
$\epsilon_0$	Permissividade elétrica do Vácuo
$\epsilon_{ref}$	Permissividade elétrica relativa efetiva
$\epsilon_r$	Permissividade elétrica relativa
$\theta$	Coordenada angular
$\mu_B$	Momento Magnético

$\lambda$	Comprimento de onda
$\lambda_g$	Comprimento de onda guiado
$\lambda_o$	Comprimento de onda no espaço livre
$\Delta L$	Varição do comprimento efetivo do patch

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
1.1	Justificativa .....	13
1.2	Objetivo Geral .....	14
1.3	Objetivo Específico .....	15
<b>2</b>	<b>TEORIA ELETROMAGNÉTICA</b> .....	16
2.1	Campo Elétrico e Magnético.....	18
2.1.1	Campo Elétrico.....	18
2.1.2	Lei de Coulomb.....	20
2.1.3	Campo Magnético.....	22
2.2	Equações de Maxwell.....	24
2.3	Onda Senoidal.....	25
<b>3</b>	<b>TEORIA DAS ANTENAS</b> .....	27
3.1	Conceito de uma Antena.....	28
3.2	Tipos de Antenas.....	29
3.3	Parâmetros Fundamentais de Antenas .....	30
3.3.1	Diagrama de Irradiação .....	30
3.3.2	Largura de Feixe .....	31
3.3.3	Ganho .....	31
3.3.4	Largura de Banda.....	32
<b>4</b>	<b>GEOMETRIA FRACTAL</b> .....	33
4.1	Conceito e Definições .....	35
4.2	Exemplos de Fractais .....	37
4.3	Métodos de Geração de Fractais .....	38
4.3.1	Sistema de Lindenmayer .....	38
4.3.1.1	Curva de Koch Gerada Pelo Sistema-L .....	39
4.3.2	Método IFS Para Geração de Fractais .....	40
4.3.2.1	Curva de Koch Gerada Pelo Método IFS .....	41
4.4	A curva de Koch .....	42
<b>5</b>	<b>ESTRUTURA DO ARRANJO DE ANTENAS PROPOSTO</b> .....	44
<b>6</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	48
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	52
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	53

## 1 INTRODUÇÃO

O eletromagnetismo clássico é provavelmente a mais bem compreendida teoria Física e seguramente uma das mais bem sucedidas. A história costuma ser dividida em antes e depois de Cristo, porém, levando em um ponto de vista estritamente científico, seria plausível dizer que ela está dividida em antes e depois de Maxwell, tal o impacto causado pelas aplicações do eletromagnetismo na sociedade moderna. O escocês James Clerk Maxwell, que viveu no século XIX, sintetizou em um conjunto de equações a descrição de todos os fenômenos eletromagnéticos e atualmente vivemos em plenitude da era eletromagnética. O domínio da teoria eletromagnética permitiu resolver desde os problemas mais simples, como a iluminação de residências e vias públicas, passando por complexas máquinas e equipamentos elétricos de uso residencial e industrial, e finalmente promovendo uma revolução na forma como os localizamos e nos relacionamos com as pessoas, através do uso de comunicações móveis, sistemas de posicionamento global (GPS) e o advento da internet, que levou ao surgimento das redes sociais.

O desenvolvimento das Telecomunicações é um marco tão relevante que, na busca pela vida inteligente fora do nosso planeta, os astrônomos classificam as possíveis civilizações existentes fora da Terra em duas Categorias: as que já chegaram às comunicações eletromagnéticas e as que ainda não a dominam, sendo assim impossível rastreá-las. É, portanto, fundamental que físicos e engenheiros eletricitistas tenham amplo conhecimento das leis do eletromagnetismo e domínio das técnicas matemáticas empregadas na solução de problemas práticos.

Com a consolidação no setor de Telecomunicações e das tecnologias de quarta geração, mais conhecido como 4G, oferecendo serviços baseados em IP (voz e dados), com uma experiência de internet de banda larga rápida, sendo o foco principalmente nas mais diversas aplicações, com uma boa taxa de transmissão de dados e baixa latência, as pesquisas em comunicações móveis ganharam ainda mais relevância por parte da comunidade científica, na busca por dispositivos móveis, com conexão sem fio, eficientes e de preferência a um custo relativamente baixo para sua produção em larga escala. Daqui para frente, essa será uma linha de pesquisa muito estudada devido a sua importância para tecnologias emergentes, por exemplo a tecnologia de quinta geração (5G), já em pleno funcionamento em alguns lugares do

mundo, mais que ainda no Brasil se encontra em fase de testes para uma futura implementação (ANATEL, 2022).

Essa tecnologia de quinta geração (5G), vai exigir ainda mais recursos dos dispositivos móveis de telecomunicação, isso em virtude da mesma proporcionar além da melhoria na velocidade, espera-se que a rede 5G gere um ecossistema massivo para a Internet das Coisas (IoT), no qual as redes móveis possam atender às necessidades de comunicação de bilhões de dispositivos conectados, com um equilíbrio justo entre velocidade, latência e custo.

Esse grande avanço tecnológico aliado as limitações de espaço cada vez mais perceptível 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). Neste mercado competitivo, o surgimento de novas tecnologias sem fio resulta em demandas crescentes por antenas compactas/multibandas, que permitam, por exemplo, a união de diferentes tecnologias sem fio em dispositivos portáteis sem perda de desempenho.

Diversas técnicas de miniaturização dos dispositivos estão sendo estudadas e aplicadas envolvendo estruturas planares, são elas: i) utilização de substratos dielétricos de alta permissividade elétrica (CHAUDHURI, et al. 2013), aumento do comprimento elétrico da antena por meio de otimização de sua geometria utilizando estruturas fractais (OLIVEIRA, 2008). Muitas são as aplicações que necessitam que o dispositivo opere em modo multi ressonante, por exemplo, o telefone celular modo *dual-band* é um bom exemplo de dispositivo sem fio multifrequência. Essa operação *dual-band* para o caso do GSM, envolve transmissão e recepção em 850 MHz e 1850 MHz. Antenas tradicionais são incapazes de conseguir esse tipo de comportamento.

O uso da geometria fractal no projeto de arranjo de antenas apresenta vantagens em termos de miniaturização e a capacidade de operar em múltiplas bandas de frequência de ressonância com características de radiação similares (BHATTACHARYYA, 2020). Em comunicações de longa distância, uma antena com baixa capacidade diretiva deixa de ser atrativa. Neste sentido, para contornar esse

problema um arranjo de antenas proporciona um melhor desempenho, uma vez que, por meio da radiação de seus elementos agregados, permite radiar o máximo da energia em uma direção particular e muito pouca em outras direções (GARG, et al., 2001). Dessa forma, uma maior concentração de energia em uma determinada região apresenta uma melhor capacidade de irradiação por parte da antena, conseqüentemente apresenta uma maior diretividade e um maior ganho quando comparado a uma antena patch retangular convencional (BALANIS, 1997).

Neste contexto, a busca por dispositivos cada vez menores e sem perda de desempenho vem impulsionando as pesquisas na área de telecomunicações e do eletromagnetismo aplicado. O objetivo geral deste trabalho de conclusão de curso consiste no projeto de um arranjo de antenas log-periódico quase fractal operando na banda ISM (*Industrial Scientific and Medical*), mais precisamente na frequência de 2,44 GHz. Este trabalho apresenta ainda como objetivos específicos a modelagem numérica e simulações no *software* Ansys Designer de onda completa para posterior caracterização do dispositivo proposto.

## 2 TEORIA ELETROMAGNÉTICA

O magnetismo é uma das áreas da Física mais fascinantes até mesmo para leigos. O simples fenômeno de uma bússola deixa as pessoas interessadas na “magia” que rege a agulha desse instrumento. Na antiga Grécia os filósofos já falavam sobre “maravilhosas” propriedades de uma pedra que teria uma “alma” que seria de origem divina. A primeira referência sobre essa pedra diz que um pastor chamado Magnes, encontrou uma pedra que tinha essa “propriedade divina”. Daí vem a origem no nome desse mineral, Magnetita. Outros relatos refutam essa informação e dizem que, na verdade a primeira descoberta desse material foi feito em uma região da Turquia conhecida como Magnesia. Qualquer que seja a verdade, na época da descoberta o conhecimento era domínio dos filósofos animistas e, mais tarde pelos filósofos mecanicistas. Essas ideias (superstições metafísicas) formaram a base de quase todo pensamento científico até o renascimento. Mesmo assim, nessa época surgiu a primeira aplicação científica do material, a bússola.

O relato sobre o surgimento da bússola tem várias fontes diferentes e seu surgimento vai desde textos que citam 1100 AC na China até textos que relatam o surgimento em 1637 DC na Espanha. A única coisa que podemos afirmar é que já no século XIV ela já era bastante usada. Em 1600, William Gilbert escreveu o primeiro tratado sobre magnetismo, “De Magnete”. Essa publicação fez com que Gilbert seja considerado o pai do Magnetismo. Talvez o fato mais interessante registrado por ele seja a afirmação que a Terra é um grande magneto. Descartes publicou a primeira teoria que eliminava a ideia de “efluvia”, que significa emanções e passou a atribuir o conceito de partes “enroscada” que penetram em “canais” existentes nos magnetos e na Terra, e esses vão de um polo ao outro. Essa é a origem da ideia de polos. Até o período situado entre 1600 e 1700, o pensamento metafísico passou a ser substituído pela matemática e o método científico começou a surgir com Galileu, Newton dentre outros. Nesse mesmo período, mais especificamente em 1750, Coulomb estabelecia a teoria da Eletricidade.

Pouco depois, já no início de 1800, Oersted apresenta os princípios da eletrodinâmica, É nesse período que surgem também Biot, Savart, Arago, Weber e Ampere (introduziu o conceito de campo magnético) e seus estudos levaram a ideia de que o magnetismo era resultado de correntes microscópicas. Ainda na contribuição para o progresso do estudo do eletromagnetismo, no final do século XIX, surgem dois

grandes gênios, Faraday e Maxwell. Faraday era um cientista teórico e foi o primeiro a utilizar o campo magnético além de ter feito várias contribuições, principalmente com a lei da indução e a caracterização dos materiais segundo seu comportamento magnético. Todas essas deduções e definições foram feitas sem que Faraday tivesse escrito uma única equação. Todo o equacionamento das descobertas de Faraday ficou a cargo do outro gênio, Maxwell. Além de equacionar os conceitos de Faraday, ele deu toda a base da eletrodinâmica. Os estudos sobre eletromagnetismo seguiram progredindo e em seguida veio a descoberta de Thompson, o elétron e depois a descoberta do efeito Zeeman. Todas essas descobertas começaram a evidenciar as inconsistências da física clássica. Pierre Curie, baseado nos conhecimentos da termodinâmica, iniciou os seus estudos sobre as propriedades termodinâmicas das substâncias. A famosa lei de Curie pode ser explicada teoricamente por Langevin com modelos clássicos e a estatística de Maxwell-Boltzmann. Com o surgimento da mecânica quântica, no século XX, tornou-se possível o entendimento do magnetismo. Atingindo esse entendimento, o desenvolvimento da mecânica estatística e da termodinâmica quântica, foram facilitados principalmente quanto aos fenômenos cooperativos. Do ponto de vista clássico, duas importantes contribuições surgiram: Primeiramente o surgimento da teoria moderna do magnetismo com o conceito de campo molecular de Weiss e a famosa lei de Curie-Weiss, que foi seguida pela maioria dos sistemas magnéticos, mesmo que o valor do campo molecular não tivesse explicação clássica. Em segundo lugar veio o Teorema de Van Leeuwen que dizia “Classicamente a qualquer temperatura, campos magnéticos e elétricos, a magnetização total de um conjunto de elétrons em equilíbrio térmico é identicamente nula”, demonstrado e utilizando-se as equações de Maxwell e a estatística de Boltzmann. Isso significa que a física clássica não pode ser explicada pela física clássica mas sim pela física quântica. A mecânica quântica antiga foi capaz de explicar a origem dos momentos magnéticos atômicos com o modelo de Bohr. Ela estabeleceu a unidade fundamental do momento magnético, o magneton do Bohr que é dado pela equação:

$$\mu_B = \frac{eh}{2mc} \quad (1)$$

A nova Mecânica Quântica com as fórmulas de ondulatória de Schrödinger e fórmulas matriciais de Heisenberg e finalmente a formulação relativista de Dirac foram responsáveis por estabelecer uma base que teve uma aplicação de sucesso em sólidos e na mecânica estatística. Baseados nesses conceitos, Pauli, Heisenberg e Dirac descreveram o spin do elétron com  $g=2$ , o ferromagnetismo e a origem do campo de Weiss com a interação de troca  $S_i \cdot S_j$ . Transcorreram mais 4 anos e nesse tempo, Hartree, Fock, Heitler, London, Slater, Van Vleck e outros cientistas foram capazes de calcular a nível atômico e molecular e solucionar quase todos os problemas pendentes como dados espectroscópicos, as regras de Hund, os momentos magnéticos dos átomos e íons, o efeito Zeeman, e outras. Em seus estudos, Weiss explicou, em nível macroscópico, o porquê do ferro não ser magnético no seu estado natural. Além disso, explicou a curva de histerese magnética utilizando o movimento das paredes de domínio que posteriormente foi confirmado na experiência realizada por Barkhausen.

