

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES  
*CAMPUS* PATOS DE MINAS

KEMILLY BARBOSA ATAÍDES

**ESTUDO DE DESEMPENHO DE ANTENAS PARA  
COBERTURA DE WI-FI EM AMBIENTES FECHADOS**

Patos de Minas - MG

2023

KEMILLY BARBOSA ATAÍDES

**ESTUDO DE DESEMPENHO DE ANTENAS PARA  
COBERTURA DE WI-FI EM AMBIENTES FECHADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como pré-requisito para obtenção de graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Renan Alves dos Santos

Patos de Minas - MG

2023

KEMILLY BARBOSA ATAÍDES

**ESTUDO DE DESEMPENHO DE ANTENAS PARA  
COBERTURA DE WI-FI EM AMBIENTES FECHADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como pré-requisito para obtenção de graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações. Aprovada pela banca examinadora formada por:

Patos de Minas, 27 de julho de 2023.

---

Prof. Dr. Renan Alves dos Santos, UFU/MG

---

Prof. Dr. Daniel Costa Ramos, UFU/MG

---

Prof. Dra. Karine Barbosa Carbonaro, UFU/MG

# AGRADECIMENTOS

À Deus, pela minha vida, saúde e por me ajudar a não desistir perante as dificuldades ao longo do curso.

Aos meus pais, que desde sempre me incentivaram e que mesmo à distância mostraram presentes me apoiando e me aconselhando em todas as minhas decisões.

Aos meus professores, que durante toda a graduação estiveram dispostos a ensinar e ajudar da melhor forma possível, em principal, agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Renan Alves dos Santos pela paciência, dedicação, ensinamentos e correções durante a execução de todo esse trabalho.

Aos meus colegas da universidade que contribuíram grandemente para minha formação, seja na execução de trabalhos, grupos de estudos e por tornarem a faculdade um ambiente mais descontraído.

À Universidade Federal de Uberlândia *Campus* Patos de Minas, por abrir as portas para que eu cursasse essa graduação, e ainda pela oportunidade de participar de diversas entidades que me fizeram ter aprendizados que levarei comigo para a vida toda.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigada.

# RESUMO

Desde o início da história a comunicação é essencial para atender as necessidades do ser humano. Com o surgimento da internet, e mais tarde das comunicações sem fio, a forma de se comunicar evoluiu ao ponto de permitir conexões a todo instante e praticamente em todos os lugares. Dentre as tecnologias que permitem que esse contexto seja real se destaca as conexões Wi-Fi. Características como potência, velocidade da rede, latência, alcance e escolha das antenas tem grande relevância em um bom dimensionamento da rede. Dessa forma, o presente trabalho se refere ao estudo de desempenho de três antenas comumente utilizadas para cobertura Wi-Fi em ambientes fechados operando nas frequências de 2,4 GHz, sendo elas Monopolo, Helicoidal e IFA. Em cada uma delas foram analisados os parâmetros de impedância de entrada, largura de banda, diagramas de irradiação e valores de ganho. Para tal, os estudos foram realizados no simulador ANSYS HFSS (High Frequency Structural Simulator) a partir de simulações baseadas no método dos elementos finitos. A antena Monopolo apresentou maior largura de banda (36,66%), ganho (4,04), tipo de irradiação (quase onidirecional) e volume (0,0004 m<sup>3</sup>). Para a antena Helicoidal foram observados largura de banda (3,78%), ganho (1,82), tipo de irradiação (onidirecional) e volume (0,00005 m<sup>3</sup>). Já para a antena IFA, os resultados obtidos foram largura de banda (11,34%), ganho (4,04), tipo de irradiação (não onidirecional) e volume (0,000008 m<sup>3</sup>).

**Palavras-chave:** Antenas Wi-Fi. Desempenho *indoor*. Antenas em ambientes fechados. Redes sem Fio.

# ABSTRACT

Since the history beginning, communication has been essential to meet human needs. With the emergence of the internet, and later wireless communications, the way of communicating evolved to the point of always allowing connections and practically everywhere. Among the technologies that allow this context to be real, Wi-Fi connections stand out. Features such as power, network speed, latency, range, and choice of antennas have great relevance in a good dimensioning of the network. The present work refers to the performance study of three antennas commonly used for Wi-Fi coverage indoors operating at 2.4 GHz frequencies., being Monopole, Helical and IFA. In each of them, the input impedance parameters were analyzed, bandwidth, irradiation diagrams and gain values. For this, the studies were carried out in the ANSYS HFSS simulator (High Frequency Structural Simulator) from simulations based on the finite element method. The Monopolo antenna had the highest bandwidth (36.66%), gain (4.04), type of radiation (almost omnidirectional) and volume (0.0004 m<sup>3</sup>). For the Helicoidal antenna, bandwidth (3.78%), gain (1.82), type of irradiation (omnidirectional) and volume (0.00005 m<sup>3</sup>) were observed. As for the IFA antenna, the results obtained were bandwidth (11.34%), gain (4.04), type of irradiation (non-omnidirectional) and volume (0.000008 m<sup>3</sup>).

**Keywords:** Wi-Fi antennas. Indoor performance. Indoor antennas. Wireless network

# LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Demonstração da utilização de pontos de acesso em ambientes indoor.	22
Figura 2.2 - União de duas BSS formando uma ESS.	24
Figura 2.3 – Aplicação das Leis de Ampère e Faraday em um condutor.	29
Figura 2.4 – Princípio de funcionamento de uma antena na recepção de sinais.	29
Figura 2.5 – Parâmetros de irradiação e impedância de entrada da antena.	30
Figura 2.6 – Comparação entre o diagrama de irradiação de uma antena real e da antena isotrópica.	31
Figura 2.7 – Polarização das antenas.	32
Figura 2.8 – Área de captura de uma antena receptora.	33
Figura 2.9 – Análise dos parâmetros de impedância de uma antena.	35
Figura 4.1 – Antena vertical sobre plano condutor.	39
Figura 4.2 – Dimensões da antena monopolo.	40
Figura 4.3 – Análise numérica da influência do raio da antena monopolo na resposta em frequência dos parâmetros de impedância.	41
Figura 4.4 – Ganho em três dimensões da antena monopolo para $R = 0,022\lambda$ para a frequência de 2,4GHz.	43
Figura 4.5 – Ganho em duas dimensões da antena monopolo para $R = 0,022\lambda$ para a frequência de 2,4GHz.	44
Figura 4.6 – Análise numérica da influência das dimensões do plano de terra da antena monopolo na resposta em frequência dos parâmetros de impedância.	45
Figura 4.7 – Análise numérica da influência das dimensões do plano de terra da antena monopolo no ganho em duas dimensões para a frequência de 2,4GHz.	46
Figura 4.8 – Dimensões da antena helicoidal.	47
Figura 4.9 – Análise numérica da influência do diâmetro dos condutores das espiras da antena helicoidal.	49

