



INSTITUTO FEDERAL
Paraíba

Campus
João Pessoa

INSTITUTO FEDERAL DA PARAÍBA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MATHEUS DOS SANTOS FERREIRA

ANÁLISE NUMÉRICA DA ANTENA MTK-LA

João Pessoa

2026

MATHEUS DOS SANTOS FERREIRA

ANÁLISE NUMÉRICA DA ANTENA MTK-LA

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido à Coordenação do Curso de
Engenharia Elétrica do Instituto Federal
da Paraíba - IFPB, como parte dos
requisitos para a obtenção do grau de
Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Alfrêdo Gomes Neto, Dr. – IFPB

João Pessoa

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Nilo Peçanha do IFPB, *Campus* João Pessoa

F383a Ferreira, Matheus dos Santos.

Análise numérica da antena MTK-LA / Matheus dos Santos
Ferreira. - 2026.
51 f. : il.

TCC (Graduação – Bacharelado em Engenharia Elétrica) –
Instituto Federal de Educação da Paraíba / Coordenação do
Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica, 2026.
Orientação: Profº. Dr. Alfrêdo Gomes Neto.

1. Antena planar. 2. Matrioska. 3. MTK-LA. I. Título.

CDU 621.396.67(043)

MATHEUS DOS SANTOS FERREIRA

ANÁLISE NUMÉRICA DA ANTENA MTK-LA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO submetido à Coordenação do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica, do Instituto Federal da Paraíba (IFPB), em cumprimento aos requisitos institucionais para a obtenção do Título de **ENGENHEIRO ELETRICISTA**.

Aprovado em 05 de fevereiro de 2026.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Alfredo Gomes Neto

Instituto Federal da Paraíba (IFPB)

Orientador

Prof. Dr. Joabson Nogueira de Carvalho

Instituto Federal da Paraíba (IFPB)

Examinador

Prof. Dr. Jefferson Costa e Silva

Instituto Federal da Paraíba (IFPB)

Examinador

Documento assinado eletronicamente por:

- **Alfredo Gomes Neto**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 05/02/2026 18:31:09.
- **Jefferson Costa e Silva**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 05/02/2026 18:32:03.
- **Joabson Nogueira de Carvalho**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 05/02/2026 18:54:42.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 02/02/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código 828159
Verificador: cf3a4a5e8a
Código de Autenticação:



AGRADECIMENTOS

Chegar até aqui foi uma caminhada cheia de desafios, aprendizados e conquistas. E nada disso teria sido possível sem a presença de Deus, que me guiou, fortaleceu e esteve comigo em cada passo dessa jornada. Sou profundamente grato à minha família, especialmente aos meus pais e irmãos, pelo apoio constante, pelas palavras de incentivo e por acreditarem em mim mesmo nos momentos mais difíceis. Aos colegas e amigos que estiveram presentes ao longo do curso, agradeço pela parceria, pelas trocas de conhecimento e pela convivência que tornou essa jornada mais leve e significativa. Ao GTEMA, pela oportunidade de expandir meus conhecimentos, aprimorar competências e vivenciar experiências que foram essenciais para minha trajetória acadêmica e pessoal.

Aos professores do Instituto Federal da Paraíba, expresso minha sincera gratidão pelo compromisso com o ensino e pela dedicação com que conduzem sua missão, entre eles o Prof. Jefferson Costa e Silva e o Prof. Joabson Nogueira de Carvalho, que compõem a banca avaliadora, e cuja contribuição será de grande importância para o enriquecimento deste trabalho. Em especial, agradeço ao Prof. Alfredo Gomes, pela orientação generosa, paciência e incentivo constante ao longo da minha formação.

*A força não vem da capacidade física. Ela vem
de uma vontade indomável.*

Mahatma Gandhi

RESUMO

Neste trabalho, é realizado um estudo sobre a antena MTK-LA, considerando modificações geométricas no plano terra parcial e nas dimensões do anel matrioska. O objetivo é compreender a influência dos parâmetros W_{gd2y} , W_{trap2x} e W_6 sobre a resposta em frequência da antena. As análises foram conduzidas por meio de simulações numéricas utilizando o software Ansys HFSS, permitindo avaliar aspectos como adaptação de impedância, largura de banda e estabilidade da resposta em frequência. O estudo amplia a compreensão sobre o comportamento da antena MTK-LA e reforça seu potencial de aplicação em sistemas de telecomunicações.

Palavras-chave: Antena planar, Matrioska, MTK-LA.

ABSTRACT

This work presents a study of the MTK-LA antenna, considering geometric modifications in the partial ground plane and in the dimensions of the matryoska ring. The objective is to analyze the influence of the parameters W_{gd2y} , W_{trap2x} , and W_6 on the antenna's frequency response. Numerical simulations were carried out using the Ansys HFSS software, enabling the evaluation of impedance matching, bandwidth, and frequency response stability. The results broaden the understanding of the MTK LA antenna's behavior and reinforce its potential for application in telecommunications systems.

Keywords: planar antenna, matryoshka, MTK-LA

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ecossistema da Internet das Coisas (IoT).	16
Figura 2 - Exemplo de antena planar MTK-LA e seus respectivos componentes básicos.	18
Figura 3 – Antena planar MTK-LA com largura de banda aumentada.	18
Figura 4 – Coeficiente de reflexão da antena <i>patch</i> retangular simulada.	22
Figura 5 – Representação gráfica da largura de banda de uma antena genérica.	23
Figura 6 - Padrão de onda estacionária de tensão em uma linha sem perdas.	23
Figura 7 – Características principais do diagrama de irradiação.	25
Figura 8 – Diagrama de irradiação 2D projetado em uma antena <i>patch</i> retangular.	26
Figura 9 – Diagrama de irradiação 3D projetado em uma antena <i>patch</i> retangular.	26
Figura 10 – Representação em 2D da diretividade em antenas isotrópica, omnidirecional e diretiva.	27
Figura 11 – Representação em 3D da diretividade em antenas isotrópica, omnidirecional e diretiva.	27
Figura 12 - Terminais de referência e perdas da antena.	28
Figura 13 – Tipos de polarização da antena.	30
Figura 14 – Estrutura de uma antena planar alimentada por cabo coaxial.	31
Figura 15 – Representação de formas geométricas empregadas em patches de antenas de microfita.	31
Figura 16 - Boneca russas matrioskas.	32
Figura 17 – Geometria matrioska.	32
Figura 18 - Geometria matrioska expandida.	33
Figura 19 – Formação da geometria matrioska com 2 anéis concêntricos.	34
Figura 20 – Geometria matrioska de 2 anéis concêntricos expandida.	34
Figura 21 – Geometria matrioska de 3 anéis concêntricos expandida.	35
Figura 22 - Geometria da antena MTK-LA.	35
Figura 23 – Plano de aterramento parcial da antena MTK-LA.	36
Figura 24 - Nova configuração da antena MTK-LA.	37
Figura 25 – Parâmetros de projeto da nova configuração da antena MTK-LA.	37
Figura 26 – Representação da nova configuração da antena MTK-LA com a caixa de irradiação.	39
Figura 27 – Resposta em frequência da antena MTK-LA, $ S_{11} $ (dB) $\times$ Frequência (GHz).	40
Figura 28 - Distribuição de densidade de corrente superficial (J).	40
Figura 29 - Diagramas de irradiação 2D e 3D da nova configuração da antena MTK-LA.	41
Figura 30 – Representação física do parâmetro W_{gd2y} a ser investigado.	41
Figura 31 - Representação física do parâmetro W_{trap2x} a ser investigado.	42
Figura 32 - Representação física do parâmetro W_6 a ser investigado.	42
Figura 33 – Resposta em frequência (S_{11}) da parametrização da variável W_{gd2y}	43
Figura 34 - Resposta em frequência (S_{11}) da parametrização da variável W_{trap2x}	44
Figura 35 - Resposta em frequência (S_{11}) da parametrização da variável W_6	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores máximo e mínimo do coeficiente de reflexão e do VSWR.	24
Tabela 2 – Dimensões da nova antena MTK-LA.	39
Tabela 3 – Resultado da parametrização da variável W_{gd2y}	43
Tabela 4 - Resultado da parametrização da variável W_{trap2x}	44
Tabela 5 - Resultado da parametrização da variável W_6	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GTEMA	Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado
MHz	megahertz
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
FSS	Superfície Seletiva em Frequência
GHz	gigahertz
BW	Largura de banda, <i>Bandwidth</i>
IFPB	Instituto Federal da Paraíba
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IoT	Internet das Coisas
VSWR	Razão de Onda Estacionária de Tensão
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
ANSYS	ANSYS High Frequency Structure Simulator
MTK-LA	Matryoshka-Like

LISTA DE SÍMBOLOS

ϵ_r	Permissividade dielétrica relativa
f_{res}	Frequência de ressonância
f_{sup}	Frequência superior
f_{inf}	Frequência inferior
h	Espessura do substrato
W_{mai}	Largura do anel matrioska, onde $(i = 1, 2, 3, \dots, n = \text{identificação do anel concêntrico})$
W_{ma}	Largura da microfita do anel matrioska
L_{eff}	Comprimento efetivo do anel matrioska
g	Fenda na região de interconexão dos anéis concêntricos que formam o anel matrioska
G	Ganho
P_{in}	Potência de entrada
$P_{refletida}$	Potência da onda refletida
$P_{incidente}$	Potência da onda incidente
dB	Decibel
S_{11}	Parâmetro S, correspondente a razão entre as tensões refletida e incidentes na porta 1.
Γ	Coeficiente de reflexão
Z	Impedância
Z_{in}	Impedância de entrada da antena
Z_0	Impedância característica da linha de transmissão
η	Fator de casamento de impedância
V	Tensão
$V_{refletida}$	Amplitude da onda refletida
$V_{incidente}$	Amplitude da onda incidente
t	Espessura da camada de metalização
λ_0	Comprimento de onda no espaço livre
λ	Comprimento de onda
ϵ_{reff}	Permissividade dielétrica relativa efetiva
mm	milímetro
θ	Theta
φ	Phi
π	Pi
$U(\theta, \varphi)$	Intensidade de irradiação

P_{rad}	Potência total irradiada
D	Diretividade
$U_{m\acute{a}x}$	Intensidade máxima de radiação
$U_{m\acute{e}d}$	Intensidade média de radiação
e_{cd}	Eficiência de irradiação
e_0	Eficiência total adimensional
e_r	Eficiência de reflexão descasamento
e_c	Eficiência de condução adimensional
e_d	Eficiência dielétrica adimensional
L_{gdx}	Comprimento do retângulo vertical do plano terra parcial no eixo x
L_{gdy}	Comprimento do retângulo horizontal do plano terra parcial no eixo y
w_{subx}	Largura do substrato dielétrico no eixo x
w_{suby}	Largura do substrato dielétrico no eixo y
w_{gdx}	Largura do retângulo horizontal do plano terra parcial no eixo x
w_{gdy}	Largura do retângulo vertical do plano terra parcial no eixo y
w_{trx}	Largura da base triangular do plano terra parcial no eixo x
w_{try}	Altura do triângulo do plano terra parcial no eixo y

SUMÁRIO

Capítulo 1	15
Introdução	15
1.1. Objetivos	19
1.1.1. Objetivo geral.....	19
1.1.2. Objetivos específicos	19
1.1.3. Metodologia	20
Capítulo 2	21
Fundamentação teórica.....	21
2.1. Características básicas.....	21
2.1.1. Coeficiente de reflexão – Γ	21
2.1.2. Largura de banda (<i>Bandwidth</i> – BW)	22
2.1.3. Relação de onda estacionária de tensão – VSWR.....	23
2.1.4. Impedância de entrada.....	24
2.1.5. Fator de casamento de impedância	24
2.1.6. Diagrama de irradiação	25
2.1.7. Diretividade.....	26
2.1.8. Eficiência.....	28
2.1.9. Ganho	29
2.1.10. Polarização	29
2.2. Antenas planares	30
2.2.1. Geometria matrisoska	32
2.2.2. Antena MTK-LA.....	35
Capítulo 3	37
3.1. Análise da Antena MTK-LA.....	37
3.1.1. Análise da variação do W_{gd2y}	41
3.1.2. Análise da variação do W_{trap2x}	42
3.1.3. Análise da variação do W_6	42

3.2. Resultados e discussão	43
Capítulo 4	47
Considerações finais.....	47
REFERÊNCIAS	48

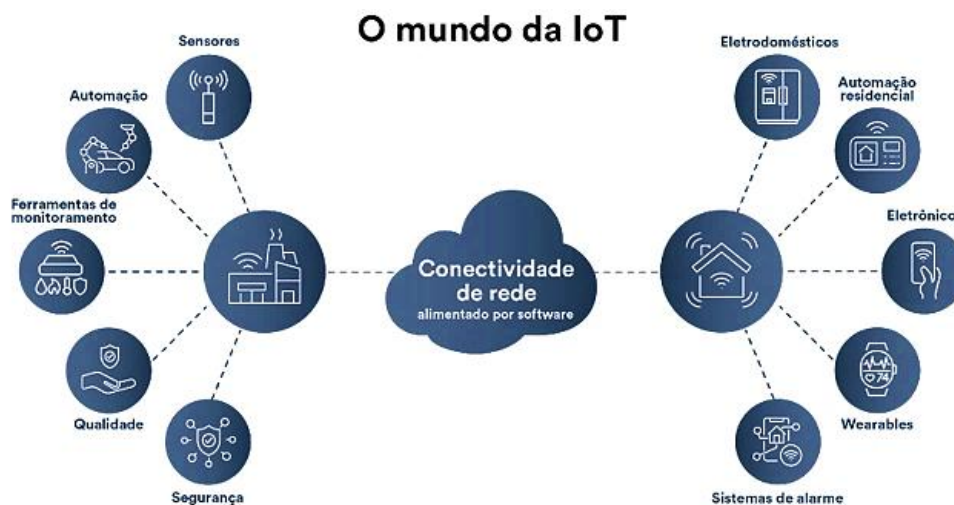
Capítulo 1

Introdução

A comunicação é um dos pilares fundamentais da organização social e do desenvolvimento humano. Desde os tempos mais remotos, o ser humano buscou formas de transmitir mensagens e compartilhar informações, seja por meio de sinais visuais, sons ou símbolos. Esses primeiros métodos rudimentares tinham como objetivo principal reduzir a distância entre indivíduos e grupos, permitindo maior integração social e cultural. Com o passar dos séculos, a necessidade de comunicação eficiente impulsionou a criação de sistemas cada vez mais sofisticados, culminando em uma verdadeira revolução tecnológica [1], [2].