## 2.1 CAMPO ELÉTRICO E MAGNÉTICO

### 2.1.1 – CAMPO ELÉTRICO

Sempre que temos uma carga elétrica ou uma variação, no tempo, de um campo magnético, estaremos na presença de um campo elétrico. Analisando os casos estáticos (referentes a cargas elétricas estacionárias), veremos que na presença de um campo elétrico formado por um conjunto de cargas estacionárias, qualquer carga que seja aproximada desse campo sofrerá a ação do mesmo através da força elétrica. A intensidade dessa força elétrica (ou vetor força elétrica) é dado pela equação:

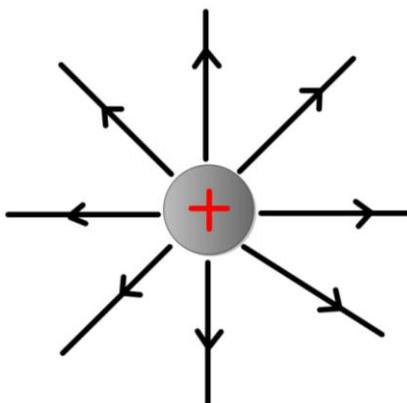
$$\vec{F} = \vec{E} \cdot q \quad (2)$$

onde :

- $\vec{F}$  – é o vetor FORÇA ELÉTRICA;
- $q$  – carga elétrica de prova
- $\vec{E}$  – é o vetor CAMPO ELÉTRICO;

Carga elétrica de prova é um corpo com carga muito pequena. Esse valor deve ser muito pequeno para garantir que o campo elétrico gerado por essa carga, não influencie de forma significativa a distribuição de carga que cria o campo elétrico que está sendo analisado. A partir dessa carga de prova, é possível determinar a característica do campo analisado. Ou seja, se aproximamos de um campo uma carga de prova positiva e essa sofre uma força de repulsão, é possível dizer que estamos na presença de um campo elétrico positivo. Se ela for atraída, podemos afirmar que se trata de um campo elétrico negativo. Não esquecer que cargas de mesmo sinal se repele e de sinais contrários se atraem. O campo elétrico é composto por um conjunto de linhas de força que tem origem no polo positivo e se deslocam até o polo negativo. Uma forma simplificada de representação dessas linhas de campo para possibilitar a visualização da direção e do sentido desse campo. Essa representação, obedecendo uma convenção, permite determinar de forma comparativa a diferença de intensidade de dois campos diferentes. Pela convenção, 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.

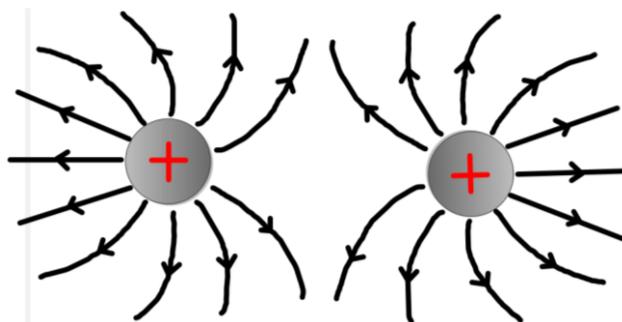
Figura 1- Carga Pontual (positiva)



Fonte: Autor,2022.

A carga pontual da Figura 1, as linhas de campo se estendem 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.

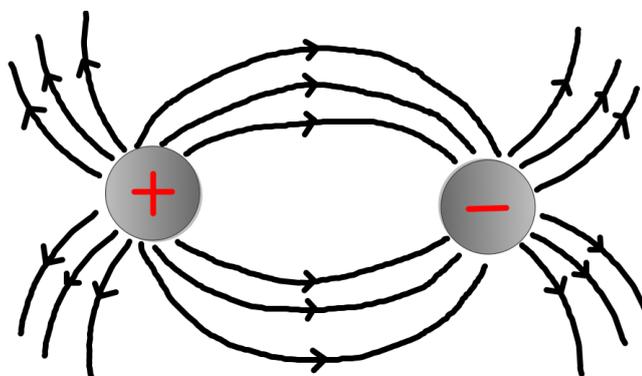
Figura 2- Duas cargas pontuais de mesmo sinal



Fonte: Autor,2022.

Nesse caso da Figura 2 as linhas de campo, mostram a repulsão das duas cargas, pois as cargas possuem mesmo sinal positivo. Nas áreas em branco o campo elétrico é nulo.

Figura 3- Duas cargas pontuais de sinais diferentes



Fonte: Autor,2022.

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. Para melhor entender o comportamento das cargas elétricas Coulomb passou a estudar e experimentar as reações de corpos carregado eletricamente.

### 2.1.2 - LEI DE COULOMB

Entre 1785 e 1791, Charles Augustin de Coulomb, pesquisou as interações entre cargas elétricas. Ele utilizou um equipamento chamado balança de torção. Balança de torção é um equipamento, construído por Coulomb e podia fazer medições

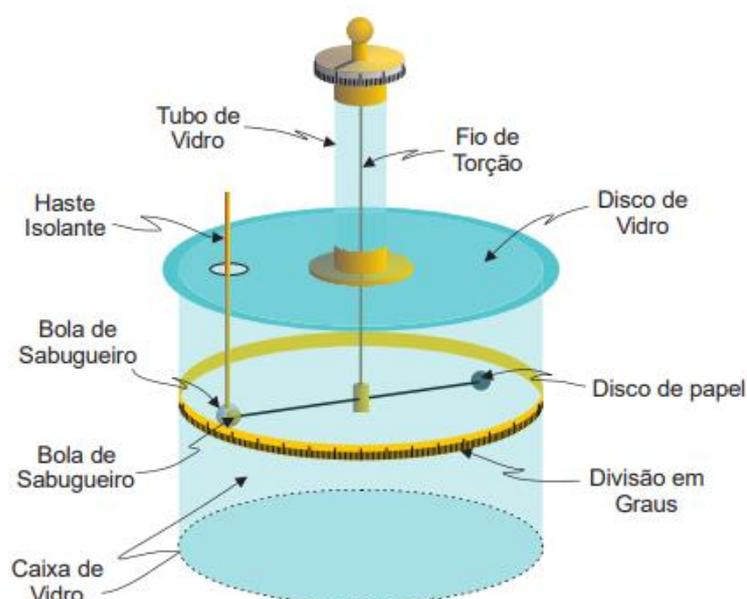
da força de atração ou repulsão entre duas esferas eletricamente carregadas. A balança consiste de uma haste suspensa por um fio tendo em cada uma das extremidades uma esfera. Uma terceira esfera presa em uma haste e também eletrizada é aproximada das outras duas. Devido a força elétrica que ocorre pela interação entre as esferas carregadas, a haste gira e provoca uma torção no fio. Quando medimos o ângulo de giro, Coulomb conseguia determinar a força entre as esferas. Coulomb repetiu diversas vezes o experimento e acabou concluindo que a força elétrica é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre as duas esferas. Ele também concluiu que a força elétrica era proporcional ao produto das cargas elétricas das duas esferas. Com isso, ele determinou a equação da força elétrica exercida pela interação entre duas esferas carregadas, conforme podemos ver na Figura 4.

$$F = k \frac{|q_1 \cdot q_2|}{r^2} \quad (3)$$

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (4)$$

$$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2} \quad (5)$$

Figura 4- Balança de Torção de Coulomb



Fonte: Autor, 2022.

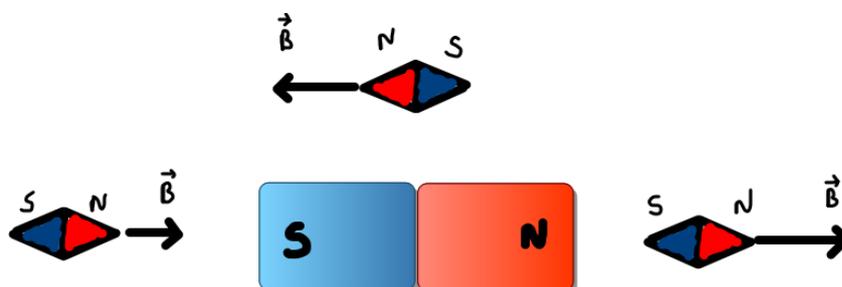
- Constante eletrostática =  $8,99 \times 10^9 \text{ N.m}^2 / \text{C}^2$
- Permissividade do vácuo =  $8,854 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{N.m}^2$

### 2.1.3 – CAMPO MAGNÉTICO

Em 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.



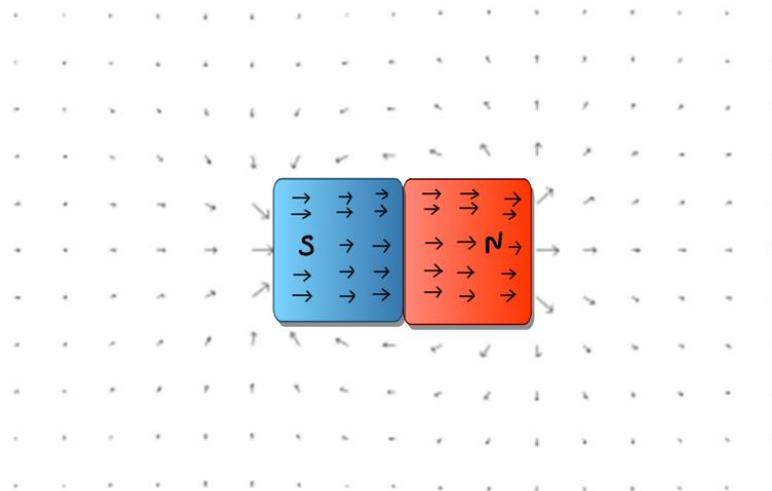
Fonte: Autor,2022.

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 6. As linhas de indução são em cada ponto tangentes ao vetor  $\vec{B}$ . É costume orientar as

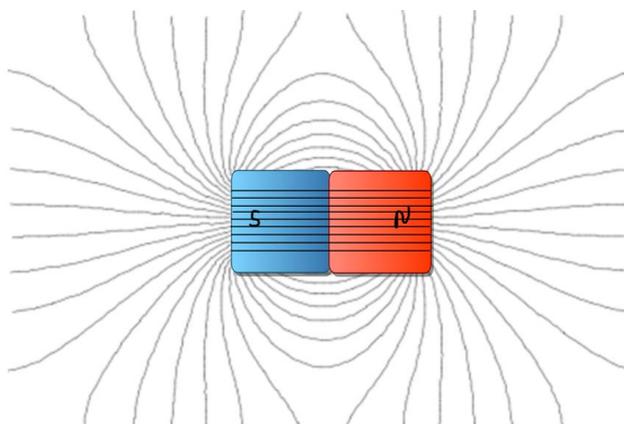
linhas de indução no sentido do vetor  $\vec{B}$ . Deste modo dizemos que as linhas de indução partem do pólo norte e chegam no pólo sul. Onde as linhas de indução estão mais próximas, o campo magnético é mais intenso. Assim, o vetor indução  $\vec{B}$  é mais intenso no ponto A do que no ponto C.

Figura 6- Diagrama do campo vetorial para uma barra magnética (ímã).



Fonte: Autor, 2022.

Figura 7- Diagrama das linhas de campo para uma barra magnética (ímã).



Fonte: Autor, 2022.

Um campo magnético, onde em todos os pontos o vetor indução magnética tem a mesma intensidade, mesma direção e mesmo sentido, é chamado campo magnético uniforme. As linhas de indução de um campo magnético uniforme são retas paralelas igualmente orientadas e igualmente espaçadas. Na Figura 7 podemos identificar um campo magnético originado por um ímã em barra, as linhas de campo próximo ao ímã

possuem uma intensidade maior de atração, quanto maior a distância da linha de campo mais enfraquecido fica esta atração e conseqüentemente objetos não são atraídos com mesma facilidade.