Figura 4.10 – Análise numérica da influência do espaçamento das espiras da antena helicoidal.	51
Figura 4.11 – Análise numérica da influência do diâmetro das espiras da antena helicoidal.	53
Figura 4.12 – Análise numérica da influência das dimensões do plano de terra da antena helicoidal.	54
Figura 4.13 – Análise numérica da influência do número de espiras da antena helicoidal.	56
Figura 4.14 – Ganho em três dimensões do modelo final da antena helicoidal para a frequência de 2,4 GHz.	57
Figura 4.15 – Ganho em duas dimensões do modelo final da antena helicoidal para a frequência de 2,4 GHz.	58
Figura 4.16 – Dimensões da antena IFA.	58
Figura 4.17 – Análise numérica da influência do comprimento L1 da antena IFA.	61
Figura 4.18 – Análise numérica da influência do comprimento L2 da antena IFA.	63
Figura 4.19 – Análise numérica da influência do comprimento W da antena IFA.	64
Figura 4.20 – Análise numérica da influência do comprimento d da antena IFA.	66
Figura 4.21 – Análise numérica da influência do comprimento Ls da antena IFA.	68
Figura 4.22 – Análise numérica da influência do comprimento Ws da antena IFA.	69
Figura 4.23 – Ganho em três dimensões do modelo final da antena IFA para a frequência de 2,4 GHz.	71
Figura 4.24 – Ganho em duas dimensões do modelo final da antena IFA para a frequência de 2,4 GHz.	71



# LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Padrões 802.11.	25
Tabela 4.1 - Valores de análise numérica da influência do raio da antena monopolo nos parâmetros de impedância.	42
Tabela 4.2 – Valores da análise numérica da influência das dimensões do plano de terra da antena monopolo.	45
Tabela 4.3 – Valores da análise numérica da influência do diâmetro dos condutores das espiras da antena helicoidal.	50
Tabela 4.4 – Valores da análise numérica da influência do espaçamento das espiras da antena helicoidal.	52
Tabela 4.5 – Valores da análise numérica da influência do diâmetro das espiras da antena helicoidal.	53
Tabela 4.6 – Valores da análise numérica da influência das dimensões do plano de terra da antena helicoidal.	55
Tabela 4.7 – Valores da análise numérica da influência do número de espiras da antena helicoidal.	57
Tabela 4.8 – Valores da análise numérica da influência do comprimento L1 da antena IFA.	62
Tabela 4.9 – Valores da análise numérica da influência do comprimento L2 da antena IFA.	63
Tabela 4.10 – Valores da análise numérica da influência do comprimento W da antena IFA.	65
Tabela 4.11 – Valores da análise numérica da influência do comprimento d da antena IFA.	67
Tabela 4.12 – Valores da análise numérica da influência do comprimento Ls da antena IFA.	68
Tabela 4.13 – Valores da análise numérica da influência do comprimento Ws da antena IFA.	70
Tabela 4.14 – Comparativo entre as três antenas analisadas.	72

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3G	Terceira geração de redes móveis
4G	Quarta geração de redes móveis
ANSYS HFSS	<i>High Frequency Structural Simulator</i>
BSS	<i>Basic Service Set</i>
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
ESS	<i>Extended Service Set</i>
EUA	Estados Unidos da América
GB	Gibabyte
Gbits/s	Gigabits por segundo
GHz	Gigahertz
IBSS	<i>Independent Basic Service Set</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
MIMO-OFDM	<i>Multiple Input Multiple Output - Orthogonal Frequency Division</i>
<i>Multiplexing</i>	
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
TIC	Tecnologias da Informação e da Comunicação
WI-FI	<i>Wireless Fidelity</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>

# LISTA DE SÍMBOLOS

$\pi$	Constante pi
Gbits/s	Gigabits por segundo
Mbits/s	Megabits por segundo
$\epsilon$	Permissividade Elétrica
$\mu$	Permeabilidade Magnética
$\sigma$	Condutividade
$r$	Distância da antena
$\vec{h}$	Vetor campo magnético [A/m]
$\vec{e}$	Vetor campo elétrico [V/m]
$\vec{d}$	Vetor densidade de fluxo elétrico [C/m <sup>2</sup> ]
$\vec{b}$	Vetor densidade de fluxo magnético [T ou Wb/m <sup>2</sup> ]
$\rho$	Densidade de carga elétrica [C/m <sup>3</sup> ];
$\vec{j}$	Vetor densidade de corrente elétrica [A/m <sup>2</sup> ];
$P_{Tx}$	Potência Total Irradiada
$S_o$	Densidade de Potência
$S_{m\acute{a}x}$	Densidade de Potência na direção de máxima irradiação
$\theta$	Ângulos coordenadas polares
$\varphi$	Ângulos coordenadas polares
$D$	Diretividade
$k$	Eficiência de Irradiação
$P'_{Tx}$	Potência irradiada considerando perdas
$G_o$	Ganho da antena
$A_e$	Área efetiva

$A_g$	Área geométrica
$\gamma_a$	Eficiência de abertura
$P_{Rx}$	Potência Recebida
$\lambda$	Comprimento de onda
$Z_{en}$	Impedância de entrada
$R_{en}$	Resistência de entrada
$R_o$	Resistência de irradiação
$R_c$	Resistência de perdas
$X_{en}$	Reatância de entrada
BW	Largura de banda de uma antena
$f_{máx}$	Frequência máxima
$f_{min}$	Frequência mínima
$\Gamma_{dB}$	Coefficiente de reflexão
L	Comprimento da antena
VF	Fator velocidade
R	Raio do monopolo
W	Largura/Comprimento do plano terra
2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
$\Omega$	Ohm
$\text{Im}\{Z_{en}\}$	Parte imaginária da impedância de entrada
S	Espaçamento entre as espiras
$R_h$	Diâmetro da espira
N	Número de espiras

RLC	Resistor (R), um indutor (L) e um capacitor (C)
Ls	Comprimento do Plano terra da antena IFA
Ws	Largura do Plano terra da antena IFA
$\lambda_g$	Comprimento de onda guiado

# SUMÁRIO

CONCEITOS INTRODUTÓRIOS .....	16
1.1 INTRODUÇÃO .....	16
1.2 PROBLEMATIZAÇÃO .....	18
1.3 TEMA DO PROJETO .....	19
1.4 OBJETIVOS .....	19
1.4.1 OBJETIVOS GERAIS .....	19
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	19
1.5 JUSTIFICATIVAS .....	19
1.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	20
REFERENCIAL TEÓRICO .....	21
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	21
2.2 PARÂMETROS DE UMA REDE WI-FI .....	21
2.2.1 TECNOLOGIA WI-FI .....	21
2.2.2 O FUNCIONAMENTO DE UMA REDE SEM FIO .....	22
2.2.3 ARQUITETURA DE REDE SEM FIO .....	23
2.2.4 PROTOCOLOS 802.11 .....	24
2.2.5 PARÂMETROS DE UMA REDE WI-FI .....	25
2.3 PARÂMETROS DAS ANTENAS QUE SÃO APLICADAS À REDES WI-FI .....	27
2.3.1 PRINCÍPIO BÁSICO DE FUNCIONAMENTO DAS ANTENAS .....	27
2.3.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DE ANTENAS .....	30
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	35
MATERIAIS E MÉTODOS .....	36
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	36
3.2 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO .....	36
3.3 RECURSOS .....	36