O advento da eletricidade, no século XIX, representou um marco decisivo nesse processo. A partir dele, surgiram dispositivos como o telégrafo elétrico, o telefone e, posteriormente, o rádio, que transformaram radicalmente a forma como as informações eram transmitidas [3], [4]. No século XX, a televisão e os satélites de comunicação ampliaram ainda mais o alcance das telecomunicações, enquanto a Internet, já no final do século, inaugurou uma nova era de conectividade global. Esses avanços não apenas encurtaram distâncias, mas também redefiniram o modo como a sociedade se organiza, trabalha e interage [5]. No século XXI, a diversidade de equipamentos e aplicações de sistemas de comunicação tornou-se ainda mais evidente. Dispositivos móveis, como *smartphones*, *tablets* e *notebooks*, passaram a concentrar múltiplas tecnologias em um único equipamento, atendendo a bilhões de usuários em todo o mundo. Além disso, novas tendências como a Internet das Coisas (IoT), como na Figura 1, ampliaram o conceito de conectividade, permitindo que sensores, veículos, eletrodomésticos e até sistemas de saúde estejam interligados em redes inteligentes [6].

Figura 1 – Ecossistema da Internet das Coisas (IoT).



Fonte: [7].

Essa realidade trouxe consigo novos desafios, especialmente relacionados à mobilidade, ao uso racional dos espaços destinados às estações de telecomunicações e à gestão eficiente do espectro de radiofrequência. Além disso, deve-se considerar o espaço físico limitado disponível para a instalação de antenas em dispositivos móveis, o que impõe restrições adicionais ao seu projeto e integração. O espectro de radiofrequência, recurso limitado e regulamentado no Brasil pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), exige uma alocação criteriosa para evitar interferências e garantir a qualidade dos serviços prestados [8].

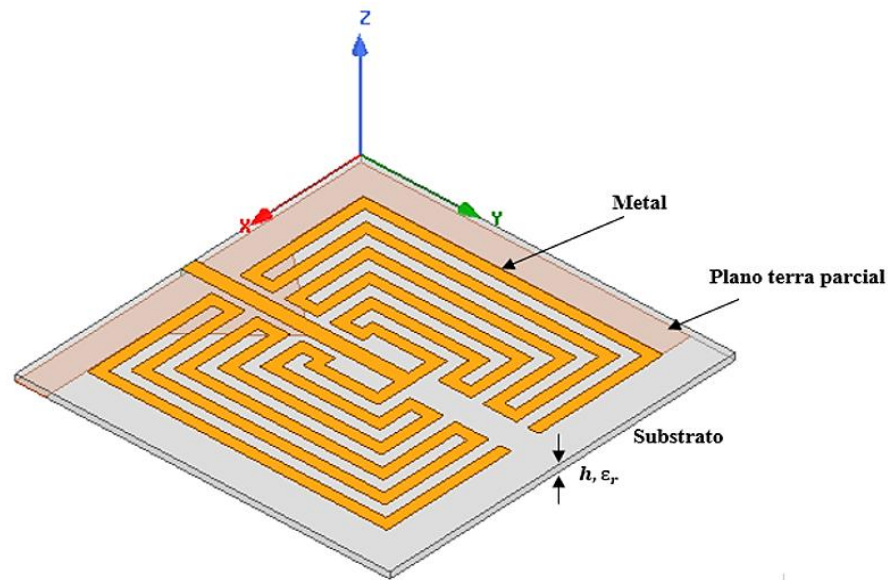
Mesmo com antenas capazes de operar em múltiplas faixas de frequência, ainda é necessário minimizar os efeitos de degradação dos sinais, assegurando que diferentes tecnologias possam coexistir sem comprometer o desempenho das redes [9]. Nesse contexto, cada componente dos sistemas de telecomunicações como: linhas de transmissão, filtros, antenas e demais estruturas; desempenha papel essencial para que o sistema como um todo opere de forma adequada. Entre esses elementos, a antena ocupa posição de destaque. Trata-se de um dispositivo responsável por transmitir e/ou receber ondas eletromagnéticas, funcionando como a interface entre as ondas guiadas e as ondas não guiadas. Sua importância é tão grande que, sem ela, não seria possível estabelecer a conexão entre os equipamentos e o ambiente externo [10]. Contudo, o desenvolvimento de antenas enfrenta desafios constantes, especialmente diante da necessidade de dispositivos cada vez mais compactos, leves e de baixo custo [11].

Além disso, a infraestrutura das redes de telecomunicações também depende de antenas como pontos de acesso, mas os espaços disponíveis para instalação são limitados, o que exige soluções criativas e eficientes [12]. Nesse cenário, as antenas planares surgem como uma alternativa adequada. Diferentemente das antenas tradicionais, que muitas vezes possuem dimensões maiores e estruturas volumosas, as antenas planares destacam-se por sua geometria reduzida, facilidade de fabricação e integração direta em placas de circuito impresso [13]. Essas características tornam possível sua aplicação em uma ampla gama de dispositivos modernos, desde *smartphones* e *notebooks* até sensores [14], drones [15] e sistemas de diagnóstico por imagem [16]. Além disso, sua versatilidade permite atender às exigências de múltiplos padrões de comunicação em um único dispositivo, conciliando desempenho, miniaturização e baixo custo [12].

Nesse contexto, diversos grupos de pesquisa têm dedicado atenção especial ao desenvolvimento de novas configurações de antenas planares, buscando ampliar sua eficiência e adaptabilidade às demandas atuais. No Brasil, iniciativas como as do Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado (GTEMA-IFPB) têm proposto soluções inovadoras, explorando geometrias diferenciadas e técnicas de otimização para melhorar o desempenho dessas antenas em aplicações específicas [17]. Esse esforço evidencia que o estudo das antenas planares não é apenas uma questão acadêmica, mas uma necessidade prática para acompanhar a evolução tecnológica e garantir que os sistemas de comunicação continuem atendendo às crescentes demandas da sociedade contemporânea. Assim, compreender o papel das antenas planares no contexto das telecomunicações modernas é fundamental para projetar soluções que conciliem eficiência, portabilidade e integração em sistemas cada vez mais complexos.

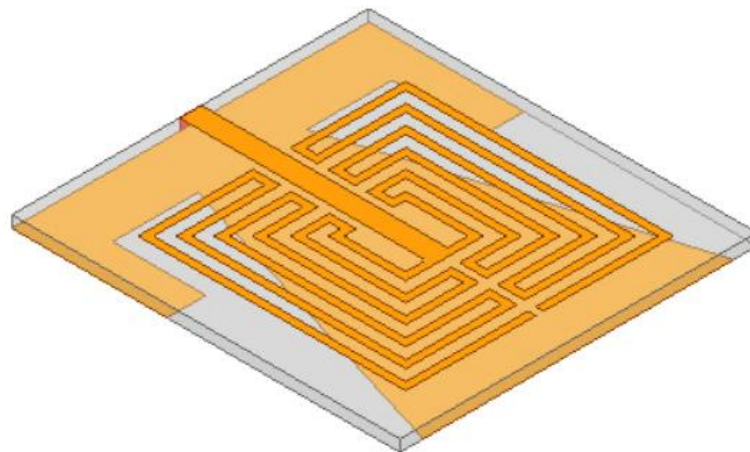
Em [18], [19] foi recentemente apresentada uma antena proposta pelo GTEMA-IFPB, denominada antena MTK-LA, desenvolvida a partir da geometria matrioska, Figura 2. Essa antena é compacta e apresenta uma largura de banda estreita características que a tornam adequada para aplicações em dispositivos compactos que operem com faixa de frequência estreita [20]. Procurando aumentar a largura de banda da antena MTK-LA uma nova configuração foi apresentada, conforme ilustrado na Figura 3. Neste estudo, foi analisada numericamente essa nova configuração de antena, avaliando com os parâmetros do seu plano terra parcial e as dimensões do anel matrioska afetam a sua resposta em frequência.

Figura 2 - Exemplo de antena planar MTK-LA e seus respectivos componentes básicos.



Fonte: [19].

Figura 3 – Antena planar MTK-LA com largura de banda aumentada.



Fonte: Elaborado no Ansysy – HFSS pelo próprio autor.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

Analisar numericamente parâmetros da antena MTK-LA, de maneira a contribuir para o entendimento das suas características.

1.1.2. Objetivos específicos

- Realizar uma revisão do referencial teórico sobre antenas, com destaque para as antenas planares.
- Compreender os fundamentos da geometria matrioska e suas aplicações.
- Assimilar os princípios da antena MTK-LA, características, procedimentos de projeto e otimização.
- Analisar numericamente como a variação das dimensões do elemento irradiador e do plano terra influenciam nas características da antena MTK-LA.
- Avaliar como as condições de simulação (dimensões da caixa de radiação, tipo de fonte etc.) influenciam nas respostas obtidas.
- Documentar os resultados obtidos por meio da elaboração deste TCC.

1.1.3. Metodologia

O presente trabalho foi desenvolvido em três etapas principais. No Capítulo 2 é apresentada a primeira etapa, dedicada ao levantamento de conhecimentos gerais sobre antenas, em especial antenas planares baseadas na geometria matrioska, de forma a consolidar o referencial teórico necessário para o estudo.

O Capítulo 3 corresponde à segunda etapa, na qual são investigados os parâmetros da antena MTK-LA por meio de análises numéricas. Nessa fase, são realizadas variações em sua estrutura e os resultados obtidos são examinados graficamente, permitindo avaliar o impacto das modificações propostas sobre o desempenho da antena.

Por fim, o Capítulo 4 apresenta a última etapa, onde são expostas as considerações finais do trabalho, destacando as conclusões alcançadas e apontando possíveis perspectivas para pesquisas futuras.

Capítulo 2

Fundamentação teórica

As antenas são elementos indispensáveis nos sistemas de comunicação, pois realizam a conversão entre sinais elétricos conduzidos em circuitos e ondas eletromagnéticas propagadas no espaço. Esse papel de transição garante que a informação seja transmitida e recebida de forma eficiente, tornando-as componentes centrais em sistemas de telecomunicações sem fio. Modelos como antenas planares e lineares (de fio) são amplamente empregados em aplicações cotidianas, oferecendo soluções simples e compactas. Em contrapartida, antenas de maior ganho, como Yagi-Uda, parabólicas e helicoidais, são utilizadas quando há necessidade de direcionamento do feixe ou de comunicação em longas distâncias. Cada configuração atende a requisitos específicos de alcance, eficiência e custo, refletindo a diversidade de demandas presentes nos modernos sistemas de telecomunicações [21].

2.1.Características básicas

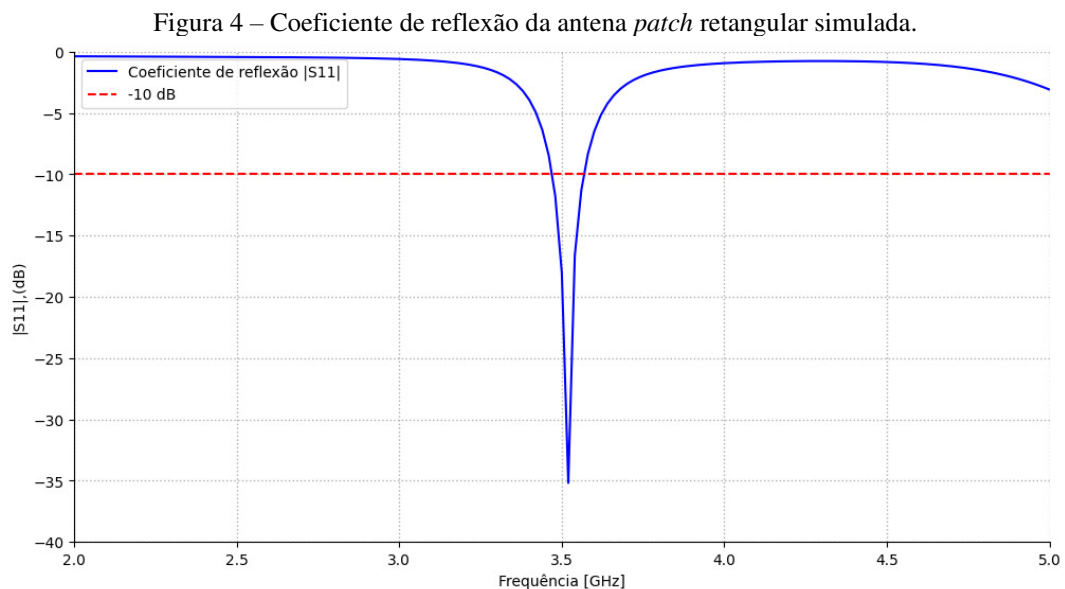
O desempenho das antenas pode ser avaliado por parâmetros que descrevem como realizam a transmissão e a recepção do sinal. Esses elementos fornecem informações essenciais para compreender sua eficiência e adequação em diferentes sistemas de telecomunicação [21].

2.1.1. Coeficiente de reflexão – Γ

O coeficiente de reflexão constitui um parâmetro que representa a relação entre a tensão refletida e a tensão incidente na porta de alimentação, Equação (1), [22]. Esse parâmetro permite avaliar o grau de adaptação de impedância entre a antena e a linha de transmissão, Equação (2). Na prática, muitas vezes é utilizado o parâmetro de espalhamento S_{11} , que é equivalente ao coeficiente de reflexão, conforme a Equação 3. Na Figura 4, tem-se o $|S_{11}|$, expresso em decibéis (dB). O coeficiente de reflexão fornece uma medida prática da quantidade de energia refletida, permitindo verificar a eficiência da transferência de potência pela estrutura de alimentação para a antena, Equação (3).

$\Gamma = \frac{V_{refletida}}{V_{incidente}} \quad (adimensional)$	(1)
$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (adimensional)$	(2)
$ \Gamma = \sqrt{\frac{P_{refletida}}{P_{incidente}}} \quad (adimensional)$	(3)
$S11 = -20\log(\Gamma) \quad (adimensional)$	(4)

em que Z_{in} corresponde à impedância de entrada da antena e Z_0 à impedância característica da linha de transmissão que alimenta a antena. Valores reduzidos de $|\Gamma|$ indicam boa adaptação, enquanto valores elevados evidenciam descasamentos de impedância que comprometem a eficiência do sistema.