## 2.2 EQUAÇÕES DE MAXWELL

Tradicionalmente as equações de Maxwell são apresentadas ao estudante na ordem cronológica em que foram descobertas ao longo do desenvolvimento da teoria eletromagnética. As quatro equações de Maxwell são as seguintes:

$$\text{rot } \mathbf{h} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{d}}{\partial t} \quad (6)$$

$$\text{rot } \mathbf{e} = -\frac{\partial \mathbf{b}}{\partial t} \quad (7)$$

$$\text{div } \mathbf{b} = 0 \quad (8)$$

$$\text{div } \mathbf{d} = \rho \quad (9)$$

As equações (6), (7), (8) e (9) são, respectivamente, a Lei generalizada de Ampère, Lei de Faraday, Lei de Gauss Magnética e a Lei de Gauss Elétrica. Os quatro vetores  $\mathbf{h}$ ,  $\mathbf{e}$ ,  $\mathbf{b}$  e  $\mathbf{d}$  juntos formam a representação matemática do mesmo fenômeno físico: o campo eletromagnético. Das equações acima podemos deduzir outra equação aplicando o divergente na equação (6):

$$\text{div}(\text{rot } \mathbf{h}) = \text{div} \left( \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{d}}{\partial t} \right) \quad (10)$$

Como  $\text{div}(\text{rot } \mathbf{h}) = 0$ , obtemos:

$$0 = \text{div} \mathbf{j} + \text{div} \frac{\partial \mathbf{d}}{\partial t} \quad (11)$$

Utilizando a equação (9), obtemos a chamada equação da continuidade elétrica:

$$\text{div } \mathbf{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (12)$$

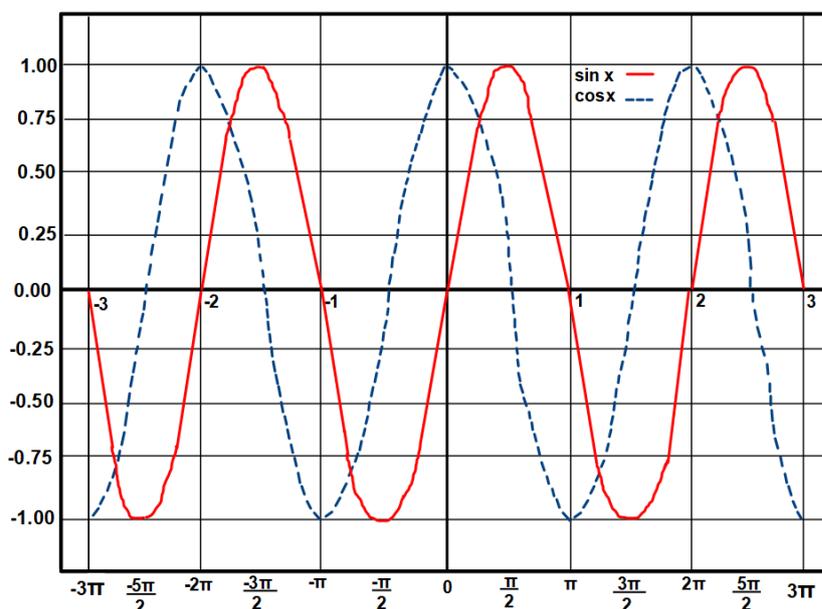
As equações de Maxwell justificam-se basicamente pelo o fato de serem conclusões baseadas em experimentações. As equações (6) e (7) significam que os campos magnéticos e elétricos estão variando com o tempo são capazes de gerar um ao outro, ou seja, um campo magnético variável é capaz de gerar um campo elétrico e vice-versa.

Na equação (8), o fato do divergente ser igual a zero significa que o fluxo magnético é conservativo. Pode-se entender então que o fluxo magnético que entra em um volume idêntico ao que sai do mesmo. Já na equação (9), o fluxo elétrico não é conservativo. Teremos, então, uma variação do fluxo que entra e sai de um volume que é gerada por uma fonte que no caso é  $\rho$ .

## 2.3 ONDA SENOIDAL

Uma onda senoidal ou sinusóide é uma curva matemática que descreve uma oscilação periódica suave. Uma onda senoidal é uma onda contínua. É nomeado após a função seno, da qual é o gráfico. Ocorre com frequência em matemática pura e aplicada, bem como em física, engenharia, processamento de sinais e muitos outros campos. Sua forma mais básica em função do tempo (t) é:

Figura 8 - Os gráficos das funções seno (vermelho sólido) e cosseno (azul pontilhado) são sinusóides de diferentes fases.



Fonte: Autor, 2022.

$$y(t) = A \sin(2\pi f t + \varphi) = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (13)$$

Onde:

- A: amplitude, o desvio de pico da função de zero.

- $F$ : frequência normal, o número de oscilações(ciclos) que ocorrem a cada segundo de tempo.
- $\omega = 2\pi f$ , frequência angular, a taxa de mudança do argumento da função em unidades de radianos por segundo.
- $\varphi$ : fase, específica (em radianos) onde em seu ciclo a oscilação está em  $t=0$ .

Quando  $\varphi$  é diferente de zero, toda a forma de onda parece ser deslocada no tempo pela quantidade  $\varphi/\omega$  segundos. Um valor negativo representa um atraso e um valor positivo representa um avanço. A onda senoidal importante em física porque retém sua forma de onda quando adicionada a outra onda senoidal de mesma frequência e fase e magnitude arbitrárias. É a única forma de onda periódica que possui essa propriedade. Esta propriedade aumenta sua importância na análise de Fourier e a torna acusticamente única. A Figura 8 representa o gráfico da função seno que é limitado entre o intervalo  $[-1,1]$  e possui partes crescentes e partes decrescentes. Ele é conhecido também como senoide. Dentro do gráfico podemos verificar também a função cosseno que está contido no intervalo de  $[-1,1]$  e também possui comportamento periódico, assim como a função seno, com intervalos crescentes e decrescentes.

## Forma Geral

Em geral, a função também pode ter:

- Uma variável espacial  $x$  que representa a posição na dimensão em que a onda se propaga, e um parâmetro característico  $k$  chamado número de onda (ou número de onda angular), que representa a proporcionalidade entre a frequência angular  $\omega$  e a velocidade linear (velocidade de propagação)  $v$ ;
- Uma amplitude central diferente de zero,  $D$  qual é  
 $y(x, t) = A \sin(kx - \omega t + \varphi) + D$ , se a onda está se movendo para direita;  
 $y(x, t) = A \sin(kx + \omega t + \varphi) + D$ , se a onda está se movendo para esquerda;

O número de onda é relacionada com a frequência angular por:

$$k = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi f}{v} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (14)$$

Onde  $\lambda$  (lambda) é o comprimento de onda,  $f$  é a frequência, e  $v$  é a velocidade linear.

Esta equação fornece uma onda senoidal para uma única dimensão: assim, a equação generalizada fornecida acima fornece o deslocamento da onda em uma posição  $x$  no tempo  $t$  ao longo de uma única linha. Isso poderia, por exemplo, ser considerado o valor de uma onda ao longo de um fio.

### 3 TEORIA DAS ANTENAS

Antenas são dispositivos que tem como principal função transformar ondas guiadas em linhas de transmissão em ondas não guiadas, além disso, podem transmitir e receber informações a curtas ou longas distâncias. As antenas internas e externas são indispensáveis no desenvolvimento dos sistemas de comunicações sem fio. Atualmente, as antenas internas integram diversos aparelhos eletrônicos portáteis, tais como, *smartphones*, *tablets*, *smartwatches*, notebooks, entre outros aparelhos de uso pessoal. As antenas podem ser classificadas conforme a sua construção física.

Alguns tipos de antenas simples incluem as antenas de fio, refletoras, de abertura e antenas planares. As antenas planares de microfita têm despertado o interesse de pesquisadores, pois apresentam um conjunto de vantagens, quando comparadas a outros tipos de antenas, tais como: apresentam estruturas simples, baixo custo e facilidade de fabricação, possuem dimensões reduzidas, são leves e moldáveis em superfícies planas e curvas. Estas antenas são em grande parte compatíveis com os atuais padrões de comunicações sem fio do IEEE802.11.

Os primeiros trabalhos publicados a respeito das antenas de microfita datam de 1953, com Deschamps nos Estados Unidos; de 1955, com Gutton e Baissinot na França. Porém, as pesquisas sobre essas antenas planares ganharam força apenas 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.

Antenas de microfita são formadas basicamente por um elemento irradiante, alimentado por uma linha de microfita ou por cabo coaxial, e um plano de terra separado do elemento irradiante por um substrato dielétrico. Dentre as antenas de microfita, destacam-se: patch, monopolo impresso, F-invertido planar (PIFA), L-

invertido planar (PILA), antenas slots, etc. Nas seções seguintes serão abordadas as principais características das antenas.

### 3.1 CONCEITO DE UMA ANTENA

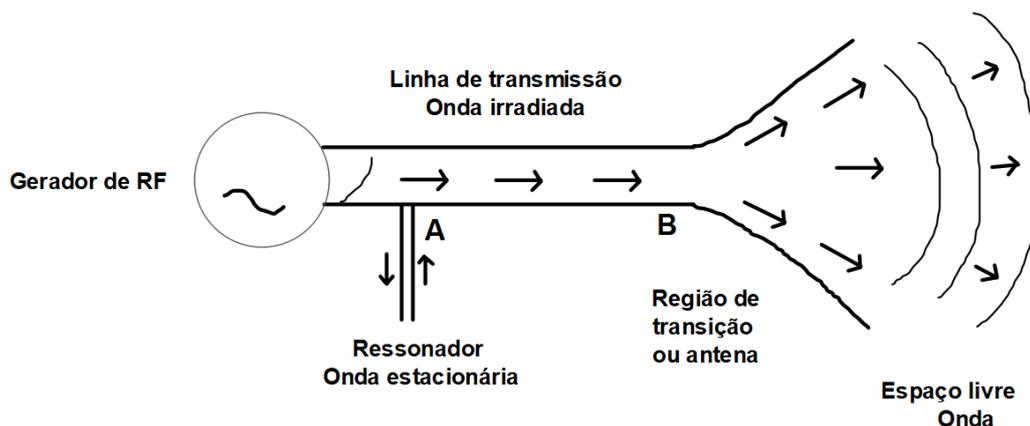
Para comunicações sem fio, o transmissor deve ser conectado a um componente que irradie a frequência de rádio sobre condições desejadas, e do lado da recepção outro componente que capture esta irradiação nas mesmas condições. Estes componentes irradiando são chamadas antenas. A palavra antena tem origem latina e significa uma vara muito flexível. A antena não é uma invenção humana, mas foi usada por milhões de anos por lagostas, camarões e numerosos insetos como sensor no formato de uma vara flexível. Foi o físico russo Popov quem iniciou o uso desta palavra para a sua invenção de um detector de tempestades atmosféricas; após isto, todos os físicos utilizando a equação de Maxwell adotaram esta expressão.

Uma antena pode ser classificada como uma estrutura metálica associada a uma região de transição entre uma onda guiada e uma onda no espaço livre, e/ou vice versa. Ou seja, uma antena é um transdutor de ondas que se propagam em meios confinados, tais como cabo coaxiais, guias de onda, linhas bifilares, enfim, linhas de transmissão e a propagação no espaço livre, que possui como meio de propagação o ar ou o vácuo.

Uma maneira simples de representar uma antena, é uma linha de transmissão com sua extremidade em aberto. A figura abaixo ilustra um gerador conectado a dois fios, e assim, formando uma linha de transmissão AB. Supondo que existe um casamento entre o transmissor e a linha, a onda é guiada em um meio confinado até atingir o ponto B onde os fios se separam gradualmente e com isto espalham a energia até então guiada. Quando os fios já estiverem separados de muitos comprimentos de onda, a onda guiada transforma-se em onda irradiada no espaço livre. Esta região de transição pode ser considerada uma antena, conforme exemplificado pela Figura.

Percebe-se que a definição de antenas mostrada é bastante simples. Entretanto existem provas matemáticas, muito mais complexas, que comprovam como uma antena irradia no espaço livre.

Figura 9- um gerador conectado a dois fios, e assim, formando uma linha de transmissão AB.



Fonte: Autor,2022.

### 3.2 TIPOS DE ANTENAS

A quantidade e a variedade dos tipos de antenas são extremamente grandes. O objetivo é mostrar as principais geometrias e suas características básicas. Em geral, a classificação das antenas é feita a partir dos seus parâmetros básicos já definidos previamente, de forma que pode-se enquadrá-las em mais de uma categoria. A conceituação dos diversos tipos de antenas é muito ampla e neste texto adotaremos uma divisão bastante simplificada (mas não menos abrangente) em duas grandes famílias ou tipos de antenas onde podem ser classificadas as antenas que desejamos estudar.