3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	37
	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	38
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	38
4.2	PROJETO E ANÁLISE DA ANTENA MONOPOLO.....	38
4.2.1	DIMENSÕES E CARACTERÍSTICAS DA ANTENA MONOPOLO .....	40
4.3	PROJETO E ANÁLISE DA ANTENA HELICOIDAL .....	46
4.3.1	DIMENSÕES E CARACTERÍSTICAS DA ANTENA HELICOIDAL.....	46
4.4	PROJETO E ANÁLISE DA ANTENA IFA .....	58
4.4.1	DIMENSÕES E CARACTERÍSTICAS DA ANTENA IFA .....	59
	CONCLUSÕES, CONTRIBUIÇÕES E TRABALHOS FUTUROS .....	73
5.1	CONCLUSÃO E CONTRUIBUIÇÃO .....	73
5.2	TRABALHOS FUTUROS .....	73
	REFERÊNCIAS .....	75

# CAPÍTULO 1

## CONCEITOS INTRODUTÓRIOS

---

*Neste capítulo são apresentados uma introdução ao tema e os objetivos a serem alcançados nesse trabalho. Dessa forma, seu objetivo é contextualizar o trabalho a ser desenvolvido.*

### 1.1 INTRODUÇÃO

A comunicação é algo primordial para atender as necessidades do ser humano. Isso é explicado uma vez que o ato de transmitir ou receber informações está ligado a todos os segmentos da sociedade. A necessidade de se comunicar levou o ser humano a expandir fronteiras por meio da criação de sistemas que permitiram a comunicação a longas distâncias, chegando ao conceito de telecomunicações.

Ao longo da história os dispositivos e sistemas de telecomunicações evoluíram para atender as constantes mudanças experimentadas pela sociedade. Dentre esses conceitos pode-se destacar a carta, o telégrafo, o telefone, o rádio, a televisão e por fim os aparelhos celulares (LATHI, 2012).

Apesar da evolução ao longo da história, as telecomunicações tiveram um salto exponencial tornando-se indispensável para quase tudo na vida das pessoas a partir do surgimento da Internet (COLDBACH, 2019). A Internet teve sua concepção baseada em uma rede de computadores, surgindo a partir da necessidade da comunicação a longas distâncias durante a Guerra Fria, com o intuito de proteger as bases militares dos EUA de possíveis ataques. Depois, passou a poder ser usada também por pesquisadores, estudantes, professores e por fim, alcançou a população de modo geral (DE ALMEIDA, 2005)

Porém, até então esse sistema de comunicação em rede só era possível se conectado a fios, e isso não proporcionava uma conexão simples e rápida entre os dispositivos, então para ampliar ainda mais o processo evolutivo da Internet, surgem as redes sem fio (COLDBACH, 2019). Em um caráter comparativo podemos mencionar a telefonia fixa e telefonia móvel, onde com o surgimento da segunda, as pessoas passaram a ter uma maior liberdade geográfica. Da mesma forma ocorreu com as redes não cabeadas, onde as pessoas passaram a ter maior mobilidade e visualização rápida de informações a todo momento (TELECO, 2017).



A rede sem fio (*wireless*) permite a conexão entre dispositivos sem a necessidade de cabos, sendo transmitida por meio de frequências de rádio e infravermelhos. Essa técnica funciona por intermédio de aparelhos conhecidos como roteadores, que são responsáveis por receber o sinal, decodificá-lo e emití-lo a partir de uma antena (CITTÀ TELECOM, 2016).

O uso da Internet em redes sem fio se deu no início da década de 1990 quando o IEEE (do inglês *Institute of Electrical and Electronic Engineers*) implementou um padrão para a conectividade sem fio, denominado como tecnologia IEEE 802.11, mais popularmente conhecida como Wi-Fi (COLDBACH, 2019). Esse tipo de comunicação só se tornou possível mediante a utilização de antenas nos transmissores e receptores, e também graças a modelos de propagação de ondas eletromagnéticas, capazes de determinar a qualidade das transmissões.

Uma antena pode ser definida como um conversor de sinais, onde um sinal elétrico em um meio confinado é convertido em onda eletromagnética e vice-versa, sendo o seu primeiro modelo apresentado pelo físico alemão Heinrich Hertz em 1886 (RIBEIRO, 2012).

Existem diversas configurações de antenas, que podem variar conforme às suas características eletromagnéticas (ligadas à sua geometria e materiais), cada modelo pode ser visto como mais adequado para uma determinada aplicação. Por exemplo, para aplicações de Internet no protocolo Wi-Fi deve-se utilizar antenas compactas e de baixo custo, das quais se destacam os monopolos e as antenas impressas (CHEN et al, 2016). Entretanto, cada modelo de antena (devido suas características de irradiação e de impedâncias) terá um certo desempenho em um determinado ambiente.

As antenas de roteadores Wi-Fi podem ser divididas em duas classes: antenas de uso interno acopladas ao circuito (que não ficam expostas fora da carcaça do roteador) e antenas externas. As antenas acopladas são um atrativo para redução de dimensões, entretanto, normalmente seu desempenho é inferior às antenas externas.

O Wi-Fi é dividido em alguns padrões de comunicação, que são capazes de operar em frequências próximas a 2,4 GHz e 5 GHz (COLDBACH, 2019). Dessa forma, os roteadores devem possuir um conjunto de antenas (com elementos para atender cada faixa) ou antenas com ao menos duas bandas de operação.

Além das antenas, outras variáveis influenciam na qualidade das transmissões Wi-Fi, podendo destacar: potência máxima de transmissão (normalmente ligada ao *hardware* do roteador), sensibilidade na recepção (normalmente ligada ao *hardware* do dispositivo receptor) e ruídos (gerados por outros equipamentos ou mesmo por causas naturais como a temperatura em que os componentes eletrônicos são submetidos). As características do ambiente também têm grande interferência nesta qualidade, portanto os obstáculos e à altura dos aparelhos de

transmissão e recepção devem ser considerados como fatores que interferem nos sinais recebidos. Entretanto, a escolha da antena corrente pode ser um limitante para viabilizar ou não as confecções Wi-Fi em um determinado ambiente.

## 1.2 PROBLEMATIZAÇÃO

Pesquisa realizada em 2019 pelo TIC Domicílios registra que três em cada quatro brasileiros têm acesso à Internet de modo geral, esse número corresponde a aproximadamente 134 milhões de pessoas (CANAL TECH, 2020). Além disso, por meio dessa pesquisa foi possível constatar que o aparelho celular é usado por 99% das pessoas que estão conectadas à Internet, dos quais 58% acessam a rede apenas pelo telefone móvel.