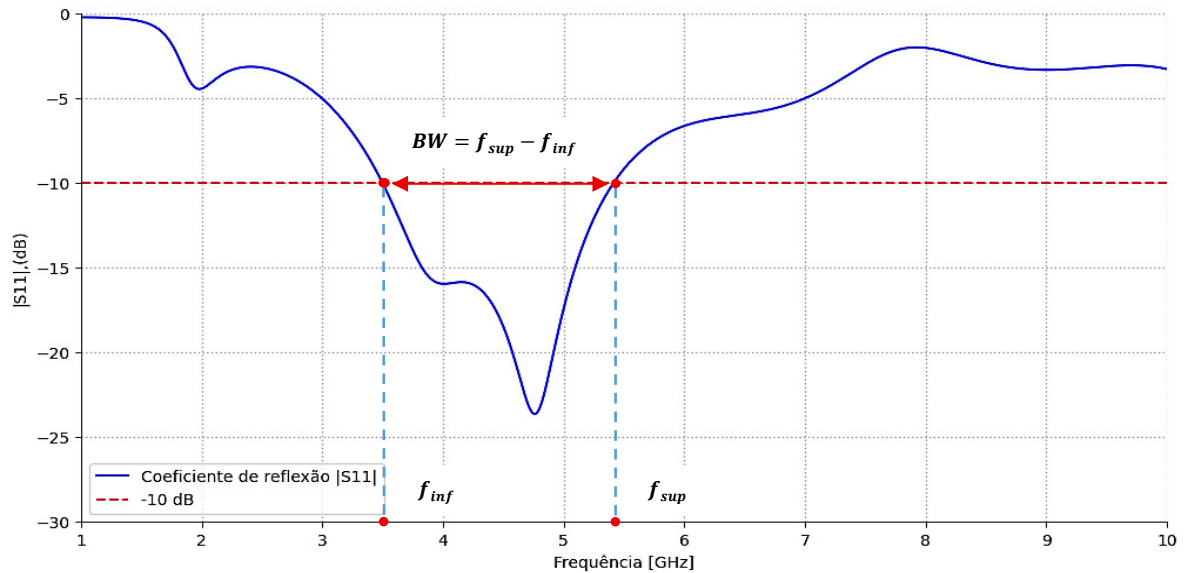
Fonte: Elaborado no Ansys - HFSS pelo próprio autor.

2.1.2. Largura de banda (*Bandwidth* – BW)

A largura de banda de uma antena define o intervalo de frequências em que suas propriedades elétricas permanecem adequadas para a operação, de acordo com os requisitos da aplicação. Esse parâmetro é essencial porque indica a faixa na qual a antena consegue transmitir e receber sinais de forma eficiente, sem comprometer a qualidade da comunicação. Em aplicações práticas, um parâmetro usualmente utilizado como referência é o limite do coeficiente de reflexão estabelecido por $|S11| \leq -10 \text{ dB}$, valor que assegura uma boa adaptação entre a antena e o sistema de alimentação [23]. A Figura 5 ilustra a largura de banda,

definida pela diferença entre a frequência superior ($f_{sup(-10\text{ dB})}$) e a frequência inferior ($f_{inf(-10\text{ dB})}$).

Figura 5 – Representação gráfica da largura de banda de uma antena genérica.

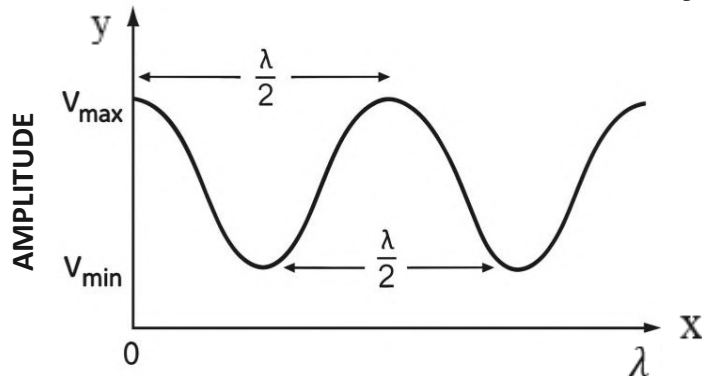


Fonte: Elaborado no Ansysy – HFSS pelo próprio autor.

2.1.3. Relação de onda estacionária de tensão – VSWR

O parâmetro VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio*), ou Relação de Onda Estacionária de Tensão, é utilizado para avaliar o casamento de impedância entre a antena e a linha de transmissão [22], sendo definido como a razão entre os valores máximo e mínimo de tensão presentes em uma onda estacionária, formada pela superposição das ondas incidente e refletida, Figura 6, conforme Equação 5.

Figura 6 - Padrão de onda estacionária de tensão em uma linha sem perdas.



Fonte: Autoria própria.

O VSWR e o coeficiente de reflexão se relacionam pela Equação (6), tendo valores limites ilustrados na Tabela 1.

$$VSWR = \frac{|V|_{\text{máximo}}}{|V|_{\text{mínimo}}} \quad (\text{adimensional}) \quad (5)$$

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (\text{adimensional}) \quad (6)$$

Tabela 1 – Valores máximo e mínimo do coeficiente de reflexão e do VSWR.

	$ \Gamma $	VSWR	
$Z_{in} = Z_0$	0	1	Casamento de impedância
$Z_{in} \ll Z_0$	1	∞	Descasamento de impedância
$Z_{in} \gg Z_0$	1	∞	Descasamento de impedância
	0,316 ou -10 dB	1,92	Aproximadamente 10% da potência refletida

Fonte: Autoria própria.

2.1.4. Impedância de entrada

A impedância de entrada de uma antena é definida pela razão entre a tensão e a corrente nos seus terminais de alimentação, podendo também ser descrita pela relação entre os campos elétrico e magnético na região de entrada. Esse parâmetro é determinante para o desempenho da antena, pois influencia diretamente o acoplamento com a linha de transmissão. Quando há compatibilidade entre a impedância de entrada e a impedância característica da linha, ocorre o casamento de impedâncias, condição que maximiza a transferência de potência e reduz reflexões. Já o desajuste entre esses valores provoca perdas e compromete a eficiência da comunicação, sendo um aspecto crítico no projeto e na otimização de sistemas irradiantes [23].

2.1.5. Fator de casamento de impedância

O fator de casamento de impedância é um parâmetro utilizado para quantificar a eficiência da transferência de potência entre a antena e a linha de transmissão. Esse fator está diretamente relacionado ao grau de adaptação de impedâncias, sendo definido em função do coeficiente de reflexão. Valores próximos de 1 indicam que praticamente toda a potência incidente é entregue à antena, caracterizando um bom casamento de impedância [22]. Por outro lado, valores reduzidos evidenciam desajustes, resultando em maior quantidade de energia refletida e, conseqüentemente, em perdas no sistema. Matematicamente, o fator de casamento de impedância pode ser expresso por:

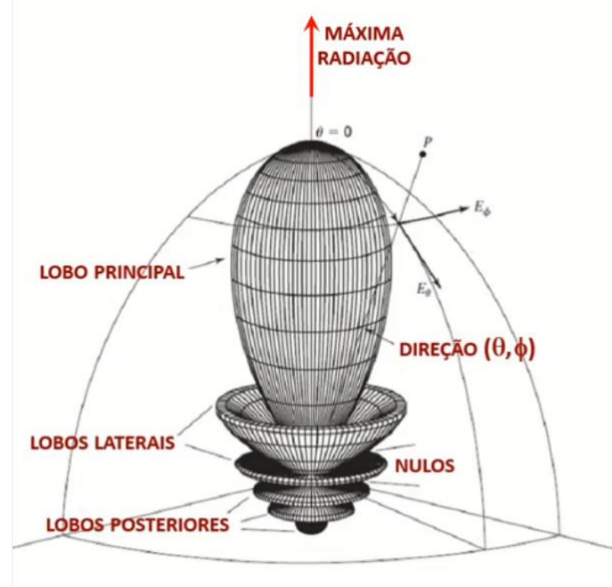
$$\eta = 1 - |\Gamma|^2 \quad (7)$$

em que η fator de casamento e $|\Gamma|$ é o módulo do coeficiente de reflexão. Essa relação demonstra que quanto menor for o valor de $|\Gamma|$, maior será a eficiência do acoplamento entre a antena e a linha de transmissão [22].

2.1.6. Diagrama de irradiação

O diagrama de irradiação de uma antena corresponde à representação da intensidade de irradiação em função da direção espacial, permitindo visualizar a distribuição do campo eletromagnético [23]. Essa distribuição pode ser expressa graficamente e por funções matemáticas e pode apresentar regiões denominadas lóbulos, que podem ser classificados como principal, secundário, lateral ou posterior, conforme a Figura 7. O lóbulo principal indica a direção de máxima irradiação, enquanto os lóbulos secundários representam irradiação em direções indesejadas e devem ser minimizados [23].

Figura 7 – Características principais do diagrama de irradiação.

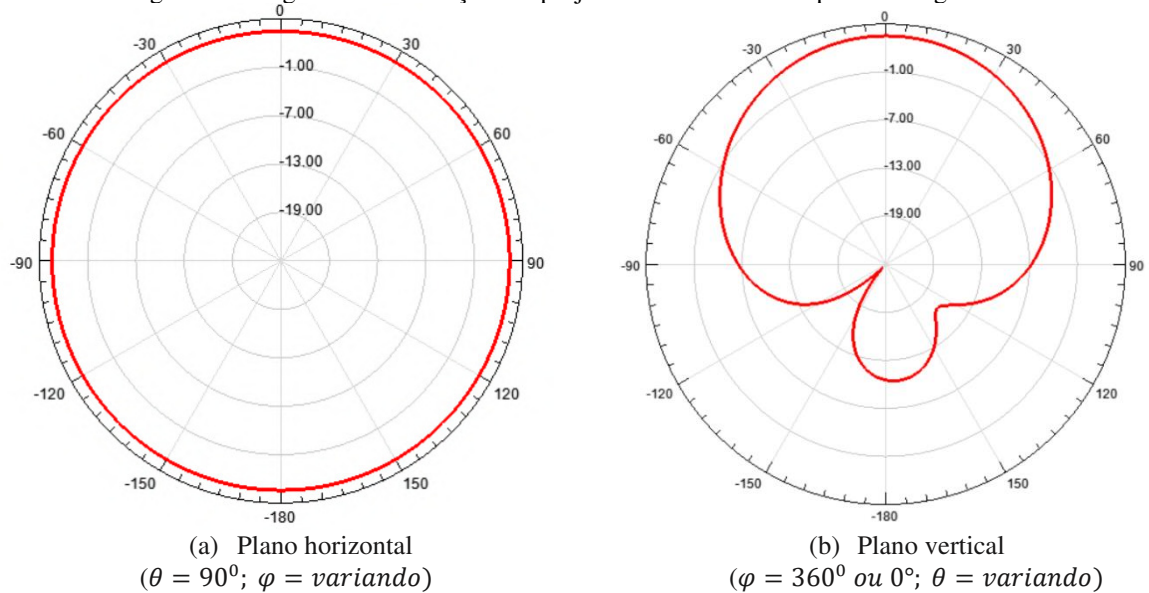


Fonte: [24].

Além disso, os diagramas podem ser isotrópicos, quando a radiação é uniforme em todas as direções, omnidirecionais, quando apresentam uniformidade em um plano específico, ou diretivos, quando concentram energia em determinadas direções, característica essencial para aplicações que exigem maior alcance ou foco de sinal [21]. Na Figura 8 são apresentados os diagramas de irradiação bidimensionais (2D) de uma antena patch retangular, sendo o plano

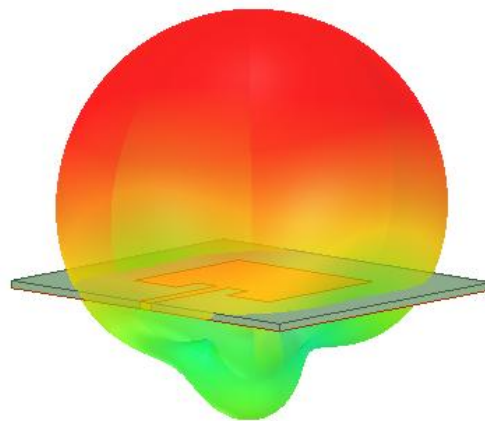
horizontal ilustrado na Figura 8-a e o plano vertical na Figura 8-b. Já na Figura 9 observa-se o diagrama de irradiação tridimensional (3D), que complementa a análise do comportamento da antena.

Figura 8 – Diagrama de irradiação 2D projetado em uma antena patch retangular.



Fonte: Elaborado no Ansys - HFSS pelo próprio autor.

Figura 9 – Diagrama de irradiação 3D projetado em uma antena patch retangular.



Fonte: Elaborado no Ansys - HFSS pelo próprio autor.

2.1.7. Diretividade

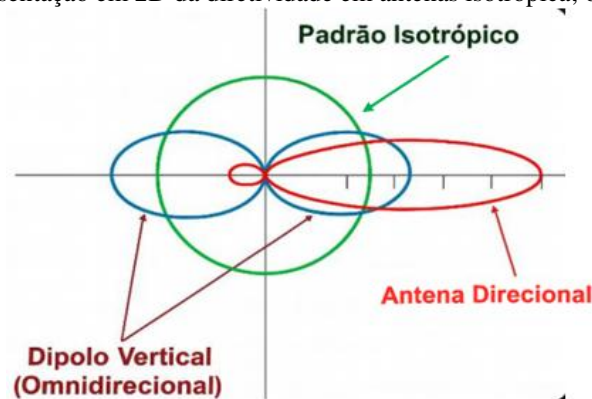
A diretividade de uma antena, corresponde à sua capacidade de concentrar a energia irradiada em uma determinada direção. Esse conceito está diretamente associado ao desempenho do sistema de comunicação, uma vez que antenas com maior diretividade conseguem transmitir ou receber sinais de forma mais eficiente em direções específicas, reduzindo perdas e interferências provenientes de outras regiões do espaço [23].