Antenas de condutores lineares, ou simplifiadamente antenas lineares tem a propriedade de apresentarem a dimensão transversal dos elementos condutores que radiam RF como uma fração (número  $\ll 1$ ) do comprimento de onda da frequência de operação, por exemplo em FM na frequência de 100 Mhz, o comprimento de onda vale 3 metros (ou 3000 mm), a seção transversal de um anel de FM em linha rígida de 1 5/8" (= 41,3 mm) vale 0,01376 comprimentos de onda. Esta matemática, quando satisfeita, permite simplificar a análise da antena em termos eletromagnéticos e aproximar as correntes que circulam na antena como sendo apenas correntes de natureza linear e unidimensionais, facilitando sobremaneira a determinação das equações de campo e as propriedades de radiação da antena em análise.

A categoria de antenas de condutores lineares recaem os tipos de antenas conhecidas como: yagi, log periódica, painel de dipolos (MO=meia onda, OC=onda completa, X=dipolos cruzados), painel H (ou duplo delta), superturnstile, anel de FM,

seta de FM. Antenas de abertura por sua vez estabelecem um mecanismo de radiação de energia de RF onde as correntes se distribuem em uma área ou abertura no espaço que determinam campos eletromagnéticos de natureza mais complexa e mais difíceis de serem analisados matematicamente quando comparados ao caso anterior. Para o caso de antenas de abertura o que se faz é determinar as propriedades dos campos elétrico e magnético na abertura de radiação da antena e à partir daí determinar as demais propriedades de radiação da antena em análise.

Existe também a categoria de antenas de abertura recaem os tipos de antenas conhecidas como: parabólica e slot (ou antena de fendas).

### **3.3 PARÂMETROS FUNDAMENTAIS DE ANTENAS**

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.

#### **3.3.1 DIAGRAMA DE IRRADIAÇÃO**

O diagrama de irradiação de uma antena é definido como uma função matemática das propriedades de irradiação em função das coordenadas espaciais esféricas. As propriedades de irradiação são representadas na forma de um gráfico, e incluem: diretividade, ganho, intensidade de campo, intensidade de irradiação, largura de feixe, relação frente/costas. 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.

### 3.3.2 LARGURA DE FEIXE

A largura de feixe é um parâmetro associado ao diagrama de irradiação de uma antena. Trata-se de um parâmetro definido com o ângulo entre dois pontos idênticos e em lados opostos do máximo do diagrama de irradiação. Há vários tipos de largura de feixe, sendo que, o mais utilizado é o HPBW (*Half Power Beam Width* – Largura de Feixe de Meia Potência). Os pontos onde o diagrama atinge a metade de sua potência são identificados a partir do ponto de máximo do lóbulo principal do diagrama. Quando o diagrama de irradiação é traçado em escala linear, os pontos que indicam meia potência são marcados em 0,5. Para os diagramas de irradiação apresentados em escala logarítmica são marcados os pontos em -3,0 dB.

O diagrama de irradiação traçado em escala linear é geralmente utilizado para representar diagramas com lóbulos secundários e traseiro reduzidos, com isso, pode-se observar com mais detalhes a direção de irradiação do lóbulo principal. A escala logarítmica do diagrama de irradiação possibilita observar tanto o lóbulo principal quanto o lóbulo traseiro. Com isso, pode-se obter o parâmetro relação frente/costa da antena em dB.

### 3.3.3 GANHO

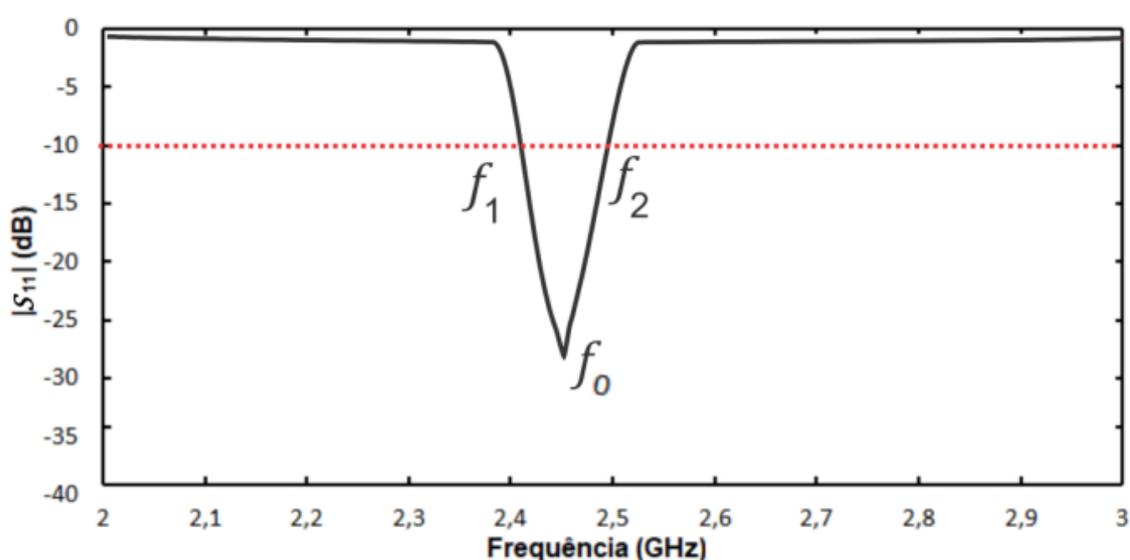
O ganho é um parâmetro utilizado para descrever o desempenho de uma antena em relação a outra antena de referência. Quando o ganho de uma antena é medido em relação à uma antena isotrópica, o valor do ganho é medido em (dBi); quando o ganho é medido em relação à uma antena dipolo, o valor do ganho é 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 radiação.

Em geral, o ganho medido para antenas do tipo patch é 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, deve-se ao fato de que a antena monopolo impresso irradia em duas direções, enquanto que, a antena patch apenas irradia em uma direção.

### 3.3.4 LARGURA DE BANDA

A largura de banda de uma antena é um parâmetro importante para descrever a eficiência da antena. A largura de banda pode ser dada em termos de sua frequência de ressonância central,  $f_0$ . 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 10.

Figura 10- Definição de largura de banda.



Fonte: Augusto, 2019.

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

$$BW = f_2 - f_1 \quad (15)$$

$$BW(\%) = \frac{f_2 - f_1}{f_c} 100 \quad (16)$$

No Capítulo 4 é apresentado um estudo da geometria fractal, alguns dos tipos de fractais encontrados na natureza e gerados por computação através de métodos matemáticos, além das principais características dos fractais, são descritos os

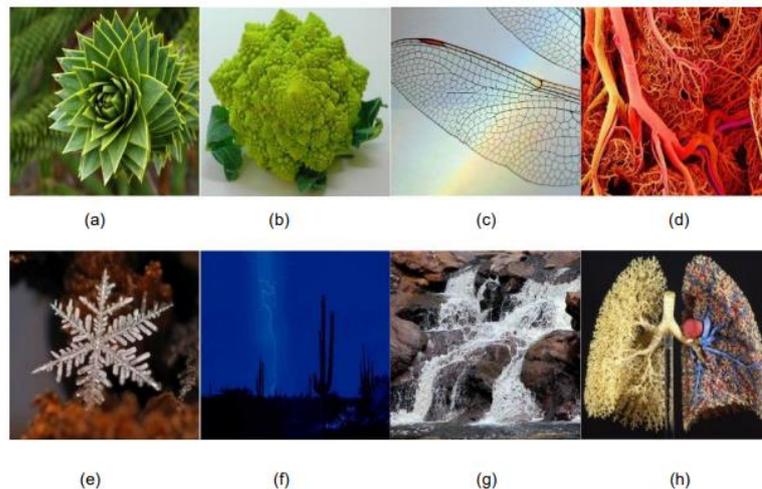
principais parâmetros fractais, os métodos de geração fractais e as aplicações dos fractais em antenas de microfita.

#### 4 GEOMETRIA FRACTAL

O termo fractal foi definido em 1975 pelo matemático Benoit Mandelbrot. Este termo vem do adjetivo em latim *fractus*, que significa: quebrados e irregulares. Os fractais são formas complexas cuja propriedade principal é a autossimilaridade em diferentes escalas e em toda sua estrutura geométrica. Em grande parte, o estudo da geometria fractal é baseado em observações da natureza na busca de descrever com precisão certos fenômenos naturais, que não podem ser caracterizados com o uso da geometria Euclidiana. “Nuvens não são esferas, montanhas não são cones, linhas costeiras não são círculos, a casca do ovo não é lisa, nem o raio viaja em linha reta”.

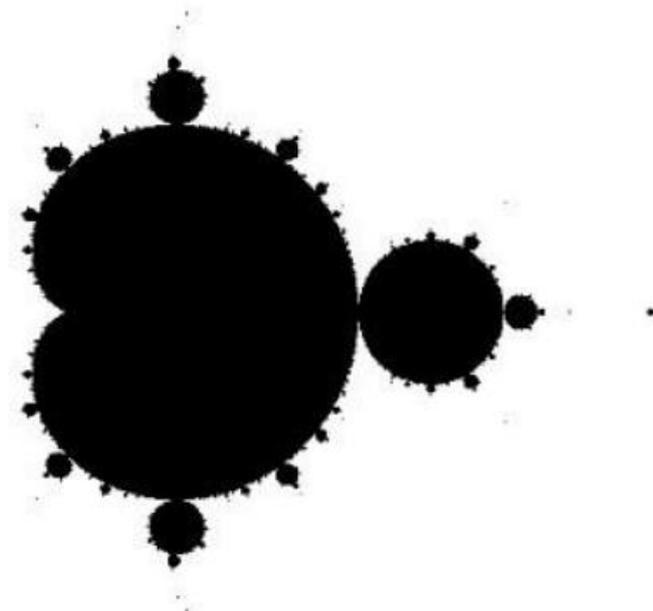
Os fractais naturais, como os representados na Figura 11, já despertavam a curiosidade e intrigavam os cientistas e matemáticos na busca por formas aproximadas para suas descrições, bem antes que o termo fractal fosse definido por Mandelbrot. Com o auxílio da computação, Mandelbrot conseguiu gerar os primeiros fractais a partir de implementações de equações recorrentes em variáveis complexas. Um exemplo desses fractais é o conjunto de Mandelbrot ilustrado na Figura 12. Desde então, vários matemáticos desenvolveram outros tipos de fractais, com auxílio do computador, por exemplo: a samambaia de Barnsley, ilustrada na Figura 13; o fractal ilha de Minkowski, ilustrado na Figura 14.

Figura 11- Exemplos de fractais naturais: a) flor de araucária; b) brócolis; c) asas de libélula; d) vasos sanguíneos; e) floco de neve; f) raio; g) cachoeira; h) vasos pulmonares.



Fonte: MDIG, 2022.

Figura 12- Fractal conjunto de Mandelbrot.



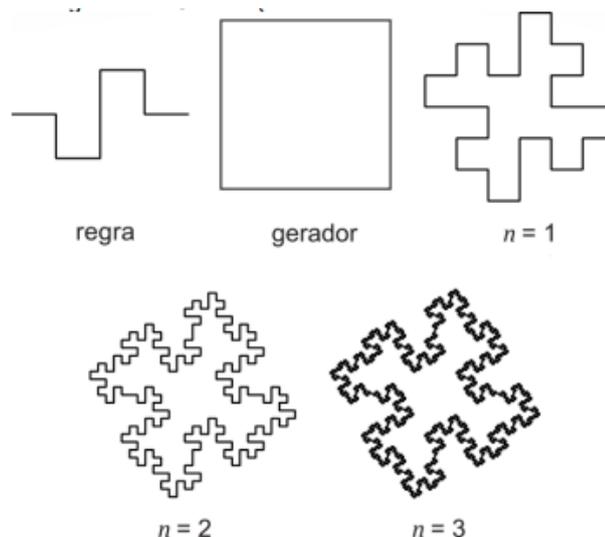
Fonte: MANDELBROT, 1975.

Figura 13- Fractal samambaia de Barnsley.



Fonte: BARNSELY SAMAMBAIA, 2022.

Figura 14- Construção do fractal ilha de Minkowski.



Fonte: Augusto, 2019.