É importante destacar que o acesso à Internet via dispositivo móvel pode ser feito de duas formas: conectando-se a uma rede *wireless* (Wi-Fi) ou via rede de telefonia móvel celular (3G/4G). Porém, uma pesquisa feita pela OpenSignal em 2016 revelou que os brasileiros usam o Wi-Fi 58% do tempo em que passam conectados (TELE SÍNTESE, 2016). Esse dado deve-se ao fato do aumento de lugares com redes de acesso, como supermercados, hotéis, bares, padarias, hospitais, universidades, bancos, lojas em geral. Soma-se a isso o fato de que as redes Wi-Fi muitas vezes possuem maior velocidade para o tráfego de dados e possuem menor custo de serviço.

Além disso, é significativo destacar as redes sem fio em ambientes de produção, pois são capazes de conectar máquinas, dispositivos, produtos e pessoas, ou seja, conecta todo o processo industrial de forma eficaz trazendo grande flexibilidade e melhor comunicação para as empresas (SALTIÉL, 2017).

Em síntese, a conexão Wi-Fi pode trazer como vantagens: a centralização do gerenciamento de informações, escalabilidade pois tem a possibilidade de aumentar ou reduzir os pontos de acesso sem necessidade de grandes mudanças estruturais, redução de custos e maior mobilidade.

Com o uso cada vez mais expressivo da Internet sem fio, nota-se a necessidade de que as redes atendam esse segmento e ofereçam bom desempenho de transmissão para satisfazer a necessidade dos usuários. Uma boa transmissão de sinal Wi-Fi pode ser influenciada por vários fatores, sendo: localização do roteador, frequência de operação, interferências do ambiente e de outros dispositivos, potência de transmissão e as antenas.

Por isso, se tratando de redes Wi-Fi em ambientes fechados, nota-se a extrema importância de se ter um dimensionamento correto da rede e principalmente a escolha adequada de qual antena utilizar para cada projeto, pois isso afetará o desempenho final.

### **1.3 TEMA DO PROJETO**

Tendo em vista o aumento do uso de dispositivos que são conectados a redes sem fio, nota-se a importância de um desempenho de transmissão cada vez melhor. Além disso, sabendo que a qualidade de uma rede sem fio depende de um projeto adequado, este trabalho visa apresentar um estudo voltado a antenas aplicadas ao Wi-Fi em ambientes *indoor* com o objetivo de realizar um estudo comparativo entre os principais modelos.

### **1.4 OBJETIVOS**

Considerando a importância da Internet sem fio na vida atual da sociedade, o principal objetivo deste trabalho é propor uma análise sobre o desempenho de antenas já existentes para cobertura de Wi-Fi. Assim, visa-se estudar alguns modelos (levantando suas características principais) e apresentar estudos comparativos entre eles.

#### **1.4.1 OBJETIVOS GERAIS**

Os objetivos gerais deste trabalho de conclusão de curso se baseiam na simulação e análise de modelos de três antenas usadas para transmissão Wi-Fi na frequência de 2.4GHz que possuem suporte para os protocolos 802.11b e 802.11g. Tem em vista a aplicabilidade, os modelos escolhidos foram as antenas monopolo, helicoidal e IFA.

#### **1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Os objetivos específicos deste trabalho de conclusão de curso são:

- Realizar uma análise comparativa de dimensão entre as antenas;
- Realizar uma análise comparativa da largura de banda entre as antenas;
- Realizar uma análise comparativa entre o formato da irradiação e o valor do ganho na direção de máxima irradiação entre as antenas.

### **1.5 JUSTIFICATIVAS**

Conforme os dados apresentados na seção de Problematização, pode-se ver o aumento do uso de dispositivos que são conectados as redes sem fio, o que evidencia a sua importância na sociedade.

Na literatura encontram-se alguns trabalhos relacionados ao estudo de desempenho de enlaces sem fio em ambientes internos, podendo destacar (NAJNUDEL, 2004), (CAMBRAIA, 2014), (SILVA, 2018) e (DUARTE; CARVALHO; LEITE, 2019). Na dissertação de Najnudel (2004), o autor tem como principal objetivo desenvolver um modelo de propagação de sinais

na faixa de frequência de 2,4GHz que tenha uma boa cobertura em ambientes fechados. Para isso, os ambientes são analisados considerando as perdas de penetração em paredes de diferentes materiais, o efeito de difração das quinas das paredes, o efeito da movimentação das pessoas no ambiente de propagação e a perda de propagação com a distância. De forma semelhante, os autores Duarte; Carvalho, Leite (2019), propuseram a análise de três modelos de propagação indoor para o sinal Wi-Fi 802.11 de 2,4GHz, sendo esses: Modelo *One Slope*, Modelo ITU-R P.1238-1 e Modelo COST 231: Keenan e Motley. O estudo foi realizado com aplicação prática em um dos prédios da Universidade Federal Rural do Semi-Árido - Campus Pau dos Ferros. O autor Cambraia (2014) por sua vez, realizou um estudo e desenvolveu uma rede WLAN capaz de atender uma determinada cobertura levando em consideração todos os fatores que influenciam na construção de uma rede sem fio, como por exemplo, interferências, obstáculos, polarização e área de cobertura. Por fim, na dissertação de Silva (2018), o autor também realizou a análise da propagação de uma rede WLAN em um ambiente indoor, porém nesse projeto um software foi desenvolvido para scanear as redes existentes. Além disso, foram feitas diversas simulações de transmissão em um apartamento considerando os obstáculos de diferentes materiais e medindo os parâmetros de potência, velocidade e latência. Entretanto, o foco dessas análises está em modelos de propagação, visando levantar equacionamentos que permitam calcular as perdas em determinados ambientes. Portanto, para que uma boa propagação seja feita, a escolha de uma antena adequada para cada aplicação se faz necessária, e para que a seleção seja feita da forma mais assertiva possível, é preciso simular e analisar os parâmetros das antenas *indoor* de uso comercial.

## 1.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentadas a introdução a respeito do surgimento da Internet sem fio, a problematização, e os objetivos do presente trabalho para que se obtenha uma solução para o problema indicado.

# CAPÍTULO 2

## REFERENCIAL TEÓRICO

---

*Neste Capítulo é apresentado o referencial teórico deste trabalho de conclusão de curso. Assim, são abordados os conceitos fundamentais de uma rede Wi-Fi e sobre parâmetros das antenas aplicadas à essa tecnologia.*

### 2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para se compreender qual a melhor configuração para uma rede sem fio interna deve-se conhecer de modo mais específico as variáveis envolvidas nesta análise. Dessa forma, neste capítulo será discutido inicialmente os conceitos fundamentais do Wi-Fi e os principais parâmetros das antenas que são aplicadas a essas redes. Dessa forma, espera-se levantar as características necessárias para o desenvolvimento deste trabalho.

### 2.2 PARÂMETROS DE UMA REDE WI-FI

O desempenho de uma rede Wi-Fi pode ser influenciado por alguns parâmetros, nos quais se destacam: os padrões de comunicação, a potência, a velocidade da rede, a latência, o alcance, as características do ambiente e as antenas utilizadas (COLDBACH, 2019). Portanto, será abordado cada um desses parâmetros de modo mais aprofundado para que possamos entender a influência deles no nosso sinal. Além disso, também será tratado como ocorre o funcionamento de uma rede sem fio, a arquitetura e os principais protocolos usados na transmissão desse tipo de rede.