Matematicamente, a diretividade é definida como a razão entre a máxima intensidade de radiação em uma direção particular, $U_{m\acute{a}x}$, e a intensidade média de radiação em todas as direções, $U_{m\acute{e}d}$, conforme a Equação 8.

$$D = \frac{U_{m\acute{a}x}}{U_{m\acute{e}d}} \quad (8)$$

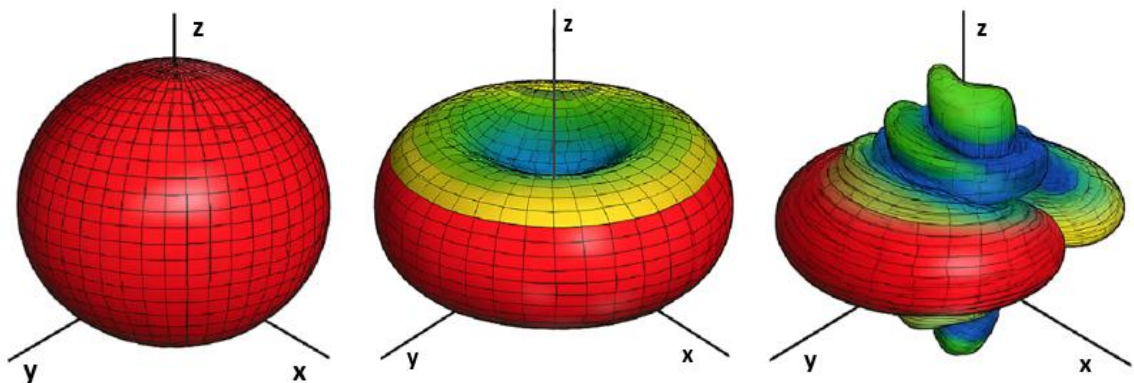
Dessa forma, trata-se de uma medida relativa que não considera a eficiência da antena, mas apenas a distribuição espacial da energia irradiada. Na prática, antenas com alta diretividade são utilizadas em aplicações que exigem enlaces de longa distância ou comunicação ponto a ponto, como sistemas de satélite, radares e enlaces de micro-ondas [19]. Por outro lado, antenas de baixa diretividade, como as omnidirecionais, são adequadas para cenários em que se deseja cobertura ampla, como em redes móveis e sistemas de transmissão de rádio. Na Figura 10 são apresentados diferentes padrões de irradiação em uma representação bidimensional, enquanto a Figura 11 mostra a correspondente representação tridimensional.

Figura 10 – Representação em 2D da diretividade em antenas isotrópica, omnidirecional e diretiva.



Fonte: [25].

Figura 11 – Representação em 3D da diretividade em antenas isotrópica, omnidirecional e diretiva.



(a) Isotrópica

(b) Ominidirecional

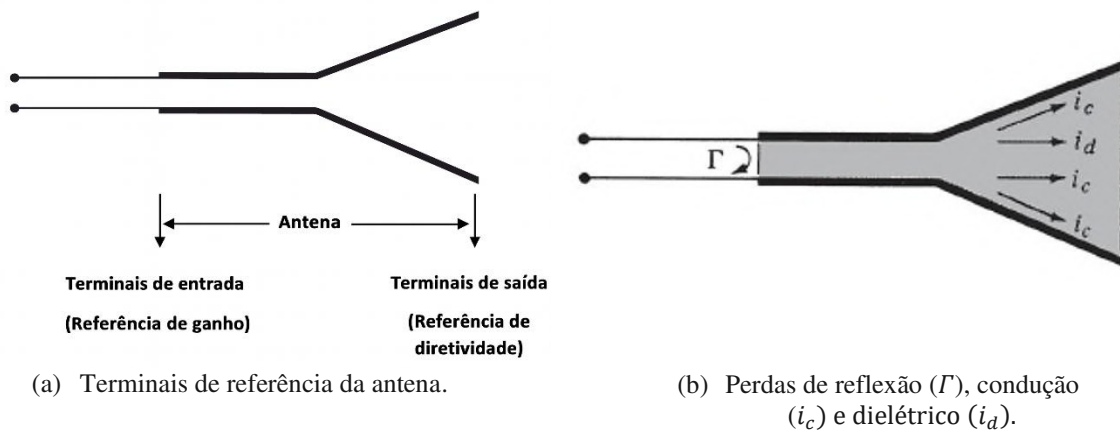
(c) Diretiva

Fonte: [26].

2.1.8. Eficiência

As antenas estão sujeitas a diferentes fatores de perda que afetam diretamente sua eficiência global. Tais perdas podem ocorrer nos terminais de entrada ou na própria estrutura da antena, sendo associadas principalmente às reflexões decorrentes do descasamento entre a linha de transmissão e a antena, além das perdas por condução e dielétricas. A Figura 12 apresenta os pontos de referência e os principais fatores de perda. A eficiência total pode ser expressa matematicamente como o produto das eficiências de reflexão, condução e dielétrica, conforme indicado na Equação 9, [10].

Figura 12 - Terminais de referência e perdas da antena.



Fonte: [10].

Onde,

e_0 = Eficiência total adimensional;

e_r = Eficiência de reflexão descasamento $1 - \Gamma^2$ adimensional;

e_c = Eficiência de condução adimensional;

e_d = Eficiência dielétrica adimensional;

Γ = Coeficiente de reflexão de tensão nos terminais de entrada da antena.

$$e_0 = e_{cd} \times e_r = e_{cd} \times (1 - |\Gamma|^2) \quad (\text{adimensional}) \quad (9)$$

O parâmetro e_0 relaciona a eficiência de irradiação aos parâmetros de ganho e diretividade da antena.

2.1.9. Ganho

O ganho de uma antena é um parâmetro que expressa a relação entre a intensidade de radiação em uma direção específica e a intensidade que seria obtida caso a potência recebida pela antena fosse distribuída de forma isotrópica. Trata-se, portanto, de uma medida adimensional que evidencia a capacidade da antena em concentrar energia em determinadas direções do espaço [10].

Matematicamente, o ganho pode ser representado pela Equação 10, em que (P_{in}) corresponde à potência de entrada e $U(\theta, \varphi)$ à intensidade de irradiação na direção considerada [8].

$$G = \frac{4\pi \times U(\theta, \varphi)}{P_{in}} \quad (10)$$

Quando não há especificação de direção, o ganho é usualmente avaliado na direção de máxima irradiação. Nesse contexto, a potência total irradiada (P_{rad}) relaciona-se com a potência de entrada (P_{in}) por meio da eficiência de irradiação (e_{cd}) [11], conforme a Equação 10.

$$P_{rad} = e_{cd} \times P_{in} \quad (11)$$

Portanto, o ganho pode ser calculado pela Equação (12)

$$G = e_{cd} \times D \quad (12)$$

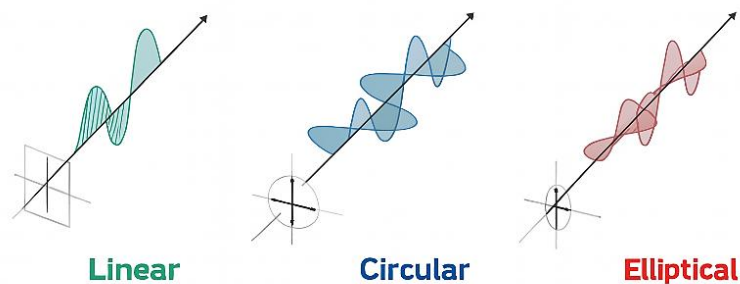
Segundo as definições do IEEE, o ganho não contempla perdas associadas ao descasamento de impedância entre a antena e a linha de transmissão, nem perdas de polarização. Para incluir tais efeitos, adota-se o conceito de ganho realizado, que corresponde ao ganho efetivo da antena descontadas as perdas decorrentes do descasamento de impedância, isto é, quando a impedância de entrada da antena difere da impedância característica da linha de transmissão [23].

2.1.10. Polarização

A polarização constitui um parâmetro fundamental no desempenho de sistemas de telecomunicações, uma vez que determina a orientação do campo elétrico da onda eletromagnética no espaço. Essa característica exerce influência direta na compatibilidade entre transmissor e receptor, visto que desalinhamentos podem ocasionar perdas significativas de

sinal. A partir da observação ao longo da direção de propagação, a polarização pode ser entendida como a trajetória descrita, ao longo do tempo, pela extremidade do vetor de campo elétrico instantâneo, ao percorrer no espaço conforme a onda se propaga [23], Figura 13.

Figura 13 – Tipos de polarização da antenna.



Fonte: [27].

Além da classificação em polarização linear, circular e elíptica, é necessário considerar parâmetros adicionais, como a pureza de polarização e a discriminação cruzada. A pureza de polarização corresponde à capacidade da antena em preservar a orientação originalmente projetada para o campo elétrico, enquanto a discriminação cruzada refere-se à aptidão do sistema em atenuar ou rejeitar sinais provenientes de polarizações distintas daquela desejada [25]. Outro aspecto de relevância é a rotação de polarização, fenômeno que pode manifestar-se em decorrência de reflexões em superfícies ou da propagação em meios heterogêneos. Esse efeito deve ser contemplado no planejamento de sistemas de comunicação, sobretudo em enlaces de longa distância ou em ambientes urbanos, nos quais a complexidade das condições de propagação tende a ser mais significativa [28].

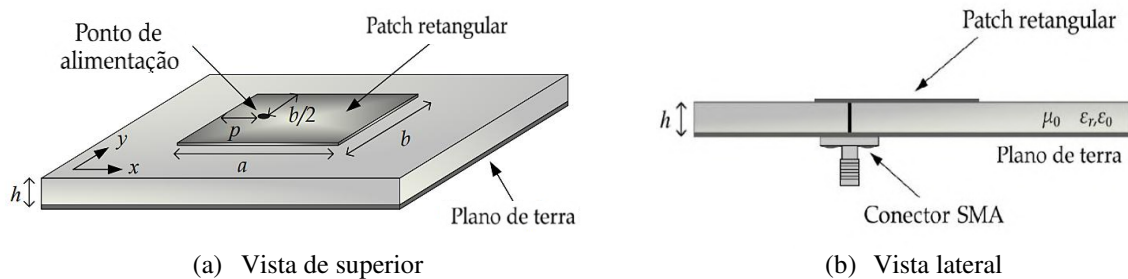
2.2. Antenas planares

As antenas planares surgiram como uma proposta inovadora na década de 1950, inicialmente apresentadas por G. A. Deschamps em 1953 [29]. Pouco depois, em 1955, pesquisadores franceses registraram a primeira patente relacionada a essa tecnologia, demonstrando o interesse crescente pela aplicação prática desse conceito. Apesar de seu surgimento teórico nos anos 50, foi apenas na década de 1970 que Howell e Munson desenvolveram as primeiras estruturas funcionais, possibilitando a utilização efetiva das antenas planares em sistemas de telecomunicações [30]. A evolução das pesquisas ao longo das décadas seguintes consolidou essas antenas como elementos fundamentais em aplicações modernas, especialmente em sistemas sem fio [31]. Sua principal vantagem está na combinação de

dimensões reduzidas, baixo peso e desempenho satisfatório, características que atendem às exigências de dispositivos cada vez mais compactos e eficientes [32].

Do ponto de vista estrutural, a antena planar é composta por duas superfícies metálicas paralelas separadas por um substrato dielétrico, conforme a Figura 14. O substrato utilizado pode ser confeccionado a partir de diferentes materiais dielétricos, cuja permissividade relativa normalmente varia entre $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$. Em geral, a espessura do substrato é significativamente inferior ao comprimento de onda guiado, $h \ll \lambda_0$, [21]. Quando se emprega uma constante dielétrica mais baixa associada a um substrato relativamente espesso, observa-se uma melhora na eficiência de radiação no espaço livre [21]. A placa superior, denominada *patch*, atua como elemento irradiador, enquanto a inferior corresponde ao plano terra.

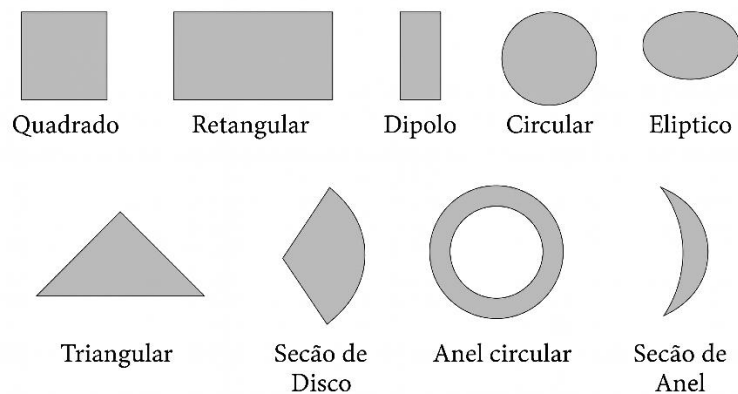
Figura 14 – Estrutura de uma antena planar alimentada por cabo coaxial.



Fonte: [33].

O elemento irradiante das antenas planares podem assumir diferentes geometrias, como quadrada, retangular, circular e dipolo, conforme a Figura 15. Esses formatos são amplamente utilizados por aliarem simplicidade de fabricação a características favoráveis de irradiação [21]. Além das configurações tradicionais, pesquisas recentes têm explorado novas formas geométricas capazes de modificar parâmetros como largura de banda, ganho e diretividade, ampliando as possibilidades de aplicação dessa tecnologia [21].

Figura 15 – Representação de formas geométricas empregadas em patches de antenas de microfita.



Fonte: [21].

2.2.1. Geometria matrioska

A busca por novas configurações geométricas em estruturas planares tem se intensificado nas últimas décadas, especialmente devido às demandas por dispositivos mais compactos e de operação multibanda. Nesse contexto, surge a chamada geometria matrioska, desenvolvida inicialmente pelo Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado (GTEMA – IFPB), em 2014, com foco em aplicações em *Frequency Selective Surfaces* (FSS). O primeiro registro científico dessa proposta foi publicado em 2014, consolidando a geometria como uma alternativa inovadora para células unitárias de FSS [34].

O conceito da matrioska é inspirado nas tradicionais bonecas russas, caracterizadas por sua disposição sucessiva de unidades encaixadas umas dentro das outras, conforme a Figura 16.

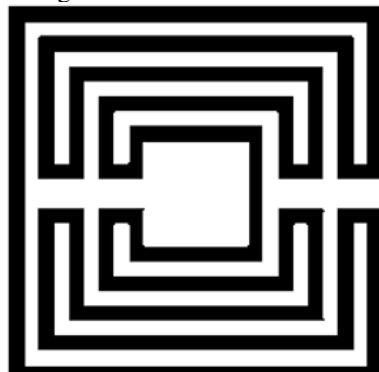
Figura 16 - Boneca russas matrioskas.



Fonte: [35].