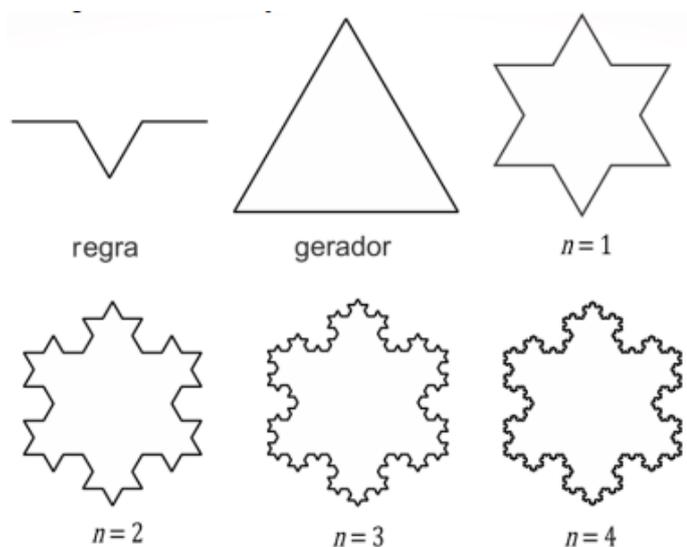
#### 4.1 CONCEITO E DEFINIÇÕES

Existem diferentes tipos de fractais, bem como suas classificações. Por exemplo, os fractais ilustrados na seção anterior são classificados como: naturais, determinísticos, geométricos. Os fractais são classificados também quanto ao padrão de autossimilaridade presente em sua formação. Por exemplo, os fractais geométricos são classificados como fractais de autossimilaridade exata, pois apresentam a mesma semelhança independente da escala de observação. O fractal conjunto de Mandelbrot e o fractal de Lyapunov são classificados como fractais determinísticos ou fractais de fuga do tempo, ou seja, são fractais com quase autossimilaridade, com semelhança inexata em diferentes escalas. Contudo, há também os fractais com autossimilaridade estatística, por exemplo, o voo de Lévy. Esse tipo de fractal apresenta um padrão aleatório com pouca ou nenhuma forma evidente de autossimilaridade.

Os fractais geométricos são conhecidos por serem gerados a partir de uma figura Euclidiana e uma regra de substituição geométrica, tal qual, o floco de neve de Koch, Figura 15. Este fractal é gerado a partir da substituição da curva de Koch (regra) nos lados da geometria triangular (gerador). A regra de Koch representa um triângulo com  $1/3$  do comprimento do lado da geometria geradora. Assim, ao substituir a curva de Koch em cada lado do gerador, tem-se o fractal de nível,  $n = 1$ , semelhante a

estrela de Davi. A repetição desse processo com  $n = \infty$  e fator de escala,  $s = 1/3$ , resulta o fractal conhecido como floco de neve de Koch.

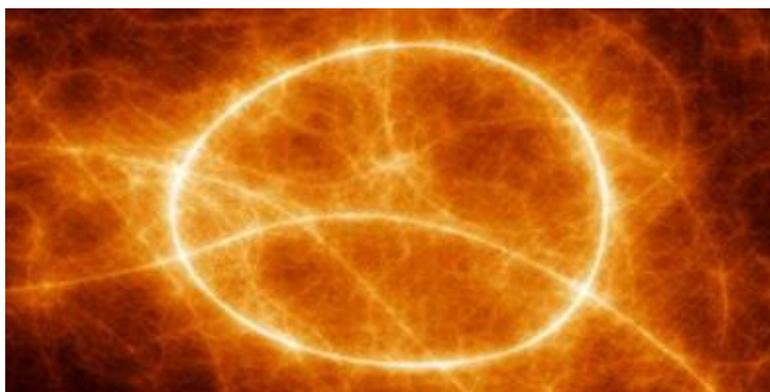
Figura 15- Construção do fractal floco de neve de Koch.



Fonte: Augusto, 2019.

Os fractais aleatórios são gerados através de processos estocásticos, ou seja, produzidos recursivamente em um sistema não linear ou por implementação computacional. Um exemplo clássico desse fractal é o fractal textura de Perlin, Figura 16, que representa a complexidade de diversos tipos de texturas encontradas na natureza, tais como: pedras, madeiras, fogo, fumaça, água, nuvens, entre outras. Essas formas especiais podem ser obtidas por meio de equações matemáticas, que reproduzem um tipo especial de “ruído semi-aleatório”, que são convertidos em imagens no computador.

Figura 16- Fractal textura de Perlin.

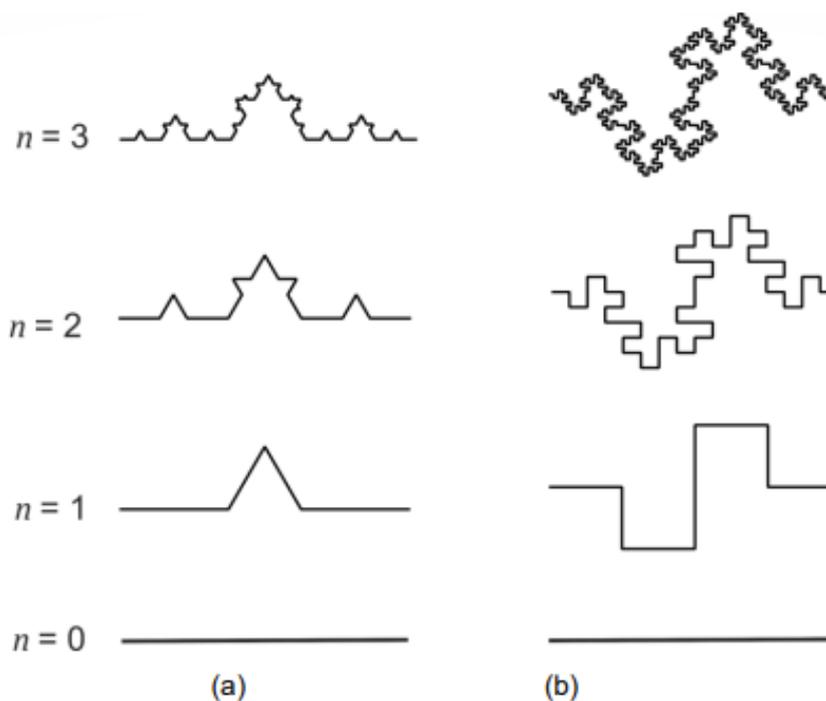


Fonte: Grupo Fractarte, 2022.

## 4.2 EXEMPLOS DE FRACTAIS

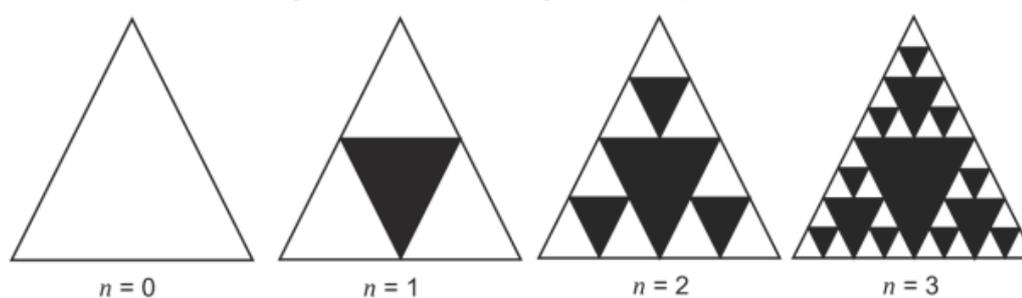
Como explicado acima existem diversos tipos de fractais e classificações de fractais. Bem como, há intersecção de alguns tipos em mais de uma classe. Por exemplo: a curva de Koch e de Minkowski são fractais geométricos 1-D, que tem como gerador um segmento de reta, Figura 17. A ilha de Minkowski apresentada na seção anterior é um exemplo de fractal geométrico 2-D, com gerador quadrado; o fractal geométrico triângulo de Sierpinski (Figura 18), tem como gerador um triângulo equilátero. Existem também os fractais 3- D, por exemplo, o fractal esponja de Menger ilustrado na Figura 19, cujo gerador é um cubo.

Figura 17- Diferentes níveis da curva fractal (a) Koch, (b) Minkowski.



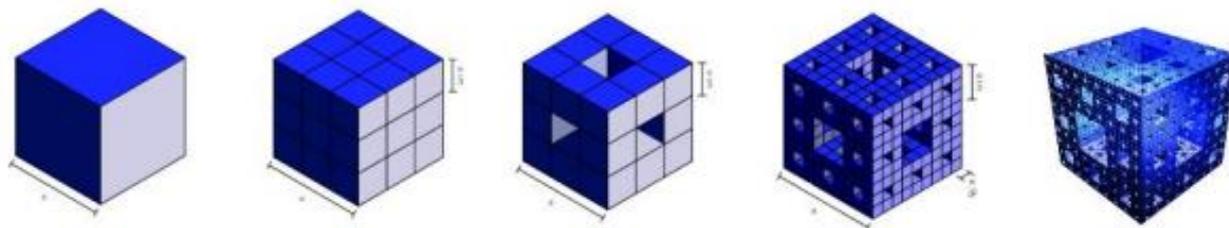
Fonte: Augusto, 2019.

Figura 18- Fractal triângulo de Sierpinski.



Fonte: Augusto, 2020.

Figura 19- Fractal esponja de Menger formado a partir de um cabo.



Fonte: Elizabeth, 2019.

### 4.3 MÉTODOS DE GERAÇÃO DE FRACTAIS

Existem três categorias principais de formas fractais: os fractais geométricos (possuem regras fixas de substituição geométrica); os definidos por uma relação de recorrência em cada ponto do espaço; e os fractais aleatórios. Os principais métodos usados para geração dos fractais geométricos são o Sistema de Funções Iteradas (IFS) e o Sistema de Lindenmayer (Sistema-L). Podemos encontrar na literatura diversas aplicações de fractais nas mais diversas áreas, tendo aplicações nas ciências humanas, exatas e biológicas. Na engenharia eletrônica e de telecomunicações por exemplo, diversos tipos de geometria fractais estão sendo utilizadas em filtros de linha acoplada, arranjos de FSS, projeto de antenas, dentre outros por apresentarem comportamento multibanda e permitirem a miniaturização de dispositivos. Nos tópicos abaixo, serão detalhadas de forma mais explicativa cada um dos métodos citados acima.

#### 4.3.1 SISTEMA DE LINDENMAYER

O biólogo alemão Aristid Lindenmayer propôs o sistema-L, pela primeira vez em 1968, para descrever precisamente, por meios de padrões, o crescimento de plantas e o desenvolvimento de organismos multicelulares. Este método trata-se de um texto livre e recursivo de substituição de letras ou símbolos por uma regra, seguidos de uma interpretação geométrica a partir de um programa gráfico. As regras podem ser representadas por cadeias de caracteres e armazenar toda a informação gráfica necessária para a formação de um fractal de sistema-L.

Em termos práticos, conhecendo-se a informação para construir um fractal, que está armazenada em uma cadeia de caracteres específica, pode-se realizar uma

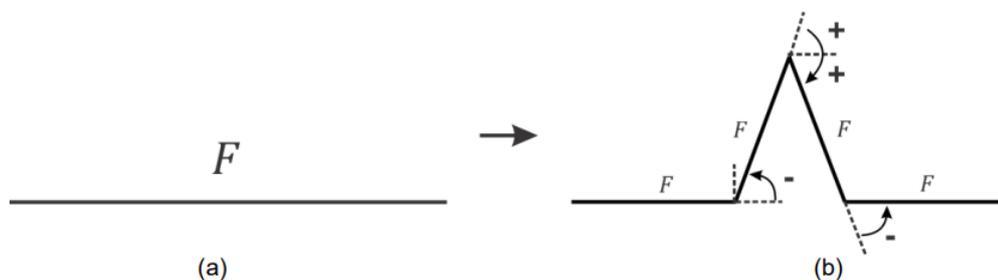
leitura e a transformação em comandos gráficos para desenho diversos tipos de figuras fractais. Nesta seção são adotadas as seguintes representações dos comandos gráficos nas cadeias de caracteres:

- Segmentos de reta são representados por letras maiúsculas do alfabeto, por exemplo, 'F';
- Um incremento negativo no ângulo, denotado por '-', representa uma variação angular no sentido anti-horário;
- Um incremento positivo no ângulo, denotado por '+', representa uma variação angular no sentido horário.

#### 4.3.1.1 CURVA DE KOCH GERADA PELO SISTEMA-L

Para a construção da curva fractal de Koch a partir do sistema-L, deve-se, a princípio, definir a geometria inicial (célula matriz) e em seguida estabelecer a regra de formação para a construção da cadeia de caracteres, que irá se ramificar até o limite de iteração para essa ramificação. Este processo pode ser interpretado da seguinte maneira: suponha que a geometria inicial é um segmento de reta de comprimento unitário, interpretada pelo sistema-L como um caractere (célula, 'F'). O próximo passo é dividir o segmento de reta em três partes iguais e substituir o segmento do meio por um triângulo equilátero sem a base. Desta forma, constrói-se um polígono e o próximo passo na definição do sistema-L é estabelecer a regra para geração da curva de Koch, Figura 20.

Figura 20- Geração da curva de Koch com uso do sistema-L: a) gerador; b) regra.



Fonte: Augusto, 2019.

Na Figura 20 (b), da esquerda para a direita, têm-se: um segmento de reta 'F' com um incremento no ângulo com sentido anti-horário '-'; um segmento 'F' seguido

de dois incrementos no ângulo com o sentido horário ‘++’; um segmento ‘F’; um incremento no ângulo com sentido anti-horário ‘-’; um segmento ‘F’. Assim, a regra para a geração da curva de Koch pode ser estabelecida por uma cadeia de caracteres: ‘F - F ++ F - F’.