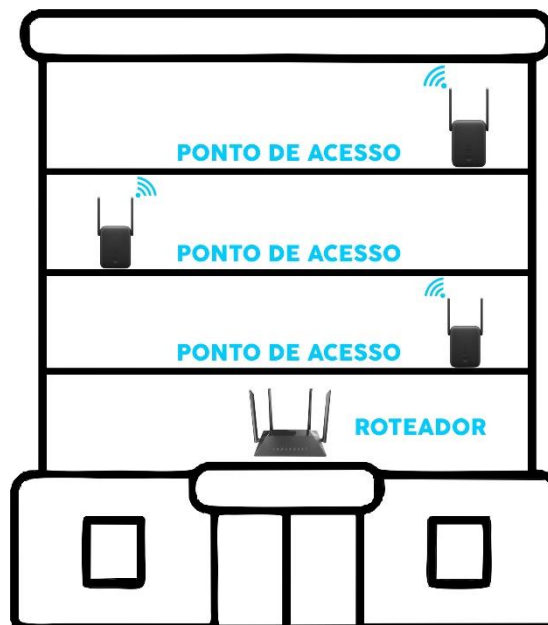
#### 2.2.1 TECNOLOGIA WI-FI

Atualmente, grande parte das conexões com a Internet ocorrem em dispositivos móveis. Segundo dados da Cisco, espera-se para 2021 cerca de 25 bilhões de dispositivos móveis conectados as redes de Internet (CISCO, 2020). Devido às limitações que as redes de telefonia móvel celular ainda apresentam no Brasil em termos de qualidade de conexão, hoje em dia a forma mais comum para que uma informação seja transmitida a um dispositivo móvel, é a tecnologia Wi-Fi, baseada no protocolo IEEE 802.11.

Para o acesso a rede de Internet via tecnologia Wi-Fi é preciso que haja uma ligação entre esses dispositivos móveis e um roteador ou uma estação base (se considerarmos uma rede de grande porte), que pode ser descrito como um ponto de acesso à rede.

Os roteadores orientam e direcionam os dados de uma rede (pacotes que contém os arquivos e comunicações e transmissões simples) através da Internet. Os pontos de acesso por sua vez, recebem o sinal de rede do roteador via cabo e convertem o sinal em *wireless*, porém a grande diferença está na aplicação, pois a capacidade de expansão do sinal nesse dispositivo é muito maior, ou seja, pode ser utilizado em ambientes corporativos pois proporcionam uma melhor transmissão do sinal, além de facilitar o processo de configuração pois basta configurar o roteador e então todos os pontos de acesso seguirão o mesmo arranjo.

**Figura 2.1 - Demonstração da utilização de pontos de acesso em ambientes *indoor*.**



Fonte: A autora.

### 2.2.2 O FUNCIONAMENTO DE UMA REDE SEM FIO

Para melhor compreensão do funcionamento de um transmissor sem fio (seja Wi-Fi ou não), é importante destacar alguns princípios básicos desse tipo de comunicação, que incluem as ondas eletromagnéticas. Após uma experiência feita por Heinrich Rudolf Hertz, foi possível perceber que as ondas eletromagnéticas podem ser geradas a partir da aplicação de correntes elétricas alternadas (com a frequência do sinal de informação) em fios de condutores em uma bobina (o que representa uma antena) dos equipamentos transmissores (JARDIM, 2007).

Toda onda eletromagnética se propagando possui uma velocidade que depende do meio material onde se encontra. No caso do ar (muito próximo das características do vácuo) pode-se

aproximar a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética qualquer à da luz cujo valor é  $3 \times 10^8 \text{m/s}$  (JARDIM, 2007). Portanto, o sistema de funcionamento de uma rede sem fio é basicamente composto pela recepção de sinal de ondas de rádio que se propagam no espaço, onde um receptor é responsável por captar as informações e traduzir na forma de sinais de rádio, que são transmitidos com o auxílio de uma antena (SÓ FÍSICA, 2021).

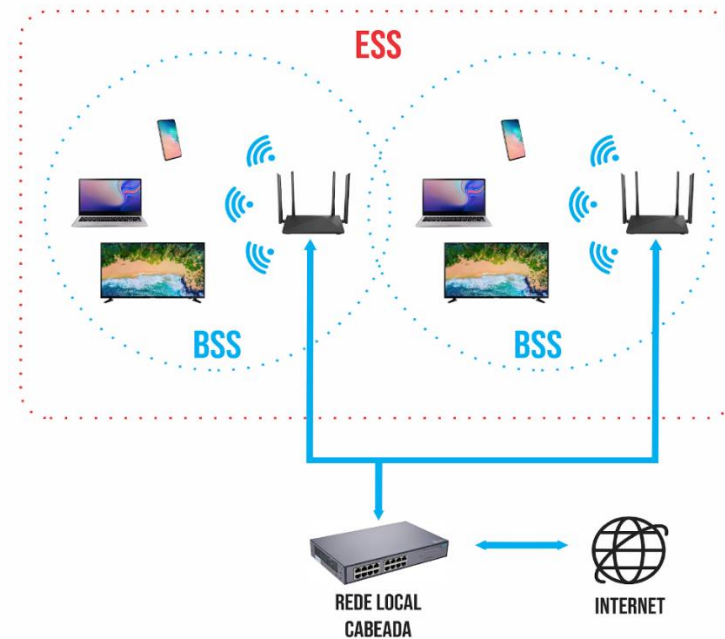
O funcionamento de uma rede sem fio é relativamente simples. É necessário a utilização de um aparelho chamado ponto de acesso (*Acess Point*) que tem a função de transformar os dados da rede (pacotes) em ondas eletromagnéticas que transportam a informação (OFICINA DA NET, 2021). Isso é feito a partir de um roteador que executa várias funções (conversão de pacotes, modulação, entre outros) e por meio de uma antena converte o sinal elétrico que chega em seus terminais em uma onda eletromagnética que será distribuída no espaço aberto de forma que atendam os parâmetros de irradiação deste irradiador.

### 2.2.3 ARQUITETURA DE REDE SEM FIO

O padrão IEEE 802.11 oferece suporte a três topologias básicas para redes local sem fios (WLANs, *Wireless Local Area Network*): conjunto de serviço básico independente (IBSS, *Independent Basic Service Set*), conjunto de serviços básicos (BSS, *Basic Service Set*) e conjunto de serviço estendido (ESS, *Extended Service Set*) (UNIVERSITY OF COLORADO, 2021). O BSS consiste em pelo menos um ponto de acesso conectado à infraestrutura de rede com fio e um conjunto de estações finais sem fio (smartphones, notebooks, smart TV, entre outros). As configurações BSS dependem de um ponto de acesso AP que atua como o servidor lógico para uma única célula ou canal WLAN.