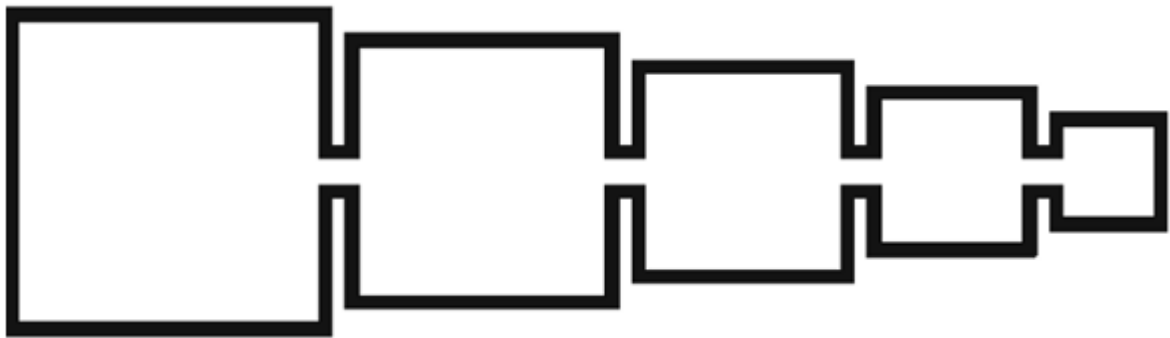
Transposta para o campo das estruturas eletromagnéticas, essa ideia se materializa em anéis concêntricos interligados, diferindo das configurações clássicas de anéis independentes, conforme as Figuras 17 e 18.

Figura 17 – Geometria matrioska.



Fonte: Autoria própria, inspiradas no trabalho [35].

Figura 18 - Geometria matrioska expandida.



Fonte: Autoria própria, inspiradas no trabalho [35].

Essa interconexão confere ao arranjo propriedades distintas, permitindo análises equivalentes a circuitos ressonantes, mas com respostas mais complexas e ajustáveis.

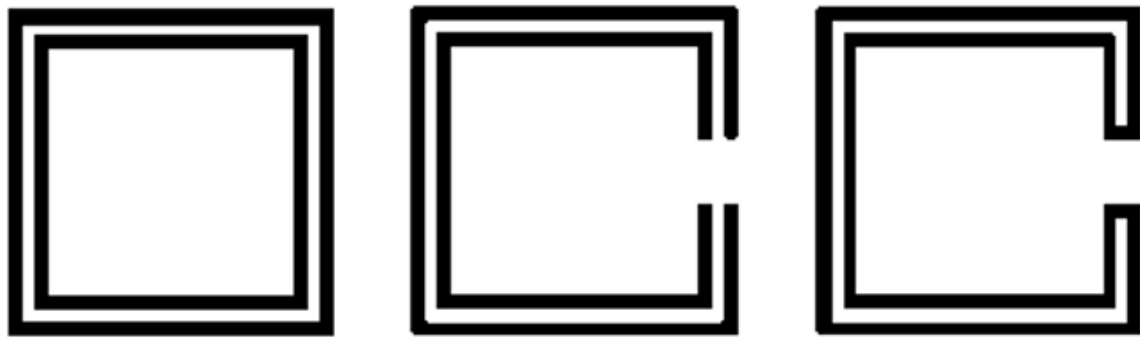
Entre os principais benefícios da geometria matrioska destacam-se:

- **Miniaturização:** possibilita reduzir dimensões físicas sem comprometer desempenho.
- **Comportamento multibanda:** favorece operação em diferentes faixas de frequência.
- **Compatibilidade com tecnologia planar impressa:** garante baixo custo, leveza, facilidade de fabricação e integração com outros componentes.

Essas características tornam a geometria matrioska especialmente atrativa para aplicações em superfícies seletivas em frequência, filtros, sensores e antenas atendendo às exigências de sistemas de telecomunicações. Assim como as bonecas russas representam uma sequência contínua de formas interligadas, a geometria matrioska traduz esse conceito em termos eletromagnéticos, resultando em estruturas versáteis e eficientes para engenharia de telecomunicações [34].

Conforme apresentado em [34], [36], a geometria matrioska é definida por anéis concêntricos interligados, cuja área total corresponde ao limite estabelecido pelo anel mais externo. Essa configuração resulta em uma estrutura única com comprimento efetivo ampliado. O processo de obtenção da geometria matrioska pode ser descrito em etapas: inicialmente são posicionados dois anéis concêntricos, Figura 19(a); em seguida, são inseridas duas fendas nas mesmas posições dos dois anéis, Figura 19(b); e, por fim, realiza-se a conexão entre eles, formando o anel matrioska, Figura 19(c). Caso seja necessário aumentar a quantidade de elementos, novos anéis concêntricos podem ser adicionados e o procedimento repetido.

Figura 19 – Formação da geometria matrioska com 2 anéis concêntricos.



(a) Dois anéis concêntricos

(b) Duas fendas inseridas

(c) Interligação dos anéis

Fonte: Autoria própria.

Quando se consideram dois anéis quadrados dispostos de forma concêntrica, conforme ilustrado na Figura 20, verifica-se que $W_{xmai} = W_{ymai} = W_{mai}$, para $i=1,2$. Nessa configuração, a primeira frequência de ressonância pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$f_{res}(GHz) = \frac{300}{L_{eff}(mm) \times \sqrt{\epsilon_{reff}}} , \quad (13)$$

O comprimento efetivo do anel é calculado por:

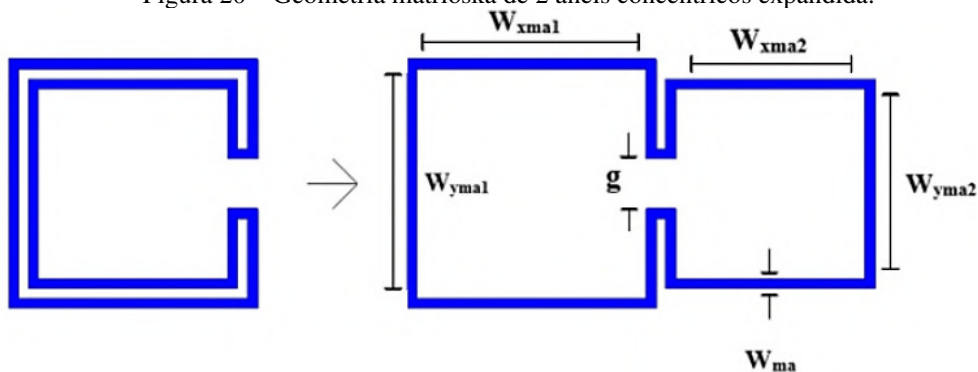
$$L_{eff} = 3 \times (w_{ma1-avg} + w_{ma2-avg}) , \quad (14)$$

A largura média de cada anel concêntrico é definida como:

$$w_{mai-avg} = w_{mai} - w_{ma} \quad i = 1, 2. \quad (15)$$

A variável ϵ_{reff} corresponde à permissividade elétrica relativa efetiva, cujo valor depende da configuração geométrica (presença ou ausência de plano terra, largura da fita, número de anéis etc.) e das propriedades do substrato, como constante dielétrica ϵ_r e espessura h .

Figura 20 – Geometria matrioska de 2 anéis concêntricos expandida.



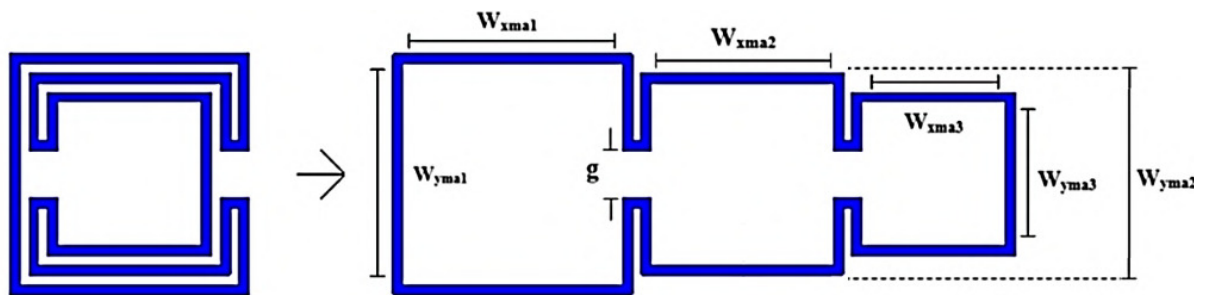
Fonte: Autoria própria.

Para a configuração com três anéis concêntricos, apresentada na Figura 21, a equação para a frequência de ressonância permanece a mesma. Entretanto, o cálculo do comprimento efetivo passa a ser:

$$L_{eff} = 3 \times (w_{ma1-avg} + w_{ma3-avg}) + 2 \times w_{ma2-avg} \quad (16)$$

Aspectos adicionais da estrutura, como a largura da fita (w_{ma}), as dimensões das fendas (g), a posição em que essas fendas são inseridas, bem como outros ajustes, podem ser alterados de acordo com a necessidade. Essas modificações permitem adequar a resposta em frequência desejada ou atender às restrições impostas pelos processos de fabricação disponíveis.

Figura 21 – Geometria matrioska de 3 anéis concêntricos expandida.

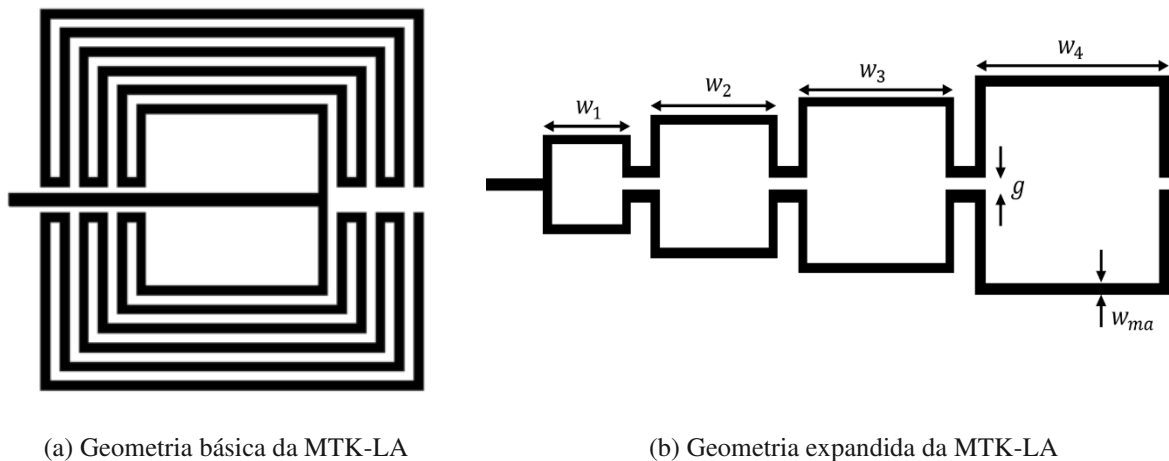


Fonte: Autoria própria.

2.2.2. Antena MTK-LA

A antena MTK-LA consiste em uma estrutura planar compacta, cujo elemento irradiador é projetado a partir da geometria matrioska, como ilustrado na Figura 22.

Figura 22 - Geometria da antena MTK-LA.



(a) Geometria básica da MTK-LA

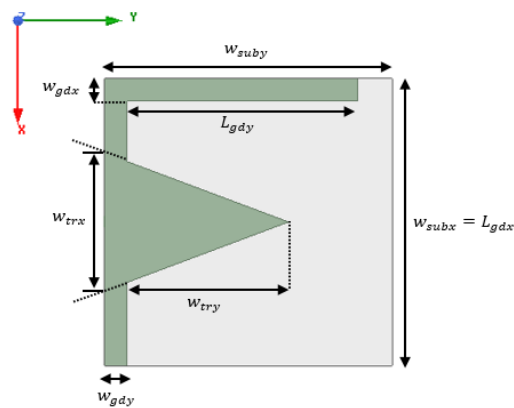
(b) Geometria expandida da MTK-LA

Fonte: [18].

Com o objetivo de reduzir a frequência de ressonância, além da utilização de anéis concêntricos interligados, foi incorporado um plano de terra parcial em formato de L, conforme ilustrado na Figura 23. Para aprimorar o casamento de impedância, acrescenta-se ainda um *patch* triangular ao plano de terra, também mostrado na Figura 23. Tanto o plano em L quanto o *patch* triangular passam por processos de otimização numérica. Entretanto, é possível adotar valores sugeridos como referência para iniciar as simulações. Entre esses valores sugeridos estão:

- Ao longo do eixo x , a dimensão em formato de L é igual a dimensão do substrato, $L_{gdx} = w_{subx}$.
- Ao longo do eixo y , $L_{gdy} = 0,8w_{suby}$.
- Para $w_{subx} = w_{suby}$, $w_{gdx} = w_{gdy} = 0,08w_{subx}$.
- Os parâmetros w_{trx} e w_{try} apresentam múltiplas possibilidades de ajuste, variando conforme a frequência de operação desejada ou a largura de banda. Essas possibilidades serão detalhadas nos resultados iniciais.

Figura 23 – Plano de aterramento parcial da antena MTK-LA.



Fonte: [18].

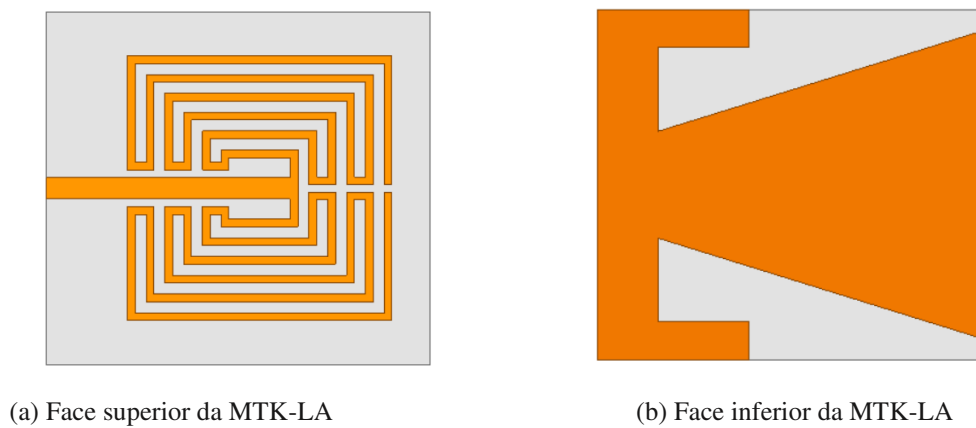
A MTK-LA apresenta dimensões compactas, atingindo $0,052\lambda_0 \times 0,052\lambda_0$ [18] e $0,033\lambda_0 \times 0,033\lambda_0$ [37] e sua largura de banda permanece inferior a 10 MHz [18], [37], o que constitui uma limitação para determinadas aplicações. O capítulo seguinte, introduz-se uma nova configuração da antena MTK-LA, analisada numericamente a partir de diferentes variações estruturais. Os resultados são apresentados graficamente, possibilitando avaliar de forma objetiva o impacto das modificações sobre seu desempenho.