O sistema-L reproduzirá a curva de Koch a partir de várias iterações, onde cada uma delas substituirá a célula matriz ‘F’ da iteração anterior por uma cadeia de caracteres ‘F - F ++ F - F’, ao mesmo tempo que preserva os demais caracteres ‘-’, e ‘+’. Esse processo irá se repetir até um número,  $n=1,2,3,\dots,N$  de iterações fractais:

Iteração  $n = 1$  tem-se: F;

Iteração  $n = 2$ , tem-se: F - F ++ F - F;

Iteração  $n = 3$ , tem-se: F-F++F-F-F-F++F-F++F-F++F-F-F-F++F-F;

Iteração  $n = N$ , tem-se: F-F ++F -F - ... -F-F ++F -F.

Na geração do fractal floco de neve de Koch o triângulo equilátero gerador é codificado no sistema-L por uma cadeia de caracteres definido da seguinte maneira: ‘F - -F - -F’.

#### 4.3.2 MÉTODO IFS PARA GERAÇÃO DE FRACTAIS

O sistema de funções iteradas (*Iterative Function System*) é um método baseado em uma série de transformações afins, para a geração de formas fractais. Para um fractal auto similar e independente de escala, sua geração começa com uma forma geradora, que neste caso, é a entrada para uma função de mapeamento; sua saída torna-se a entrada para a próxima iteração. Essa característica aliada às respectivas transformações afins caracterizam o método IFS para geração de fractais. O método IFS é baseado em transformações matemáticas, tais como: contração, reflexão, rotação e translação. Dessa forma, os fractais gerados pelo método IFS são definidos no limite do processo iterativo de um conjunto infinito de transformações afins,  $q(u)$ , que são aplicadas em uma figura arbitrária.

Para uma transformação,  $q: R^m \rightarrow R^m$ , da forma  $q(u) = T(u) + v$ , em que:  $T$  é uma transformação linear não-singular;  $u$  e  $v$  são vetores do  $R^2$ ;  $q$  é chamada de transformação afim. Portanto, uma transformação afim é a soma de uma transformação linear com uma translação, sendo portanto, não linear. Considere o caso de uma transformação afim  $q: R^2 \rightarrow R^2$ , a mesma pode ser escrita na forma matricial, apresentada na expressão (3.2):

$$q(x, y) = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix} \quad (17)$$

onde a, b, c e d são escalares;  $t_x$ , é o parâmetro relacionado a rotação;  $t_y$ , é o parâmetro relacionado a translação.

Considerando um conjunto inicial  $K \subset R^2$  e N contrações de  $q(i) : R^2 \rightarrow R^2$ , com fator de contração  $0 < a_i < 1$ , em que  $(i = 1, \dots, N)$ , determina-se  $q : R^2 \rightarrow R^2$  como sendo (3.3).

$$q(K) = \bigcup_{i=1}^N q_i(K) \quad (18)$$

Em que, a imagem da transformação é  $q_i(K) : q_i(x)|x \in K$ , quando aplicada aos vetores do conjunto de K. Um exemplo do fractal curva de Koch, gerado pelo método IFS, é apresentado na seção seguinte.

#### 4.3.2.1 CURVA DE KOCH GERADA PELO MÉTODO IFS

A obtenção da curva de Koch de interesse se dá a partir de quatro transformações afins de  $q_i : R^2 \rightarrow R^2$ , com  $i = 1, 2, 3, 4$ , realizadas em uma reta, de acordo com (3.4).

$$q(x, y) = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} \cos(\theta_i) & -\text{sen}(\theta_i) \\ \text{sen}(\theta_i) & \cos(\theta_i) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_{x_i} \\ t_{y_i} \end{pmatrix} \quad (19)$$

Em que,  $\theta_i$ ,  $t_{x_i}$  e  $t_{y_i}$ , são valores listados na Tabela 1. As quatro transformações de  $q_i$ , ilustradas na Figura 22, consistem de: uma contração  $q_1$  de 1/3 do seguimento de reta inicial;  $q_2$  é uma rotação de  $-\pi/3$  rad e uma translação de 1 unidade em x;  $q_3$  é uma rotação de  $\pi/3$  rad, uma translação de 3/2 unidades em x e  $\sqrt{3}/2$  unidades em y;  $q_4$  é uma translação de 2 unidades em x.

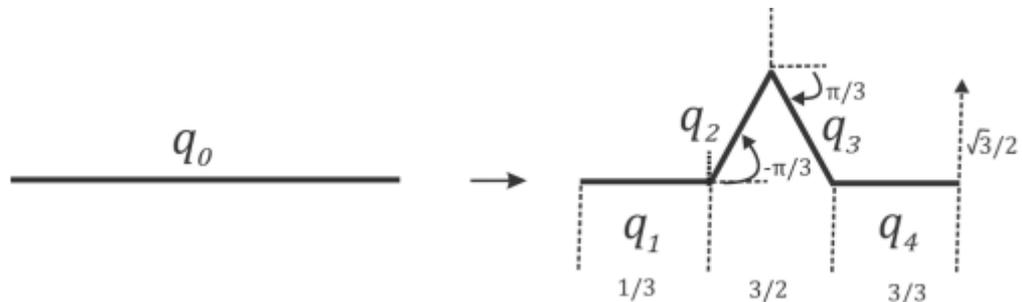
Tabela 1- Valores de  $\theta_i, t_{x_i}$  e  $t_{y_i}$  para geração da curva de Koch pelo método IFS.

$i$	$\theta_i$	$t_{x_i}$	$t_{y_i}$
1	0	0	0
2	$\pi/3$	1	0

3	$-\pi/3$	$3/2$	$\sqrt{(3)}/2$
4	0	2	0

Fonte: Augusto, 2019.

Figura 21- Curva de Koch pelo método IFS.



Fonte: Augusto, 2019.

Dado que  $K \subset \mathbb{R}^2$ , então têm-se que:

$$q(K) = \bigcup_{i=1}^4 q_i(K) \quad (20)$$

Dessa forma a curva de Koch é dada pelo limite (3.6) quando  $n$  tende ao infinito.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} q_n(K) \quad (21)$$

#### 4.4 A CURVA DE KOCH

A geometria fractal surgiu através do pesquisador Benoit Mandelbrot na década de 70, baseado em observações de figuras exóticas totalmente inspiradas na natureza, onde Mandelbrot explicou que era possível obter novas figuras a partir de outras figuras complexas por meio da auto similaridade, dado a dimensão exata dessas estruturas (figuras) (MANDELBROT, 1983). A priori, a geometria fractal foi muito utilizada para modelar formas geométricas difíceis, até então não explicadas por meio da geometria Euclidiana, tais como: as formas das galáxias, a forma da folha do brócolis e das samambaias, além de figuras geométricas geradas por computador, etc.

A geometria fractal pode ser definida com uma figura que apresenta auto repetição, sendo gerada por meio de um processo recursivo em que uma fração é

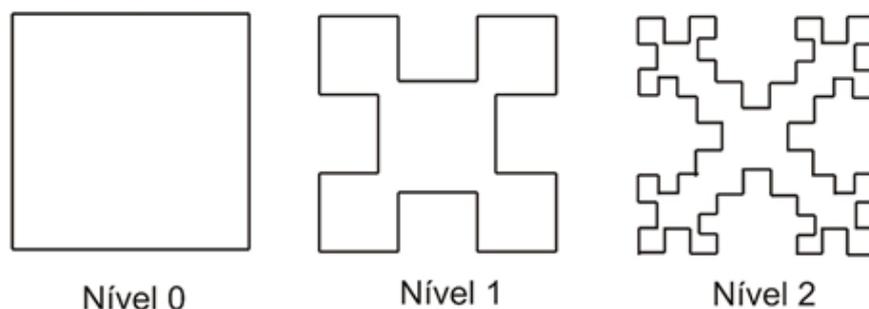
idêntica ao todo, diferindo apenas na escala (OLIVEIRA, 2008). Assim, de forma simplificada, um fractal pode ser definido como um objeto auto similar em diferentes graus de ampliação possuindo simetria através de uma escala, em que cada parte é uma réplica similar a sua parte maior (MANDELBROT, 1983).

Dessa forma, os pesquisadores fizeram uso dessas características dos fractais para aplicações em dispositivos de alta frequência, como é o caso de antenas planares e arranjo de antenas planares (Puente, et al. 1998). As pesquisas nessas áreas apontaram que a propriedade de preenchimento do espaço por parte de um fractal é capaz de reduzir as dimensões dos dispositivos e que a propriedade de auto similaridade seria capaz de reproduzir um comportamento multi-ressonante para esses dispositivos, o que o torna muito interessante em diversas aplicações (OLIVEIRA, 2008). A curva fractal de Koch foi a utilizada no projeto do arranjo log-periódico de antenas proposto neste trabalho, onde a mesma pode ser obtida de forma recursiva por meio de 4 (quatro) transformações afins ( $q_i$ ), em que, as quatro transformações fazem a contração de  $1/3$ ;  $q_2$  faz uma rotação de  $-\pi/2$  rad e uma translação de uma unidade para a direita;  $q_3$  faz uma rotação de  $\pi/2$  rad, uma translação de  $3/2$  unidades para a direita;  $q_4$  executa uma translação de 2 unidades para a direita (OLIVEIRA, 2008).

A transformação usada foi a seguinte:  $q_i : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ , para a obtenção da curva de Koch através do método IFS (*Iterative Function System*) é dada na equação (22). A Figura 22 ilustra o processo de construção de uma curva fractal de Koch a partir dos lados de um quadrado (forma iniciadora).

$$q_i(x, y) = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} \cos(\theta_i) & -\text{sen}(\theta_i) \\ \text{sen}(\theta_i) & \cos(\theta_i) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_i \\ f_i \end{pmatrix} \quad (22)$$

Figura 22 – Geração da curva fractal de Koch.

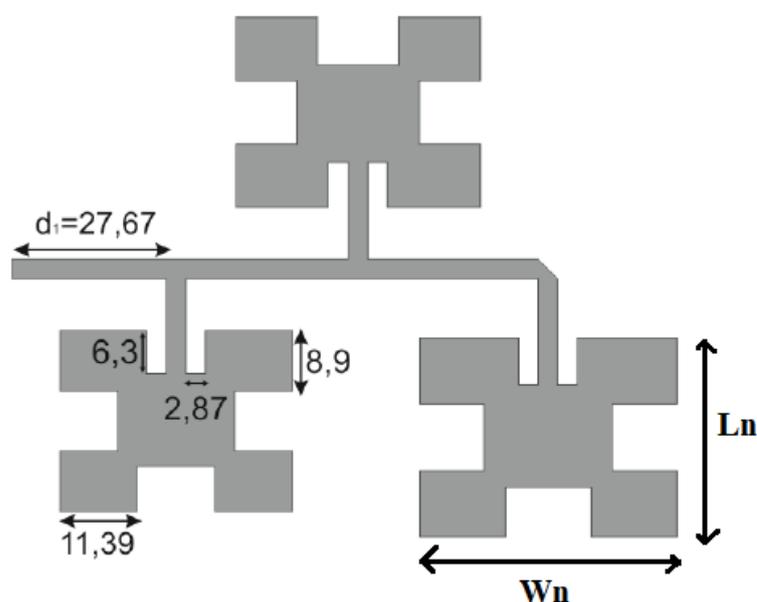


Fonte: Oliveira et al. (2022).

## 5 ESTRUTURA DO ARRANJO DE ANTENAS PROPOSTO

A geometria fractal de Koch em nível 2 foi utilizada para projetar um arranjo log-periódico de antenas patch de microfita para a faixa de frequência das micro-ondas em 2,44 GHz. O arranjo projetado foi denominado de arranjo AKR2, consistindo de três elementos patches ressonantes quando excitados por um gerador de micro-ondas em sua porta de entrada por meio de um conector SMA de 50  $\Omega$ . Para que o projeto do arranjo AKR2 fosse possível, inicialmente a curva de Koch nível 2 foi adicionada às margens radiante e não radiante de um arranjo log-periódico nível 1 (AKR1) já projetado e conforme descrito em Costa et al. (2014) e mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Arranjo log-periódico nível 1 (AKR1).