Uma série de BSSs sobrepostas (cada uma contendo um ponto de acesso) conectadas por meio de um sistema distribuído (DS) formará um conjunto de serviço estendido (ESS, *Extended Service Set*) (ver na Figura 2.2). Embora o DS possa ser qualquer tipo de rede, na maioria dos casos é uma rede Ethernet de área local (LAN, *Local Area Network*). É importante destacar que os nós móveis (estações) podem fazer Itinerância ou *roaming* (capacidade de um usuário de uma rede para obter conectividade em áreas fora da localidade geográfica onde está registrado, ou seja, obtendo conectividade através de uma outra rede onde é visitante) entre os pontos de acesso (RAPPAPORT, 2009). Assim, é possível uma cobertura com qualidade em uma região geográfica grande com diversos pontos de acesso trabalhando na tecnologia Wi-Fi.

**Figura 2.2 - União de duas BSS formando uma ESS.**



Fonte: Autora

[Adaptado de (GTA UFRJ, 2021)]

## 2.2.4 PROTOCOLOS 802.11

O protocolo IEEE 802.11 (genericamente chamado de Wi-Fi) surgiu em 1997 para garantir a funcionalidade de redes sem fio (TANENBAUM; WETHERALL, 2011). Esse protocolo rege padrões e proporciona a interoperabilidade entre diferentes fabricantes de equipamentos alocados na rede. Desde o surgimento, o protocolo IEEE 802.11 vem evoluindo conforme as necessidades tecnológicas. Enquanto as primeiras versões possuíam capacidades bem limitadas de tráfego, atualmente as redes sem fio podem prover taxas de transferência acima de 1GB por segundo. Dessa forma, o uso cada vez maior das redes Wi-Fi tem-se sido ponto chave para a evolução desta tecnologia.

O protocolo IEEE 802.11 foi ponta pé inicial para a evolução de muitos protocolos complementares. Alguns protocolos são aplicados em atividades específicas ou até mesmo restringidos a alguns países, como é o caso do 802.11j, que opera as faixas 4.9 GHz e 5 GHz, disponíveis no Japão (GTA UFRJ, 2021).

Com a evolução do padrão IEEE 802.11, surgiram os protocolos 802.11b, 802.11a, 802.11g, 802.11n, 802.11ac e 802.11ax. A partir de 2018 a Wi-Fi Alliance anunciou uma nomenclatura mais amigável para usuário, sendo Wi-Fi 1, Wi-Fi 2, Wi-Fi 3, Wi-Fi 4, Wi-Fi 5 e Wi-Fi 6 respectivamente. Conforme apresentado na Tabela 2.1, esses protocolos podem ser



diferenciados em termos de faixa de frequências de operação, técnica de modulação (DSSS – *Direct Sequence Spread Spectrum*, OFDM – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, MIMO- OFDM – *Multiple-input multiple-output Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*, QAM – *Quadrature Amplitude Modulation*), taxas de transmissão e alcance em ambientes abertos (*Outdoor*) e fechado (*Indoor*).

**Tabela 2.1 - Padrões 802.11.**

	Frequências	Técnica de Modulação	Taxa de Dados	Alcance Outdoor	Alcance Indoor
802.11b - Wi-Fi 1	2,4-2,4835GHz	DSSS	Até 11Mbit/s	Até 140 metros	Até 35 metros
802.11g - Wi-Fi 3	2,4-2,4835GHz	DSSS, OFDM	até 54Mbit/s	Até 140 metros	Até 35 metros
802.11a - Wi-Fi 2	5,15-5,35GHz 5,47-5,725GHz 5,725-5,85GHz	OFDM	até 54Mbit/s	Até 5000 metros	Até 50 metros
802.11n - Wi-Fi 4	2,4-5GHz	MIMO-OFDM	até 600Mbit/s	-	mais de 400 metros
802.11ac - Wi-Fi 5	5GHz	256-QAM e MIMO 8×8	até 7Gbit/s	-	-
802.11ax - Wi-Fi 6	2,4-5GHz	1024-QAM	até 15Gbit/s	-	-

Fonte: A autora.

## 2.2.5 PARÂMETROS DE UMA REDE WI-FI

Conforme mencionado no item 2.2, alguns parâmetros influenciam na qualidade do sinal em uma rede Wi-Fi. Dessa forma, cada característica será abordada de forma individual nos tópicos subsequentes.

### A. POTÊNCIA

A potência refere-se à intensidade do sinal e é expressa em Watts (W). Ela está relacionada ao alcance do sinal, ou seja, quanto maior a potência, maior será o seu alcance. Esse parâmetro é medido pelo sinal emitido e o sinal recebido pelo aparelho, é importante salientar que o sinal emitido pode ser diferente do sinal recebido devido às atenuações presentes no ambiente.

Conforme apresentado na Tabela 2.1, alguns padrões 802.11 atuam em 2.4GHz e outros em 5GHz e essas frequências determinam diretamente a potência de atuação do dispositivo, quanto maior a frequência, maior será a potência. Entretanto, vale testar que o alcance não

depende apenas da potência de transmissão, mas também de outros fatores como atenuação no enlace, ganho das antenas (de transmissão e recepção) e da sensibilidade do receptor.

## **B. VELOCIDADE DA REDE**

A velocidade da rede, por sua vez, está ligada à capacidade de transmissão de informação (normalmente bits) em um determinado intervalo de tempo (normalmente expresso em segundos), ou seja, é popularmente conhecida pela quantidade de Mbps (megabits por segundo). A velocidade depende, entre outras coisas, da modulação do transmissor (quantos bits pode-se mandar a cada segundo alterando pelo menos uma das características de uma onda portadora). Como visto na Tabela 2.1, cada padrão dentro do 802.11 possui uma taxa de dados específica.

## **C. LATÊNCIA**

A latência pode ser compreendida como atraso de um sinal. Refere-se ao tempo em que a informação leva para ser enviada do ponto inicial ao seu ponto final (o caminho do transmissor ao receptor). A latência está ligada ao tempo para a informação ser processada no transmissor, ao tempo de propagação e ao tempo para a informação ser processada no receptor. Sabendo disso, podemos destacar a distância como principal causa de latência da rede, particularmente a distância entre os dispositivos dos usuários e os servidores, ou seja, quanto maior a distância, maior será o tempo gasto para levar a informação e pior a qualidade da Internet. Além disso, outros fatores podem influenciar na latência, como o tipo de conexão e a quantidade de pessoas compartilhando a mesma rede.

## **D. ALCANCE**

O alcance do enlace é a distância máxima em que o sinal pode ser recebido. Como apresentado na Tabela 2.1, cada padrão possui um alcance para ambientes fechados (*indoor*) e abertos (*outdoor*). Essa diferença deve-se ao fato de que em ambientes fechados existe uma maior interferência devido a obstáculos (como por exemplo paredes), enquanto em um ambiente aberto a quantidade de obstáculos costuma ser menor. Dessa forma, em ambientes fechados tem-se uma atenuação mais elevada se comparado com ambientes abertos. Além disso, o alcance do sinal varia conforme o dispositivo utilizado (ligado a potência na transmissão e a sensibilidade na recepção) e até mesmo de acordo com tipo da antena (que pode ser mais ou menos diretiva).