Capítulo 3

3.1. Análise da Antena MTK-LA

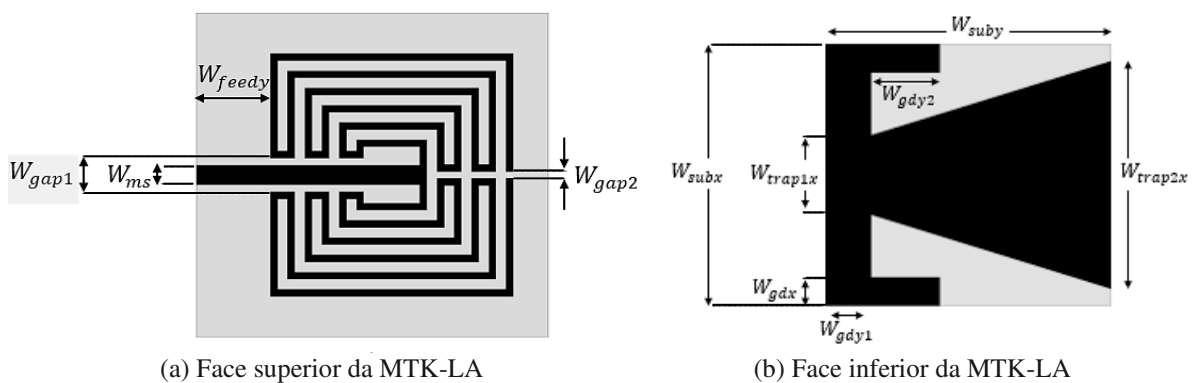
Este capítulo apresenta uma proposta revisada da antena MTK-LA, composta por um plano de terra simétrico em formato trapezoidal e um *patch* com geometria matrioska de seis anéis concêntricos. As modificações foram introduzidas com o objetivo de obter uma maior largura de banda. A Figura 24 ilustra a configuração proposta, enquanto a Figura 25 descreve os parâmetros de projeto que fundamentam a análise desenvolvida a seguir.

Figura 24 - Nova configuração da antena MTK-LA.



Fonte: Autoria própria.

Figura 25 – Parâmetros de projeto da nova configuração da antena MTK-LA.



Fonte: Autoria própria.

Em relação ao plano terra parcial trapezoidal, o processo de dimensionamento é conduzido numericamente. Alguns valores iniciais, entretanto, podem ser estabelecidos como referência, conforme descrito a seguir.

- $W_{trap1x} \approx 0.30 \times W_{subx}$,
- $W_{trap2x} \approx 0.85 \times W_{subx}$,
- $(W_{gdy1} + W_{gdy2}) \approx 0.40 \times W_{suby}$,
- $W_{gdx} < 0.50 \times (W_{suby} - W_n)$.

Na prática, o parâmetro W_{gdy1} é definido principalmente pelas condições de conectorização. Já W_{gdx} e W_{gdy2} são empregados para ajustar o desempenho do MTK-LA, o que permite diferentes combinações de dimensões para o plano terra parcial. Considerando a resposta de frequência desejada e as restrições de fabricação, os valores iniciais sugeridos podem ser modificados, dependendo da experiência do projetista da antena. A frequência de ressonância da antena MTK-LA projetada é determinada pela equação (17).

$$f_{res} = \frac{3 \times 10^8}{L_{efe} \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (17)$$

Onde o comprimento efetivo do anel da MTK-LA é calculado através da equação (18),

$$L_{efe} = 2 \left(\sum_{i=1}^n w_i \right) - n(W_{gap1} + W_{gap2}) - W_{gap2} \quad (18)$$

sendo n é o número de anéis concêntricos.

A constante dielétrica efetiva ϵ_{reff} , corresponde ao valor associado a um guia de onda coplanar sem plano terra. Ela depende da espessura do substrato h , da constante dielétrica ϵ_r , da largura da fita que compõe o anel matrioska, w_{ma} , e do espaçamento entre os anéis, definido como $s = \frac{w_{subx}}{2n}$. Esse parâmetro pode ser obtido, por exemplo, de forma prática por meio do software APPCAD [38]. Com o intuito de avaliar os procedimentos propostos, foi projetada uma antena MTK-LA projetada para operar em 930 MHz. Para tal, considerou-se um substrato FR-4, caracterizado por $\epsilon_r = 4,4$ e tangente de perdas igual a 0,02. As dimensões da antena projetada, encontram-se descritas na Tabela 2. Ressalta-se que as medidas normalizadas correspondem a $0,142\lambda_0 \times 0,155\lambda_0$, evidenciando o caráter compacto da antena.

Tabela 2 – Dimensões da nova antena MTK-LA.

W_{subx}	W_{suby}	W_{gdx}	W_{gdy1}	W_{gdy2}	W_{trap1x}	W_{trap2x}
46,0	50,0	5,0	8,0	12,0	14,0	40,0
W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	W_{ma}
10	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	1,0
W_{gap1}	W_{gap2}	W_{feedy}	W_{ms}	h	Dimensões em milímetros (mm)	
4,8	1	10,5	2,8	1,5		

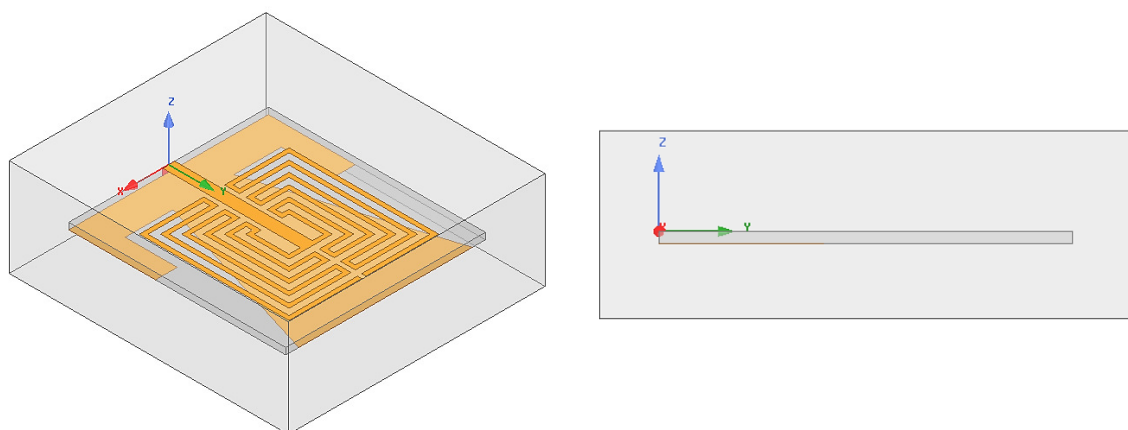
Fonte: Autoria própria.

Com base nas dimensões da Tabela 2 e nos parâmetros calculados, temos:

- Espaçamento entre os anéis (s): $S = 3,83mm$
- Comprimento efetivo do anel: $L_{efe} = 234,2mm$
- Constante dielétrica efetiva: $\epsilon_{reff} = 2,04$

A partir dos parâmetros estabelecidos e da aplicação das Equações (17) e (18), que relacionam o comprimento efetivo, a permissividade dielétrica efetiva e a frequência de ressonância, obteve-se para a antena projetada um valor teórico de 897 MHz. Os resultados numéricos foram determinados por meio do software ANSYS HFSS [39], considerando uma caixa de irradiação com dimensões de 60 mm × 64 mm × 23 mm, conforme ilustrado na Figura 26. A resposta em frequência da antena, apresentada na Figura 27, evidencia uma frequência de ressonância em 930 MHz, acompanhada de uma largura de banda de 60 MHz. A comparação entre os valores teórico e numérico demonstra uma diferença relativa de 3,7%, a qual pode ser considerada satisfatória e dentro de limites aceitáveis para uma análise inicial. Tal resultado confirma a consistência do modelo analítico empregado e a adequação do procedimento de projeto adotado.

Figura 26 – Representação da nova configuração da antena MTK-LA com a caixa de irradiação.

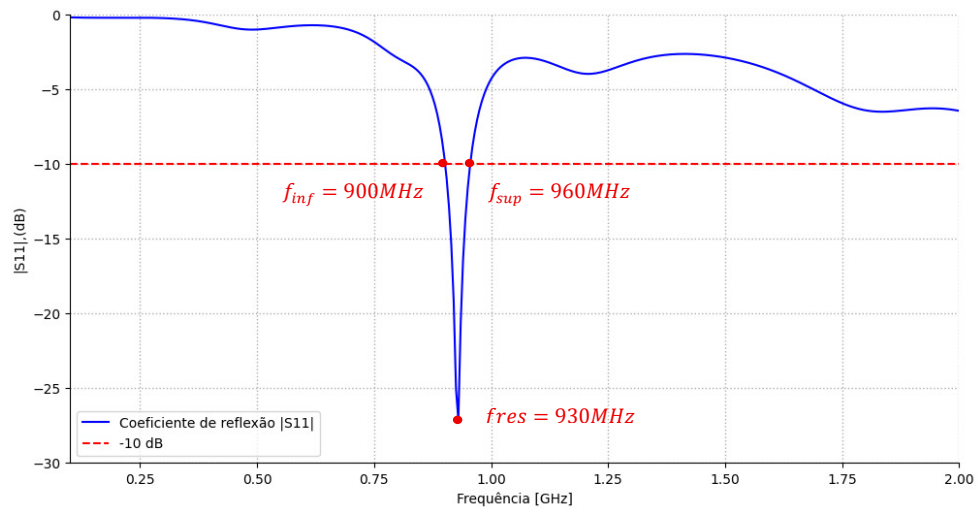


(a) Vista isométrica

(b) Vista lateral

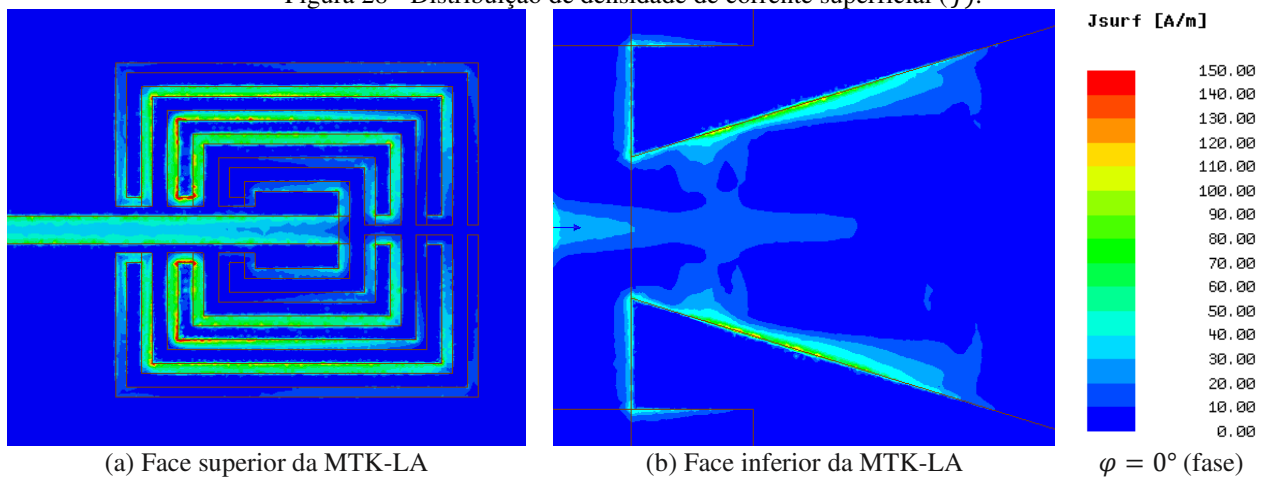
Fonte: Elaborado no Ansys - HFSS pelo próprio autor.

Figura 27 – Resposta em frequência da antena MTK-LA, $|S_{11}|$ (dB) $\times$ Frequência (GHz).



A Figura 28 apresenta a distribuição da densidade de corrente superficial na antena MTK-LA, na frequência de ressonância, 930 MHz, verificando-se, como esperado, a simetria.

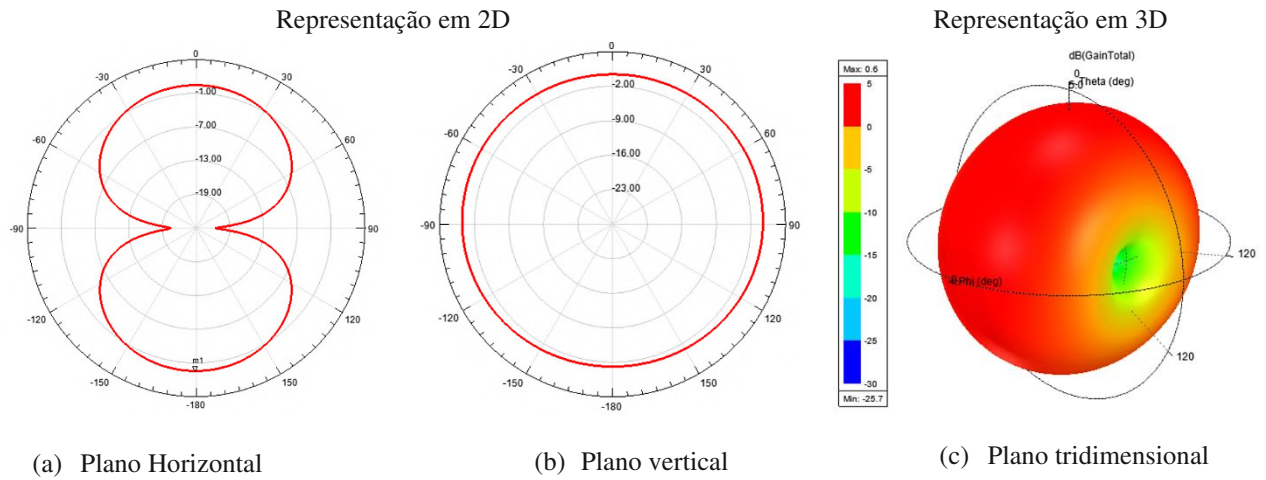
Figura 28 - Distribuição de densidade de corrente superficial ($\vec{J}$).