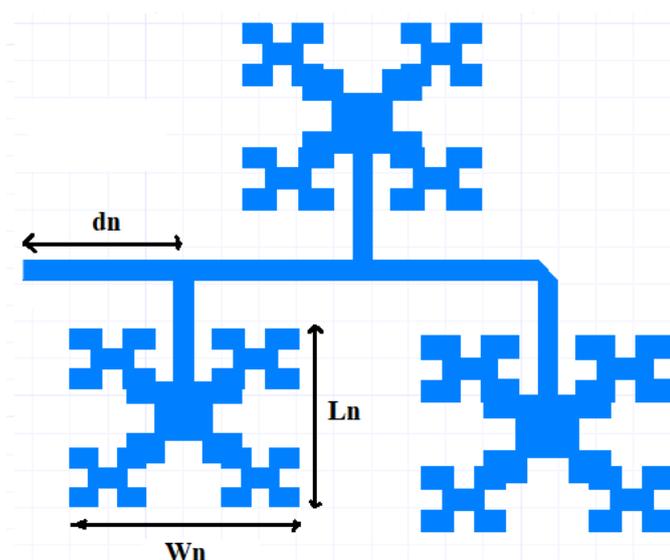


Fonte: Oliveira et al. (2022).

Onde o comprimento do elemento patch é dado por  $W_n$ , a largura dos elementos patches é dado por  $L_n$  e o espaçamento entre eles é dado por  $d_n$ . As demais medidas crescem em uma escala logarítmica por um fator constante de 1,05 mm. Toda a estrutura foi construída em um material de baixo custo, neste caso utilizou-se a fibra de vidro (FR4), com uma espessura ( $h$ ) de 1,5 mm e uma constante dielétrica ( $\epsilon_r$ ) de 4,4.

As dimensões iniciais do projeto do arranjo AKR2 foram obtidas por meio das equações do modelo da linha de transmissão (TLM) descrito em Balanis (1997). As dimensões obtidas por meio desse conjunto de equações serviram de ponto de partida para o projeto de um arranjo log-periódico nível 0 e posteriormente após a aplicação da curva Koch, foi possível obter o arranjo log-periódico de nível 2, conforme mostrado na Figura 24. As dimensões iniciais obtidas foram:  $d_n = 22,67$  mm;  $W_n = 37,7$  mm e  $L_n = 29,9$  mm. O comprimento de  $d_n$  que corresponde a linha de excitação foi considerado meio comprimento de onda guiado ( $\lambda_g / 2$ ) na frequência de projeto desejada.

Figura 24 – Estrutura do Arranjo log-periódico nível 2 (AKR2).



Fonte: Oliveira et al. (2022).

A etapa seguinte ao projeto, consistiu em uma série de simulações utilizando um simulador de onda completa (*Ansys Designer*) para caracterização eletromagnética da estrutura proposta, onde suas dimensões foram otimizadas para um bom funcionamento do dispositivo na frequência de 2,44 GHz. As dimensões encontradas foram utilizadas no elemento 1 do arranjo, sendo as dimensões do elemento denominados de  $W_1$ ,  $L_1$  e  $d_1$ . As demais dimensões para os elementos 2 e 3 do arranjo log-periódico estão diretamente relacionados ao fator ( $R$ ) em uma razão de escala logarítmica segundo a equação (23). Esse fator é determinado para a razão da estrutura do arranjo de antenas, pois trata-se de uma razão entre as frequências ( $F$ ) de ressonâncias adjacentes.

$$R = \frac{F1}{F2}, \quad F2 > F1 \quad (23)$$

Esta propriedade do fator de escala R, indicará que o arranjo projetado apresentará as mesmas características de radiação em todas as frequências de ressonâncias que tem como base o fator R. Assim, em Balanis (1997) é apresentado as seguintes equações de projeto:

$$F_r = \frac{c}{2(L + \Delta L)\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (24)$$

Onde,

$$\Delta L = 0,412 \frac{\epsilon_{eff} + 0,3}{\epsilon_{eff} + 0,3} \chi \frac{W/h + 0,264}{W/h + 0,8} \quad (25)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r + 1}{2} \chi \left(1 + 12 \frac{h}{W}\right)^{-1/2} \quad (26)$$

Onde, Fr é a frequência de ressonância, ΔL é o comprimento Frings e o εeff é a permissividade elétrica efetiva. Para a proposta do arranjo log-periódico de nível 2, o fator R foi considerado igual 1,05 mm, sendo um arranjo formado por três elementos adjacentes, em um arranjo de antenas log-periódica. Os demais elementos foram dimensionados apresentando por base as dimensões do elemento anterior. Conforme mostra a equação (27).

$$R = \frac{Ln+1}{Ln} + \frac{Wn+1}{Wn} + \frac{dn+1}{dn} \quad (27)$$

Utilizando a equações mencionadas, e partindo dos valores iniciais otimizados no simulador, foi possível obter as seguintes dimensões mostradas na Tabela 2 para o arranjo AKR2 log-periódico projetado.

Tabela 2 - Dimensões do arranjo AKR2 log-periódico proposto.

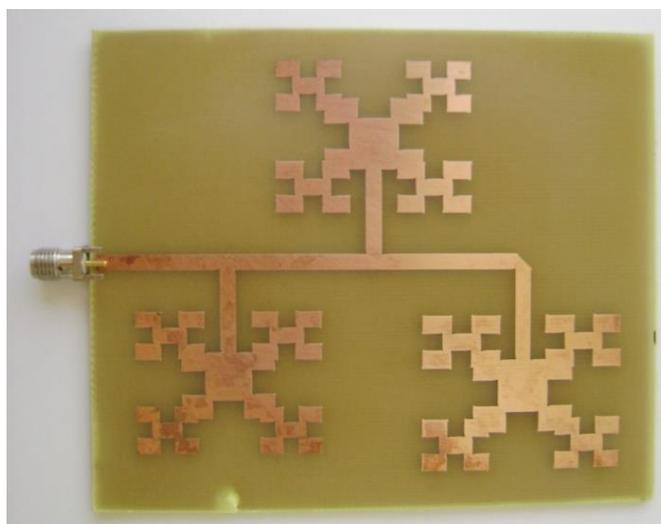
Elemento n	Dimensão dn	Dimensão Wn	Dimensão Ln
1	24,7 mm	34,2 mm	26,7 mm
2	24,7 mm	35,9 mm	28,0 mm
3	24,7 mm	37,7 mm	29,4 mm

Fonte: Oliveira et al. (2022).

Um protótipo de arranjo de antenas quase-fractal nível 2 foi construído (Figura 25) e teve seus parâmetros eletromagnéticos medidos em um analisador de rede vetorial (modelo ZVB14 *Rohde & Schwarz*).

Um fato observado no projeto do arranjo AKR2 é que devido ao uso da curva de Koch nível 2 (Figura 26) acabou por aumentar o comprimento elétrico do arranjo proposto, o que conseqüentemente segundo a relação  $c = \lambda / F$ , fez com que a frequência do dispositivo ressoe em um nível inferior ao desejado que é a frequência em 2,44 GHz, devido a isso se faz necessário um ajuste nas dimensões do arranjo AKR2 de modo a trazer a frequência fundamental para a faixa de 2,44 GHz, resultando assim em uma nova estrutura capaz de funcionar na frequência de projeto desejada.

Figura 25 – Arranjo log-periódico AKR2 construído.



Fonte: Oliveira et al. (2022).

Isso é possível de se conseguir ao aplicarmos um fator de compressão (CF) as dimensões do arranjo AKR2 por meio do cálculo desse fator mostrado na equação (28) (OLIVEIRA, 2008).

$$CF = 100\% - ((Fr(GHz)/2,44 (GHz)) \times 100\%) \quad (28)$$

O uso do fator de compressão resultou em novas dimensões para o arranjo de antenas AKR2 proposto, acarretando dessa forma em um novo dispositivo com dimensões inferiores, o qual denominamos de arranjo log-periódico miniaturizado (AKR2 mini), onde o mesmo foi reprojetoado para ressoar na frequência de projeto

desejada em 2,44 GHz. Esse arranjo miniaturizado apresentou uma redução em suas dimensões de aproximadamente 41% quando comparada as dimensões do arranjo AKR2 inicialmente projetado. As dimensões em milímetros do arranjo AKR2 mini são mostrados na Tabela 3.

A etapa final do procedimento metodológico empregado no projeto e construção do arranjo log-periódicos de antenas fractais consiste na etapa de medição de seus parâmetros eletromagnéticos (Parâmetros S) que foi realizado no analisador de rede vetorial na faixa de frequência entre 1 – 3 GHz. A faixa de frequência de 2,44 GHz se torna interessante por ser não licenciada e livre para teste em dispositivos de micro-ondas.

Tabela 3 - Dimensões do arranjo AKR2 mini log-periódico proposto.

<b>Elemento n</b>	<b>Dimensão dn</b>	<b>Dimensão Wn</b>	<b>Dimensão Ln</b>
1	13,5 mm	20,1 mm	15,7 mm
2	14,1 mm	21,1 mm	16,5 mm
3	14,88 mm	22,4 mm	17,5 mm

Fonte: Oliveira et al. (2022).

## 6 RESULTADOS

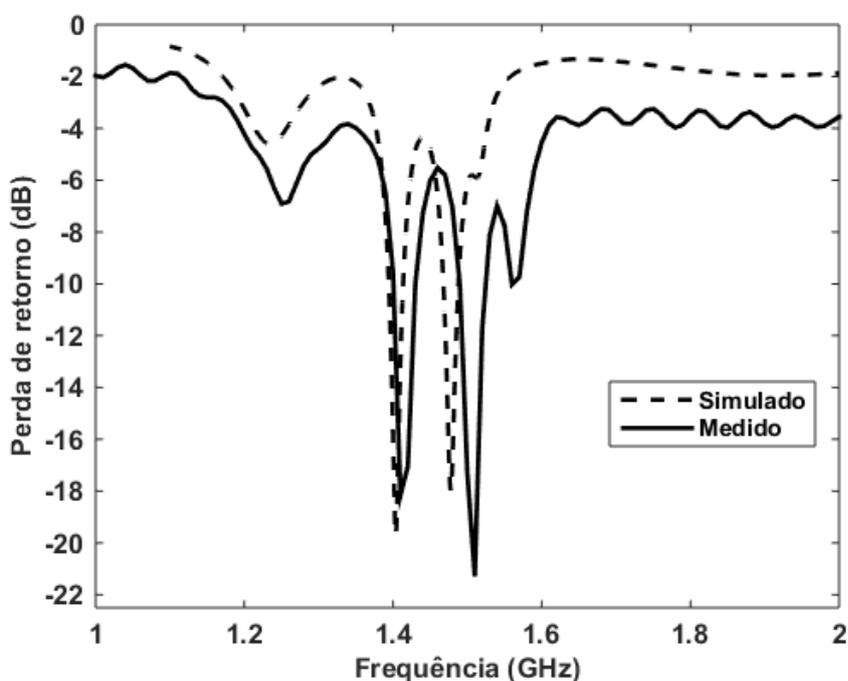
O primeiro resultado experimental do dispositivo proposto consiste na perda de retorno dado em função do seu coeficiente de reflexão (parâmetro S11), que consiste na medida da relação entre as potências incidentes e refletidas no conector do arranjo de antenas, e sua fórmula matemática é dado pela equação (29) (BALANIS, 1997).

$$RL = -20 \log |S_{11}| \quad (29)$$

O resultado da Figura 26 mostra uma comparação entre os resultados numéricos obtidos na simulação com o resultado medido no analisador de rede vetorial. Desse resultado podemos ver duas ressonâncias, a primeira em 1,41 GHz e o segundo harmônico em 1,51 GHz. Os resultados simulados e medido apresentaram uma boa concordância entre si, com baixas perdas de retorno (perdas de retorno abaixo de -16 dB), o que caracteriza um bom casamento de impedância para a estrutura analisada.

O resultado do coeficiente de reflexão para o arranjo AKR2 mini é mostrado na Figura 27. Similar ao resultado anterior para o arranjo AKR2, o arranjo log-periódico miniaturizado também apresentou duas frequências de ressonância, caracteriza-se assim como um dispositivo *dual band*. Os resultados simulado e medido concordaram bem, onde o resultado medido na frequência fundamental apresentou uma ressonância de 2,48 GHz e uma perda de retorno abaixo de -30 dB. A largura de banda na primeira ressonância foi de 60 MHz, um pouco abaixo do valor desejado de 83,5 MHz, considerado ideal para aplicações em sistemas de comunicação *wireless*.

Figura 26 – Resultado de simulação e medição para o arranjo AKR2.