## 2.3 PARÂMETROS DAS ANTENAS QUE SÃO APLICADAS À REDES WI-FI

Uma antena pode ser compreendida como um elemento (componente) que faz a transição de uma onda confinada em um meio guiado (por exemplo um sinal de corrente elétrica) em uma onda eletromagnética que será distribuída em um meio ilimitado. Assim, pode-se definir uma antena como um conversor de sinais (sinal elétrico em onda eletromagnética e vice-versa).

### 2.3.1 PRINCÍPIO BÁSICO DE FUNCIONAMENTO DAS ANTENAS

Para entendermos o funcionamento básico das antenas, é importante ter como ponto de partida a teoria da irradiação. Para isso, pode-se partir da análise das equações de Maxwell, descritas como (RIBEIRO, 2012):

$$\vec{\nabla} \times \vec{h} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{d}}{\partial t} = \sigma \vec{e} + \varepsilon \frac{\partial \vec{e}}{\partial t} \quad (\text{a})$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{e} = -\frac{\partial \vec{b}}{\partial t} = -\mu \frac{\partial \vec{h}}{\partial t} \quad (\text{b}) \quad (2.1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{d} = \rho \Rightarrow \vec{\nabla} \cdot \vec{e} = \rho / \varepsilon \quad (\text{c})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{b} = 0 \Rightarrow \vec{\nabla} \cdot \vec{h} = 0 \quad (\text{d})$$

onde:

A equação 2.1(a) é a Lei de Ampère em que  $\vec{\nabla} \times \vec{h}$  é o rotacional do campo magnético,  $\vec{j}$  é vetor densidade de corrente elétrica [A/m<sup>2</sup>],  $\frac{\partial \vec{d}}{\partial t}$  é a densidade de corrente de deslocamento [A/m<sup>2</sup>],  $\sigma$  é condutividade elétrica [S/m],  $\vec{e}$  é vetor campo elétrico [V/m],  $\varepsilon$  é a permissividade dielétrica do meio [F/m] e  $\frac{\partial \vec{e}}{\partial t}$  é a taxa de variação do campo elétrico no tempo.

A equação 2.1(b) Lei de Faraday em que  $\vec{\nabla} \times \vec{e}$  é o rotacional do campo elétrico,  $\frac{\partial \vec{b}}{\partial t}$  é a densidade de fluxo magnético [T ou Wb/m<sup>2</sup>],  $\mu$  é permeabilidade magnética do meio [H/m] e  $\frac{\partial \vec{h}}{\partial t}$  é a taxa de variação do campo magnético no tempo.

A equação 2.1(c) Lei de Gauss para campos elétricos em que  $\vec{\nabla} \cdot \vec{d}$  é o Divergente do fluxo elétrico,  $\rho$  é a densidade de carga elétrica [C/m<sup>3</sup>] e  $\vec{\nabla} \cdot \vec{e}$  é o divergente do campo elétrico.

A equação 2.1(d) Lei de Gauss para campos magnéticos em que  $\vec{\nabla} \cdot \vec{b}$  é o divergente do fluxo magnético e  $\vec{\nabla} \cdot \vec{h}$  é o divergente do campo magnético.

A Lei de Ampère, aplicada sobre o condutor, pode ser simplificada para (RIBEIRO, 2012):

$$\vec{\nabla} \times \vec{h} = \vec{j} \quad (2.2)$$

Então, fisicamente, pode-se dizer que uma corrente variável no tempo ( $\vec{j}$ ) circulando na superfície de um condutor será responsável pelo surgimento de um campo magnético ( $\vec{h}$ ) que irá circular no espaço (o que representa a operação matemática rotacional), conforme ilustrado na Figura 2.3. Como a corrente elétrica é variável no tempo, o campo magnético também terá um comportamento harmônico no tempo.

A Lei de Faraday apresenta que um campo magnético variável no tempo situado em um meio (como permeabilidade magnética  $\mu$ ) qualquer produzirá um campo elétrico que irá circular no espaço. Ou seja, o campo magnético que foi originado pela circulação da corrente elétrica no condutor produzirá um campo elétrico que também será variável no tempo como ilustrado na Figura 2.3.

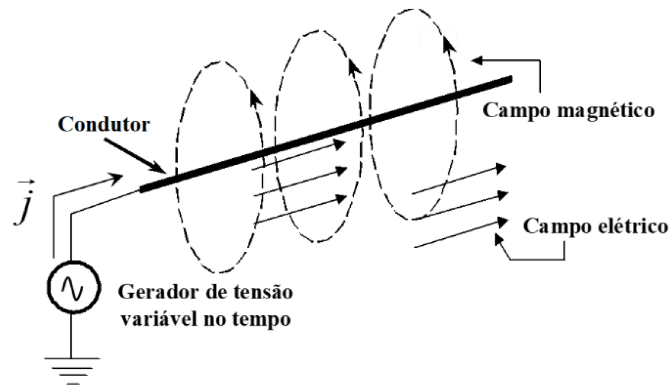
A Lei de Ampère, já analisada no meio ilimitado, pode ser simplificada para:

$$\vec{\nabla} \times \vec{h} = \frac{\partial \vec{d}}{\partial t} = \epsilon \frac{\partial \vec{e}}{\partial t} \quad (2.3)$$

Ou seja, um campo elétrico variável no tempo em meio (com permissividade elétrica  $\epsilon$ ) qualquer produzirá um campo magnético harmônico no tempo. Com isso, o campo elétrico produzido por um campo magnético (que surgiu devido a circulação de corrente no condutor) irá produzir campo magnético variável no tempo. Assim, observa-se que de forma sucessiva tem-se o surgimento de campos elétricos e magnéticos já no ambiente aberto que irá variar no

tempo e no espaço. Esse conceito caracteriza a propagação de uma onda eletromagnética que surgiu a partir de uma corrente elétrica. Esse conceito define o funcionamento de uma antena como conversor de sinais.

Figura 2.3 – Aplicação das Leis de Ampère e Faraday em um condutor.



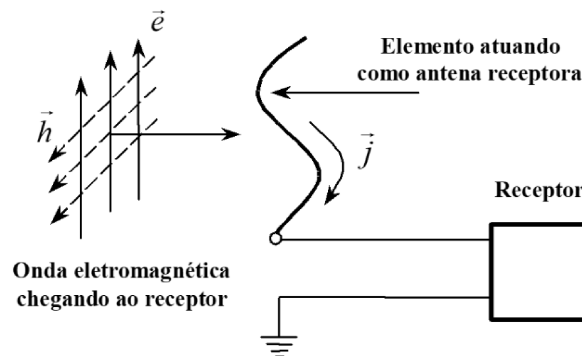
Adaptado de (RIBEIRO, 2012).

A onda eletromagnética gerada em uma antena transmissora irá se propagar pelo espaço aberto (em uma sucessiva conversão entre campos elétrico e magnético) até incidir sob um elemento que atuará como antena receptora conforme ilustrado na Figura 2.4. Da Lei de Ampère, aplicada sobre o condutor, tem-se a seguinte relação:

$$\vec{j} = \sigma \vec{e} \quad (2.4)$$

Fisicamente pode-se dizer que um campo elétrico incidente em um condutor (com condutividade  $\sigma$ ) irá produzir a circulação de corrente nesse elemento. Assim, quando a onda eletromagnética entra em contato com um elemento condutor ele atuará como uma antena convertendo essa onda em sinal elétrico.