Elaborado no Ansys - HFSS pelo próprio autor.

Considerando a frequência de ressonância obtida numericamente, a antena MTK-LA apresentou ganho máximo de 0,6 dB, valor condizente com o desempenho esperado em estruturas com plano de terra parcial e dielétrico com perdas. As Figuras 29-a e 29-b exibem os diagramas de irradiação 2D, para $\varphi = 90^\circ$ e $\theta = 90^\circ$, respectivamente, enquanto a Figura 29-c apresenta o diagrama de irradiação 3D.

Figura 29 - Diagramas de irradiação 2D e 3D da nova configuração da antena MTK-LA.



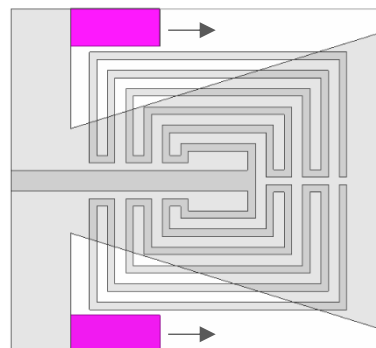
Fonte: Elaborado no Ansys - HFSS pelo próprio autor.

Uma vez projetado o protótipo numérico, foi realizada uma análise numérica dos seguintes parâmetros: W_{gd2y} , W_{trap2x} e W_6 .

3.1.1. Análise da variação do W_{gd2y}

Para início da análise foi investigado o parâmetro W_{gdy2} da antena MTK-LA, correspondente à modificação no plano terra parcial, destacada na Figura 30. A parametrização foi implementada variando valores entre 0 mm e $(w_{suby} - w_{gdy12})$, com incrementos regulares de 3mm, mantendo constante o valor de $W_{trap2x} = 25mm$. Os valores utilizados foram determinados inicialmente na Tabela 2, que reúne as dimensões adotadas inicialmente.

Figura 30 – Representação física do parâmetro W_{gd2y} a ser investigado.

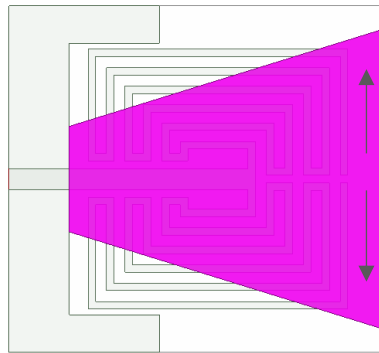


Fonte: Autoria própria.

3.1.2. Análise da variação do W_{trap2x}

Na sequência, procedeu-se à avaliação do parâmetro W_{trap2x} , associado ao plano de terra parcial, especificado na Figura 31. Os valores foram explorados no intervalo de $0mm$ até W_{subx} , adotando-se um passo constante de $4,6mm$. Essa etapa considera o resultado previamente obtido $W_{gdy2} = 15mm$, permitindo examinar de maneira integrada a influência combinada das variáveis sobre a resposta em frequência da antena MTK-LA.

Figura 31 - Representação física do parâmetro W_{trap2x} a ser investigado.

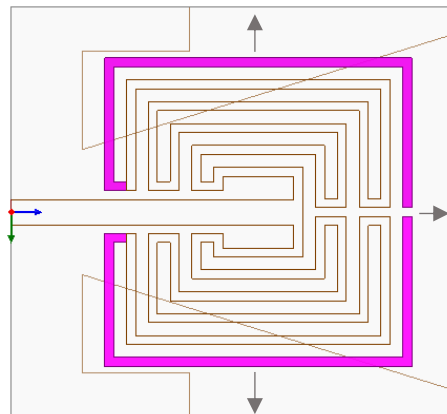


Fonte: Autoria própria.

3.1.3. Análise da variação do W_6

Por fim, foi considerada a variação do espaçamento entre os anéis no plano radiador, área especificada na Figura 32. Nessa etapa, o parâmetro W_6 assume os valores de $34,5mm$, $35mm$, $36mm$, $37mm$, $38mm$ e $39mm$. Para esta análise, serão utilizados os valores previamente obtidos de $W_{gdy2} = 15mm$ e $W_{trap2x} = 36,8mm$.

Figura 32 - Representação física do parâmetro W_6 a ser investigado.

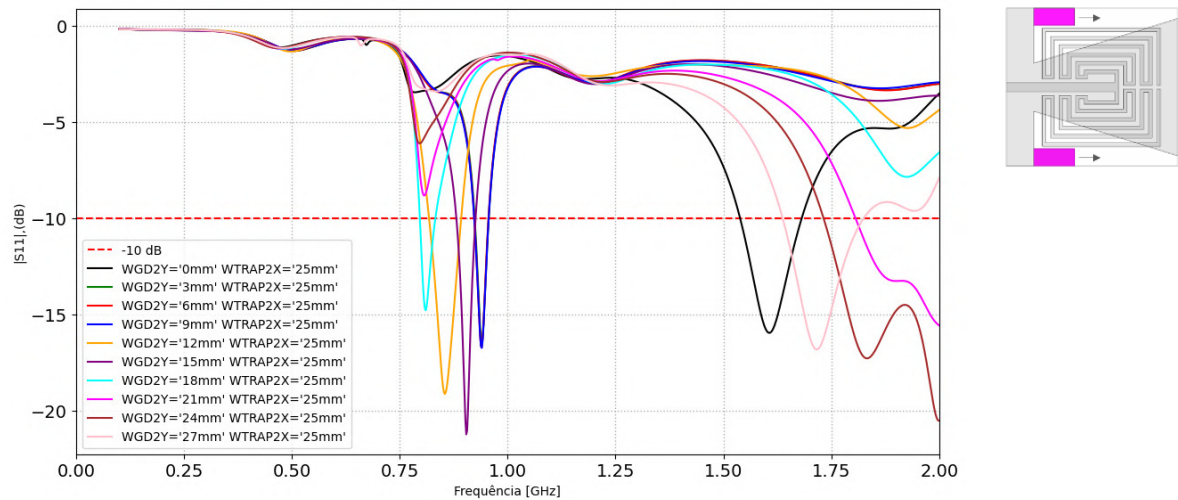


Fonte: Autoria própria.

3.2.Resultados e discussão

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos para a antena MTK-LA, considerando as respostas em frequência simuladas na faixa de 0,1GHz a 2GHz. As simulações foram realizadas no software ANSYS HFSS [37]. O resultado da primeira análise, referente à variação do parâmetro W_{gd2y} , conforme discutido anteriormente, é mostrado na Figura 33, a qual apresenta a resposta em frequência correspondente de cada curva simulada.

Figura 33 – Resposta em frequência (S_{11}) da parametrização da variável W_{gd2y} .



Fonte: Elaborado no Ansys - HFSS pelo próprio autor.

Como resultado, os valores obtidos são apresentados na Tabela 3, reunindo f_{res} , BW e $|S_{11}|$.

Tabela 3 – Resultado da parametrização da variável W_{gd2y} .

W_{gd2y}	f_{res}	BW	$ S_{11} $
0,0	1,63	60	-15,4
3,0	0,94	40	-16,69
6,0	0,94	40	-16,69
9,0	0,94	40	-16,69
12,0	0,85	70	-19,08
15,0	0,90	50	-21,23
18,0	0,81	30	-14,78
21,0	0,80	-	-
24,0	0,79	-	-
27,0	0,84	-	-
30,0	0,79	-	-
mm	GHz	MHz	dB

Fonte: Autoria própria.

A variação do parâmetro W_{gd2y} mostrou que a antena MTK-LA apresenta diferentes comportamentos de ressonância e largura de banda conforme o ajuste dessa dimensão. Entre os casos avaliados, o melhor desempenho foi obtido para $W_{gd2y} = 15,0\text{mm}$, com frequência

ressonante em 0,90GHz, largura de banda de 50 MHz e nível de reflexão $|S_{11}|$ de $-21,23\text{dB}$, indicando um melhor casamento de impedância. Em termos de largura de banda, destaca-se o caso de $W_{gd2y} = 12,0\text{mm}$, que apresentou valor superior, com $BW = 70\text{MHz}$, em comparação ao resultado de $W_{gd2y} = 15,0\text{mm}$, cujo BW foi de 50MHz . Já para $W_{gd2y} \geq 21\text{mm}$ e $W_{gd2y} = 0\text{mm}$, a resposta em frequência não atingiu o limite mínimo de -10 dB na faixa analisada e apresentando deslocamento da frequência ressonante para valores mais elevados, fora da região de interesse. Portanto, esse parâmetro tanto pode ser utilizado para fazer um ajuste da frequência de ressonância, como da largura de banda.

Na sequência, foi analisada a variação do parâmetro W_{trap2x} , considerando $W_{gd2y} = 15\text{mm}$, cuja curva de resposta em frequência é apresentada na Figura 34 e os resultados correspondentes estão reunidos na Tabela 4.

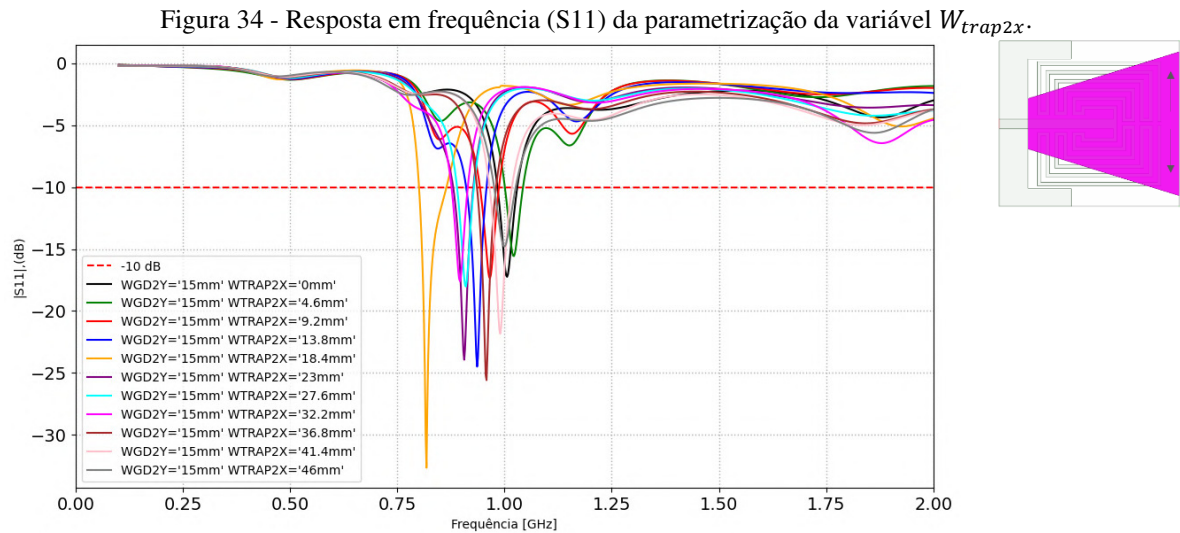


Tabela 4 - Resultado da parametrização da variável W_{trap2x} .

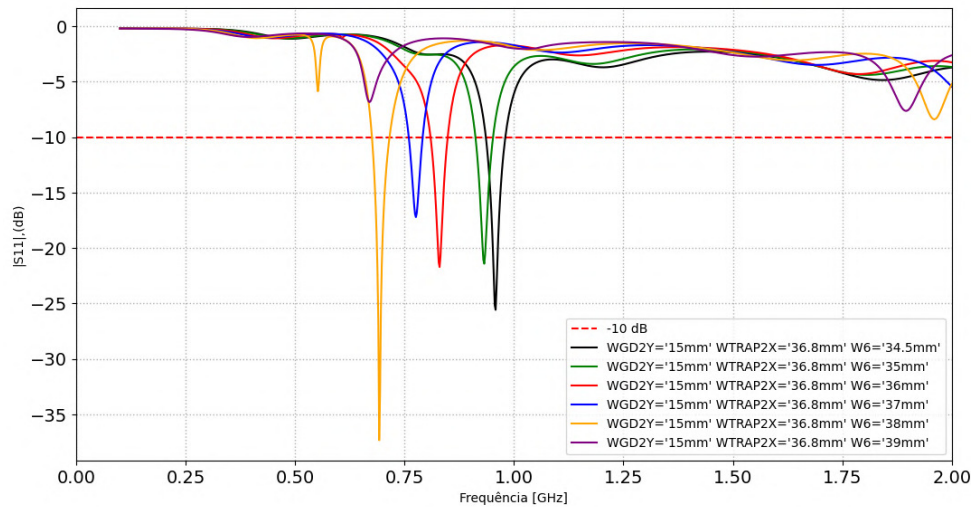
W_{trap2x}	f_{res}	BW	$ S_{11} $
0,0	1,00	50	-17,24
4,6	1,02	40	-15,56
9,2	0,96	50	-17,35
13,8	0,93	50	-24,49
18,4	0,81	60	-32,65
23,0	0,90	50	-23,93
27,6	0,91	40	-18,01
32,2	0,89	30	-17,59
36,8	0,95	40	-25,57
41,4	0,99	60	-21,83
46,0	1,00	50	-17,79
mm	GHz	MHz	dB

Fonte: Autoria Própria.

No que se refere ao comportamento da resposta em frequência, observa-se que o menor nível de reflexão foi obtido para $W_{\text{trap}2x} = 18,4\text{mm}$, com $|S_{11}| = -32,65\text{dB}$, evidenciando um excelente casamento de impedância. Valores igualmente relevantes foram verificados para $W_{\text{trap}2x} = 13,8\text{mm}$ e $W_{\text{trap}2x} = 23\text{mm}$, com $|S_{11}|$ de $-24,49\text{dB}$ e $-23,93\text{dB}$, respectivamente, além de $W_{\text{trap}2x} = 36,8\text{mm}$, que apresentou $|S_{11}| = -25,57\text{dB}$. Os maiores níveis de reflexão foram registrados para $W_{\text{trap}2x} = 4,6\text{mm}$ com $|S_{11}| = -15,56\text{dB}$, e para $W_{\text{trap}2x} = 0,0\text{mm}$ e $W_{\text{trap}2x} = 46\text{mm}$, ambos próximos de -17dB , embora estando dentro do limite esperado de -10dB . Quanto à largura de banda, os resultados mais expressivos foram obtidos para $W_{\text{trap}2x} = 18,4\text{mm}$ e $W_{\text{trap}2x} = 41,4\text{mm}$, ambos com $BW = 60\text{MHz}$. Em seguida, destacam-se os casos de $W_{\text{trap}2x} = 0,0\text{mm}$, $13,8\text{mm}$, $23,0\text{mm}$ e $46,0\text{mm}$, que apresentaram largura de banda de 50MHz . Os menores valores foram observados para $W_{\text{trap}2x} = 4,6\text{mm}$, $27,6\text{mm}$ e $32,2\text{mm}$, com largura de banda variando entre 30 e 40MHz .