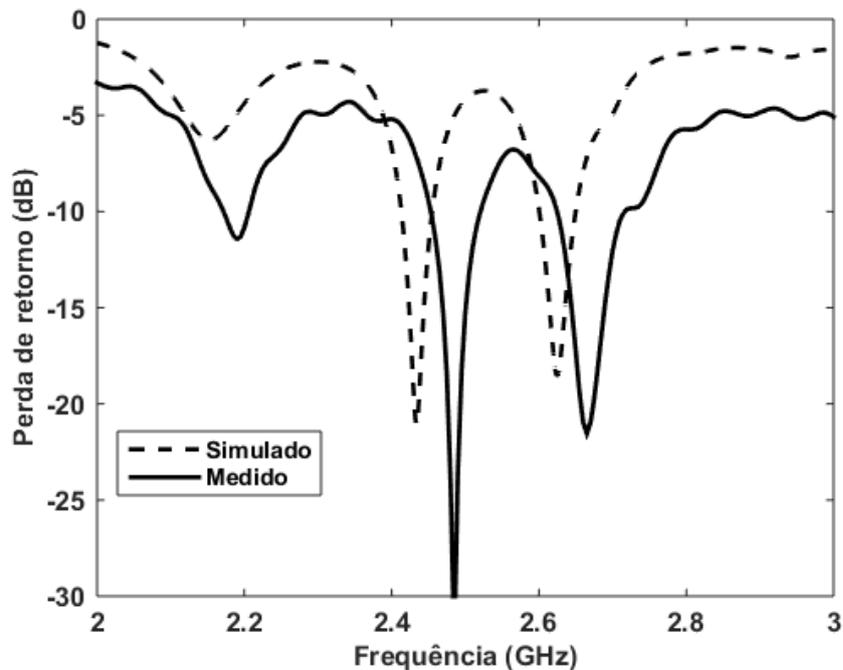


Fonte: Oliveira et al. (2022).

O coeficiente de onda estacionária (VSWR) é o parâmetro ideal para medir a energia devolvida ao gerador na forma de onda estacionária na linha de alimentação. Isso acontece na maioria dos casos devido a um descasamento de impedância na estrutura entre a linha de alimentação e o elemento patch irradiante. Esse parâmetro é dado pela razão entre os coeficientes de reflexão das ondas incidentes e refletidas, conforme a equação (30).

$$VSWR = \frac{1+|S_{11}|}{1-|S_{11}|} \quad (30)$$

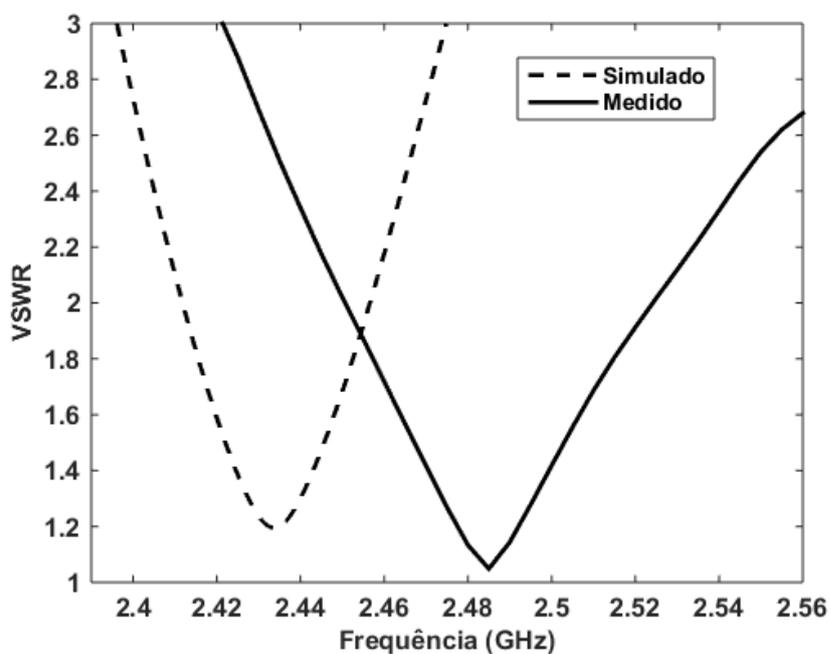
Figura 27 – Simulação e medição para o arranjo AKR2 mini proposto.



Fonte: Oliveira et al. (2022).

A Figura 28 mostra a medição do parâmetro VSWR medido para o arranjo log-periódico quase-fractal AKR2 miniaturizado. O valor obtido na medição foi de 1,05 bem abaixo do valor de corte que corresponde a um VSWR de 2.

Figura 28 – Resultado medido e simulado de VSWR para o arranjo AKR2 mini.

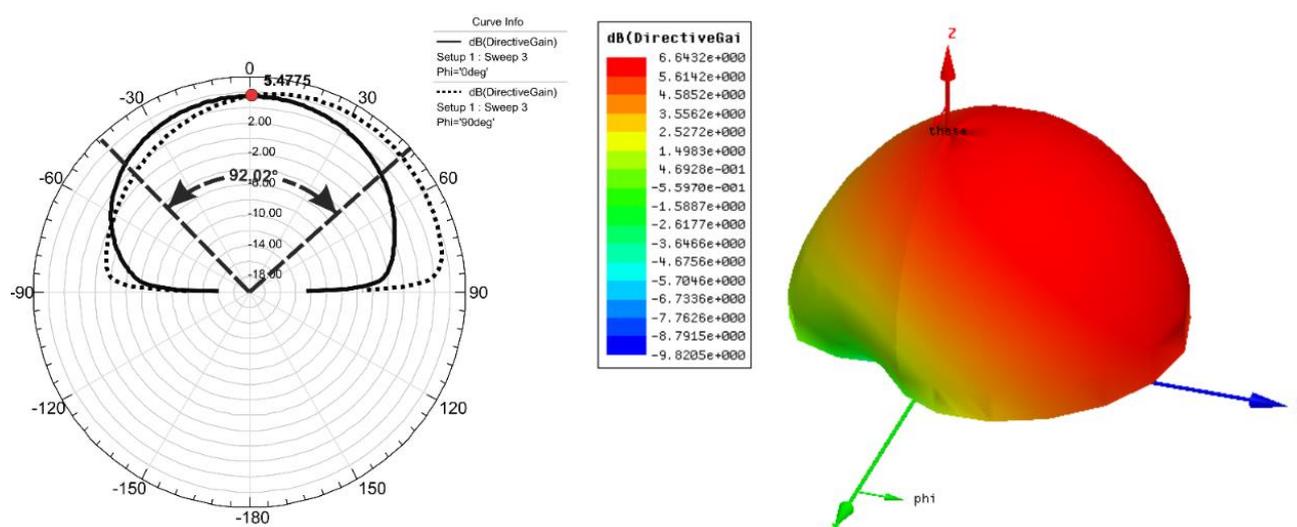


Fonte: Oliveira et al. (2022).

O resultado da Figura 29 mostra os diagramas de irradiação 2D (plano H) e 3D para o arranjo de antenas log-periódica AKR2 mini. A priori, observamos um diagrama bem comportado, apresentando características direcionais na região de campo distante. O diagrama 2D nos mostra um feixe de radiação com largura de feixe de meia potência (HPBW) de  $92,02^\circ$ , por sua vez, o diagrama de radiação 3D mostra um ganho diretivo de 6,64 dB na direção *broadside* de campo distante.

Todos os resultados obtidos para o arranjo de antenas AKR2 mini se encontram resumidos na Tabela 4.

Figura 29 – Diagrama de irradiação 2D e 3D para o arranjo de antenas log periódico AKR2 mini.



Fonte: Oliveira et al. (2022).

Tabela 4 – Resultados simulados e medidos para o arranjo de antenas quase-fractal AKR2 mini proposto.

Resultados	Arranjo AKR2 mini	
	Simulado	Medido
Frequência de ressonância ( $F_r$ )	2,48 GHz	2,44 GHz
Perda de retorno (RL)	-30,0 dB	-21,0 dB
Largura de banda (BW)	60 MHz	40 MHz
Largura de banda percentual (BW%)	1,64%	2,42%
VSWR	1,05	1,2

Ganho	6,64 dB	—
-------	---------	---

Fonte: Oliveira et al. (2022).

## 7 CONCLUSÃO

Foi proposto nesse trabalho de conclusão de curso um novo arranjo de antenas de microfita utilizando a geometria fractal de Koch de nível 2 em seu projeto. O arranjo foi projetado baseado na escala logarítmica para o espaçamento entre seus elementos irradiantes. A estrutura como um todo foi excitada pela técnica de linha de microfita e seus elementos patches foram desenhados utilizando a curva de nível 2 do fractal de Koch. O arranjo AKR2 mini teve suas dimensões reduzidas em 41% aproximadamente, o que é de grande valia em projeto de antenas visando aplicações em dispositivos que exijam um baixo perfil. A estrutura AKR2 ressoou na frequência 2,48 GHz, próximo ao valor desejado de 2,44 GHz, apresentando uma largura de banda na frequência fundamental de 60 MHz. O erro estimado entre as frequências simulada e medida foi de 1,64% considerado tolerável e dentro das expectativas do projeto.

O arranjo log periódico AKR2 mini apresentou boas características de irradiação, a priori sem deformações em seu feixe irradiado com um comportamento diretivo, bem acima da média das antenas patch retangular convencional que é de 2 a 3 dB de ganho.

Todos os resultados para os demais parâmetros de antenas (parâmetros S) foram simulados e medidos, apresentando ótima concordância entre seus pares de resultados, com baixas perdas de retorno, caracterizando assim um bom casamento de impedância para essa estrutura. A impedância medida para o arranjo AKR2 foi de  $47,97\Omega$ , próximo aos  $50\Omega$  que seria o caso ótimo, com máxima transmissão de energia para os elementos irradiantes.

Os resultados oriundos de trabalho de pesquisa, foram publicados como capítulo no livro intitulado: **As engenharias agregando conhecimento em setores emergentes de pesquisa e desenvolvimento 2**, pela editora Atena (ISBN: 978-65-258-0141-4). O DOI do capítulo é: <https://doi.org/10.22533/at.ed.4142221041>.

## 8 REFERÊNCIAS

ANATEL. Agência Nacional de Telecomunicações. Disponível em: <https://www.gov.br/anatel/pt-br/assuntos/5G/tecnologia-5g>. Acesso em: 16 de Mar. 2022.

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.

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.

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.

BHATTACHARYYA, A.; BANERJEE, A.; CHATTERJEE, S.; GUPTA, B. **Dual-Band Minkowski Fractal Patch Antenna With Polarization Diversity**. 2020 IEEE Calcutta Conference (CALCON), 2020.

GARG, R.; BHARTIA, P.; BAHL, I.; ITTIPIBOON, A. **Microstrip Antenna Design Handbook**, Boston, USA: Artech House, Inc., 2001.

BALANIS, C. A. **Antenna theory-analysis and design**, 2nd ed. USA: John Wiley & Sons, 1997.

MANDELBROT, Benoit. **The Fractal Geometry of Nature**, New York: W. H. Freeman, 1983.

PUENTE, C.; ROMEU, J.; POUS, R; CARDAMA, A. **On the Behavior of the Sierpinski Multiband Fractal Antenna**, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 46, pp. 517-524, 1998.

COSTA, J. A. S.; VIEIRA, M. S.; OLIVEIRA, E. E. C; ASSUNÇÃO, A. G. **Projeto e Análise de um Arranjo Log-periódico de Antenas Quase-fractais para a Banda 2,44 GHz (IEEE 802.11 b/g)**. 16º SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 11º CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo (MOMAG 2014), 2014.

Ansoft Designer (part of ANSYS Inc.) [Online]. Available: [www.ansoft.com](http://www.ansoft.com).

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: 16/03/2022.

MDIG. **12 anos diminuindo a sua curiosidade**. e. <https://www.mdig.com.br/index.php?itemid=30380>>. Acesso em: 04 fevereiro de 2022.

B. B. MANDELBROT. **The Fractal Geometry of Nature**. W. H. Freeman and Company, Nova Iorque, 1975.

BARNESLEY SAMAMBAIA. <https://www.gratispng.com/png-z6tgk0/>>. Acesso em 02 de março de 2022.

GRUPO FRACTARTE. <http://www.fractarte.com.br/artigos/texturas.php>>. Acesso 02 de março de 2022.

FRACTAIS. [https://docs.ufpr.br/~ewkaras/ensino/fractais/esponja\\_Menger.pdf](https://docs.ufpr.br/~ewkaras/ensino/fractais/esponja_Menger.pdf)>. Acesso em 02 de março de 2022.

AUGUSTO, T. **Antenas de Microfita Fractais Quadrangulares para Aplicação em Comunicações Sem Fio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.

**OLIVEIRA, E.E.C. Et al. MINIATURIZAÇÃO DE UM ARRANJO LOG-PERÍODICO QUASE-FRACTAL DE ANTENAS DE MICROFITA PARA APLICAÇÕES EM REDES DE COMUNICAÇÃO SEM FIO NA FAIXA DE 2,44 GHZ.** As engenharias agregando conhecimento em setores emergentes de pesquisa e desenvolvimento 2 / Organizador Henrique Ajuz Holzmann. – Ponta Grossa -PR: Atena, 2022.