A última interação considerada corresponde ao parâmetro W_6 , cuja curva de resposta em frequência é apresentada na Figura 35 e os resultados encontram-se na Tabela 5.

Figura 35 - Resposta em frequência (S_{11}) da parametrização da variável W_6 .



Fonte: Elaborado no Ansys - HFSS pelo próprio autor.

Tabela 5 - Resultado da parametrização da variável W_6 .

W_6	f_{res}	BW	$ S_{11} $
34,5	0,95	40	-25,58
35,0	0,93	30	-21,42
36,0	0,83	30	-21,71
37,0	0,77	30	-17,21
38,0	0,69	40	-37,34
39,0	-	-	-
mm	GHz	MHz	dB

Fonte: Autoria Própria.

A análise do parâmetro W_6 demonstra que o aumento das dimensões do anel matrioska provoca a redução da frequência de ressonância da antena. Esse comportamento decorre da ampliação do comprimento efetivo percorrido pelas correntes de superfície, o que aumenta o caminho eletromagnético equivalente e desloca a frequência para valores mais baixos, conforme previsto pela Equação (16). O melhor desempenho foi obtido para $W_6 = 38$ mm, com frequência ressonante de 0,69 GHz, largura de banda de 40 MHz e nível de reflexão de $-37,34$ dB, caracterizando excelente adaptação de impedância. Resultados adicionais de relevância foram observados para $W_6 = 34,5$ mm, que apresentou frequência ressonante de 0,95 GHz, largura de banda de 40 MHz e nível de reflexão de $-25,58$ dB.

Para $W_6 = 35$ mm e 36 mm, os níveis de reflexão permaneceram próximos de -21 dB, associados a uma largura de banda de 30 MHz. Já em $W_6 = 37$ mm, a resposta apresentou frequência ressonante de 0,77 GHz, largura de banda de 30 MHz e nível de reflexão de $-17,21$ dB. Todas as configurações analisadas atenderam ao critério mínimo de -10 dB, com exceção de $W_6 = 39$ mm, que deslocou a faixa de operação para além da região de interesse. Ressalta-se que valores superiores a 39 mm comprometem a análise, pois deslocam a frequência de ressonância para fora da banda desejada, reduzindo a aplicabilidade prática da antena.

A análise do parâmetro W_6 demonstra que o aumento das dimensões do anel matrioska provoca a redução da frequência de ressonância da antena. Esse comportamento decorre da ampliação do comprimento efetivo percorrido pelas correntes de superfície, ocasionando um deslocamento de frequência para valores mais baixos, conforme previsto pela Equação (17). Essa relação confirma a importância do parâmetro W_6 para o ajuste fino do projeto e para a compreensão da resposta eletromagnética da antena. Assim, a variação de W_6 evidencia a relação direta entre o aumento das dimensões do anel matrioska e a redução da frequência de ressonância.

Capítulo 4

Considerações finais

Este estudo teve como objetivo investigar o desempenho da antena MTK-LA a partir da variação de parâmetros geométricos W_{gd2y} , W_{trap2x} e W_6 , buscando compreender sua influência sobre a resposta em frequência e a eficiência de operação. As simulações realizadas no software Ansys HFSS possibilitaram a avaliação de aspectos fundamentais, como frequência ressonante, largura de banda e nível de reflexão, parâmetros essenciais para caracterizar a adaptação de impedância da antena.

Os resultados mais relevantes foram obtidos em três configurações específicas. Para o parâmetro $W_{gd2y} = 15\text{mm}$, verificou-se frequência ressonante em 0,90GHz, largura de banda de 50MHz e nível de reflexão de $-21,23\text{dB}$, evidenciando excelente adaptação de impedância. Na análise do parâmetro $W_{trap2x} = 18,4\text{mm}$, considerando $W_{gd2y} = 15\text{mm}$, observou-se desempenho superior, com frequência ressonante em 0,81GHz, largura de banda de 60MHz e nível de reflexão de $-32,65\text{dB}$, caracterizando o melhor casamento de impedância entre todas as variações. Por fim, para o parâmetro $W_6 = 38\text{mm}$, mantendo os valores previamente definidos, obteve-se frequência ressonante em 0,69GHz, largura de banda de 40MHz e nível de reflexão de $-37,34\text{dB}$. De forma geral, as análises demonstraram que ajustes geométricos cuidadosamente definidos são capazes de otimizar o comportamento da antena MTK-LA, garantindo operação eficiente na faixa de interesse, com frequências ressonantes entre 0,69GHz e 0,90GHz e níveis de reflexão consistentemente inferiores a -20 dB nas melhores configurações, com larguras de banda 40MHz até 60MHz.

Destaca-se, contudo, que os parâmetros foram analisados de forma isolada. Nesse contexto, a aplicação de técnicas de otimização numérica, como algoritmos genéticos ou redes neurais, mostra-se promissora para a determinação de soluções ótimas, permitindo a variação simultânea de múltiplos parâmetros geométricos e favorecendo a obtenção de configurações otimizadas.

REFERÊNCIAS

- [1] CARVALHO, L. P. **Introdução a Sistemas de Telecomunicações** – Abordagem Histórica. Salvador: LTC Editora, 2014.
- [2] MORGAN, Tony K. *Antenna Explained: How it works – Understanding the Science Behind Wireless Communication*. Edição digital. [S.l.]: [s.n.], 2025. 65 p. ISBN/ASIN B0FXY4N7ZB.
- [3] SOARES NETO, Vicente. *Telecomunicações avançadas e as tecnologias aplicadas*. São Paulo: Érica, 2018. 432 p. ISBN 978-8536525952.
- [4] KEARNS, Brendan Michael. *Evolution of Telecommunications: From Telegraph to 5G*. [S.l.]: Brendan Kearns, 2025. 518 p. ISBN 978-1068201509.
- [5] Emerson Soares Cruz; Yuzo Iano; Gabriel Caumo Vaz. "Evolução das redes de telefonia móvel até o 5G". *2024 Brazilian Technology Symposium*, ISSN 2447-8326, v. 1, 2024.
- [6] STATISTA. Number of smartphone mobile network subscriptions worldwide from 2016 to 2023. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/330695/number-of-smartphone-users-worldwide/>. Acesso em: 02 ago. 2025.
- [7] GENETEC. *Por que a IoT é importante na segurança física*. Blog Genetec, 2023. Disponível em: <https://www.genetec.com/br/blog/produtos/por-que-a-iot-e-importante-na-seguranca-fisica>. Acesso em: 28 dez. 2025.
- [8] AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (ANATEL). **Resolução nº 773, de 7 de novembro de 2002. Aprova o Regulamento de Numeração do Serviço Móvel Pessoal – SMP**. Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2025/2002-resolucao-773>. Acesso em: 2 dez. 2025.
- [9] ANATEL. **Regulamento sobre Equipamentos de Radiocomunicação de Radiação Restrita**. Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2017/936-resolucao-680>. Acesso em: 02 ago. 2025.
- [10] BALANIS, Constantine A. Teoria de antenas: análise e síntese. 3. ed.: LTC, 2008. v. 1. ISBN 978-8521616535.
- [11] SOUZA, Eduardo Amorim Martins de. Antenas compactas e miniaturizadas para sistemas de comunicações sem fio e nanossatélites do padrão CubeSat. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e de Computação) – Universidade Federal do

Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Natal, 2019.

- [12] CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIOS (CNM). **Licenciamento de antenas de suporte à telefonia e internet**. Brasília: CNM, 2022. Disponível em: https://cnm.org.br/storage/biblioteca/2022/Livros/2022_LIV_HABIT_Licenciamento_antenas-suporte-telefonia-internet.pdf. Acesso em: 2 dez. 2025.
- [13] D. Upadhyay and R. P. Dwivedi, "Antenna miniaturization techniques for wireless applications," 2014 Eleventh International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN), Vijayawada, India, 2014, pp. 1-4, doi: 10.1109/WOCN.2014.6923083.
- [14] D. Pepe, L. Vallozzi, H. Rogier e D. Zito, "Antena diferencial planar para sensor de radar de pulso UWB de curto alcance", em IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 12, pp. 1527-1530, 2013, doi: 10.1109/LAWP.2013.2291957.
- [15] Marcos Hiarley et al. "Redes Aéreas Inteligentes no 6G: Otimização da Cobertura com Drones e Clusterização K-Means". In: *Workshop de Redes 6G (W6G)*. SBC, 2025. p. 9-16.
- [16] Bruno de Melo Pinheiro. **Concepção das antenas internas e análise eletromagnética do Osseus, um equipamento de diagnóstico e triagem de pacientes para osteoporose**. 2021. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- [17] GTEMA – Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado. **Espelho do grupo de pesquisa**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB. Plataforma Lattes/CNPq, 1994. Disponível em: <https://dgp.cnpq.br/dgp/espelhogrupo/4348612743847139>. Acesso em: 2 dez. 2025.
- [18] NETO, Alfredo Gomes et al. "A Compact Planar Antenna Based on Matryoshka-Like Geometry". In: *19th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. IEEE, 2025. p. 01-04.
- [19] NETO, Alfredo Gomes et al. "A Matryoshka-like Geometry Planar Antenna". In: *IEEE 1st Latin American Conference on Antennas and Propagation (LACAP)*. IEEE, 2024. p. 1-2.
- [20] S. Huang, C. Hilton, S. Bush, F. Sherman and J. A. Nanzer, "A Compact Narrowband Antenna Design for RF Fingerprinting Applications," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, doi: 10.1109/TAP.2025.3627861.

- [21] BALANIS, Constantine A. Teoria de antenas: análise e síntese. 3. ed.: LTC, 2008. v. 2. ISBN 978-8521616542.
- [22] LIAO, Samuel Y. Microwave Devices and Circuits. 3. ed. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1990.
- [23] IEEE. **Standard for Definitions of Terms for Antennas – Redline. IEEE Std 145-2013 (Revision of IEEE Std 145-1993) – Redline**, vol., no., pp. 1-92, 6 mar. 2014.
- [24] TENDWIN. Parâmetros da antena Wi-Fi Bluetooth 2.4G. Sohu, 15 jun. 2020. Disponível em: https://www.sohu.com/a/401931586_120718633. Acesso em: 3 jan. 2026.
- [25] TELECO INTELIGÊNCIA EM TELECOMUNICAÇÕES. Redes Wi-Fi I: Antenas. Disponível em: https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialredeswifi1/pagina_3.asp. Acesso em: 01 dez. 2025.
- [26] TSM TELECOMUNICAÇÕES DO BRASIL LTDA. TSM Antenas. Disponível em: <https://www.tsmantenas.com.br/>. Acesso em: 21 dez. 2025.
- [27] SBG SYSTEMS. Polarização da antena. Disponível em: <https://www.sbg-systems.com/br/glossary/antenna-polarization-gnss/>. Acesso em: 11 nov. 2025.
- [28] PEREIRA, Leandro de Paula Santos. **Síntese de Antenas para Polarizações Tridimensionais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, Brasília, 2011. Disponível em: Repositório UnB. Acesso em: 05 dez. 2025.
- [29] DESCHAMPS, G. A. “Microstrip microwave antenas”. *USAF Symposium on Antennas*, 1953.
- [30] KUMAR, G.; RAY, K. P. **Broadband Microstrip Antennas**. Artech House Publishers, 2003.
- [31] SILVA NETO, Almir Souza e. **Antenas de microfita para 4G, 5G e arranjo de antenas cilíndricas**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e de Computação) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016. 194 f.
- [32] POZAR, D. M.; SCHAUBERT, D. H. **Antenas de Microfita: Análise e Projeto de Antenas e Arranjos de Microfita**. IEEE Press, Nova York, 1995.
- [33] D. C. Nascimento and J. C. da S. Lacava, "Design of Arrays of Linearly Polarized Patch Antennas on an FR4 Substrate: Design of a probe-fed electrically equivalent

- microstrip radiator," in *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 57, no. 4, pp. 12-22, Aug. 2015, doi: 10.1109/MAP.2015.2453916.
- [34] Neto, Alfredo Gomes, Jefferson Costa e Silva, Joabson Nogueira de Carvalho, and Custódio Peixeiro. 2024. "Planar Printed Structures Based on Matryoshka Geometries: A Review" *Micromachines* 15, no. 4: 469. <https://doi.org/10.3390/mi15040469>.
- [35] OVCHINNIKOV, Vladimir. Grupo de Matryoshkas. Conjunto de bonecas russas tradicionais de madeira dispostas em grupo. Dreamstime, [s.d.]. Disponível em: <https://pt.dreamstime.com/fotos-de-stock-grupo-de-bonecas-do-russo-image11415523>. Acesso em: 14 dez. 2025.
- [36] CRUZ, J. N. **Caracterização de FSS com geometria matryoshka aberta**. Dissertação (Mestrado) – Instituto Federal da Paraíba – IFPB, João Pessoa – PB, 2015.
- [37] Alfredo Gomes Neto et al. "A Matryoshka-like Geometry Planar Antenna". In: *2024 IEEE 1st Latin American Conference on Antennas and Propagation (LACAP)*. IEEE, 2024. p. 1-2.
- [38] APPCAD. Disponível em: <<http://www.hp.woodshot.com/>>. Acesso em 14/11/2025.
- [39] ANSYS. ANSYS HFSS – 3D Electromagnetic Simulation Software. Disponível em: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>. Acesso em: 02 dez. 2025.

	INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
	Campus João Pessoa - Código INEP: 25096850
	Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, CEP 58015-435, João Pessoa (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0002-56 - Telefone: (83) 3612.1200

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC

Assunto:	TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC
Assinado por:	Matheus Ferreira
Tipo do Documento:	Anexo
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- Matheus dos Santos Ferreira, ALUNO (20192610052) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - JOÃO PESSOA, em 10/02/2026 12:40:41.

Este documento foi armazenado no SUAP em 10/02/2026. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1761546
Código de Autenticação: 878270b2ea