Figura 2.4 – Princípio de funcionamento de uma antena na recepção de sinais.

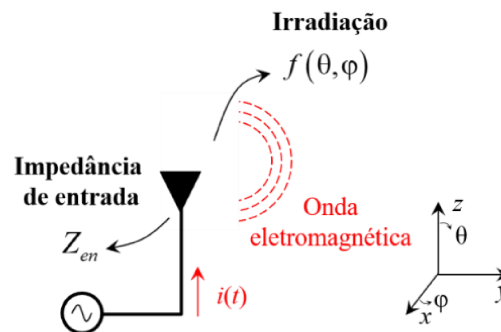


Adaptado de (RIBEIRO, 2012).

### 2.3.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DE ANTENAS

Existem diversos tipos de antenas que atendem diferentes aplicações. Basicamente, os parâmetros que diferem as diferentes antenas podem ser divididos em dois tipos: de irradiação e impedância de entrada. Conforme ilustrado na Figura 2.5, os parâmetros de irradiação demonstram a interação da antena com o meio ilimitado e os parâmetros de impedância de entrada demonstram a interação da antena com o gerador ou guia de ondas.

Figura 2.5 – Parâmetros de irradiação e impedância de entrada da antena.



Fonte: A autora.

## A. PARÂMETROS DE IRRADIAÇÃO

Os parâmetros de irradiação podem ser divididos em diagrama de irradiação, diretividade, eficiência de irradiação, ganho, polarização e área efetiva.

### A.1. DIAGRAMA DE IRRADIAÇÃO

O diagrama de irradiação é um modelo matemático ou uma representação gráfica das propriedades de irradiação da antena como uma função de coordenadas espaciais (em duas ou três dimensões). Tipicamente, para ter um elemento de referência do comportamento de irradiação de uma antena real, faz-se uso de um irradiador hipotético, capaz de irradiar igualmente em todas as direções, denominado antena isotrópica. Em uma antena isotrópica a potência irradiada se distribui radialmente como em uma esfera conforme ilustrado na Figura 2.6. Então, a distribuição de potência por unidade de área (densidade de potência) em um ponto  $p$  à uma distância  $r$  da antena é dada por (RIBEIRO, 2012):

$$S_0 = \frac{P_{Tx}}{4\pi r^2} \quad (2.5)$$

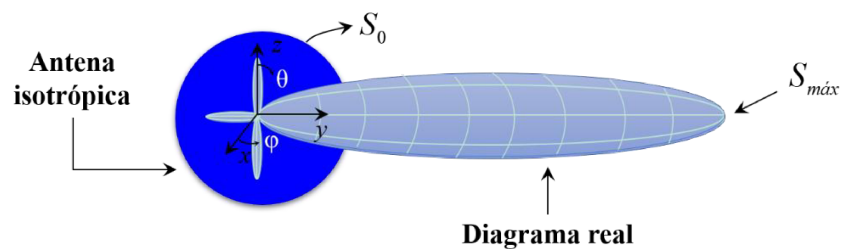
onde  $P_{Tx}$  representa a potência total a ser irradiada.

Nas antenas reais ocorrem direções preferenciais nas quais se tem maior potência irradiada conforme ilustrado na Figura 2.6, de modo que a densidade de potência depende de uma função ( $f(\theta, \varphi)$ ) que representa como a antena lança energia no espaço, dada por (RIBEIRO, 2012):

$$S(\theta, \varphi) = S_{m\acute{a}x} f(\theta, \varphi) \quad (2.6)$$

onde  $S_{m\acute{a}x}$  é o valor da densidade de potência na direção de máxima irradiação e  $\theta$  e  $\varphi$  são os ângulos de coordenadas polares que representam a posição do espaço analisada.

**Figura 2.6 – Comparação entre o diagrama de irradiação de uma antena real e da antena isotrópica.**



Fonte: A autora.

## A.2. DIRETIVIDADE

A diretividade ( $D$ ) de uma antena real pode ser entendida como a capacidade de concentrar energia em um ponto do espaço em relação a antena isotrópica. Então, a comparação entre  $S_{m\acute{a}x}$  e  $S_0$ , conforme ilustrado na Figura 2.5, pode ser expressa na Equação (2.7):

$$D = \frac{S_{m\acute{a}x}}{S_0} \Rightarrow D(\text{dB}) = 10 \log(D) = 10 \log\left(\frac{S_{m\acute{a}x}}{S_0}\right) \quad (2.7)$$

## A.3. EFICIÊNCIA DE IRRADIAÇÃO

Nas antenas reais podem acontecer perdas no processo de conversão de um sinal elétrico em uma onda eletromagnética. As causas da perda de potência na antena podem ser, perdas nos condutores por onde circulam correntes, perdas nos dielétricos submetidos à tensão de excitação, perdas por descasamento de impedância, entre outras (RIBEIRO, 2012). Sabendo que as perdas reduzem a potência irradiada, chega-se ao conceito da eficiência de irradiação, dada pela Equação (2.8):

$$k(\%) = \frac{P'_{Tx}}{P_{Tx}} \times 100\% \quad (2.8)$$

onde  $P'_{Tx}$  representa a potência que foi irradiada já levando em consideração as perdas no processo da irradiação.

#### A.4. GANHO

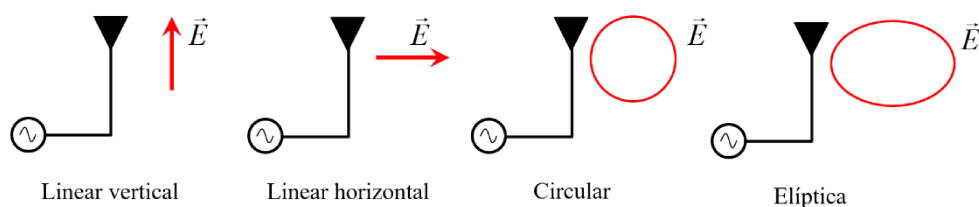
O ganho de potência de uma antena, ou simplesmente ganho da antena, mostra sua capacidade de concentrar a energia em determinada direção já levando em consideração às perdas na irradiação (RIBEIRO, 2012). Diferente da diretividade, o ganho é uma relação entre a densidade máxima de potência da antena em análise e a densidade de potência de outra antena qualquer tomada como referência (que pode ser ou não a isotrópica). Para a situação mais comum, tendo a antena isotrópica como referência, o ganho é expresso na Equação (2.9):

$$G_o = \frac{S'_{máx}}{S_o} = k \frac{S_{máx}}{S_o} = kD \Rightarrow G_o (\text{dBi}) = 10 \log(G_o) \quad (2.8)$$

#### A.5. POLARIZAÇÃO

A polarização descreve a orientação vetorial do campo elétrico irradiado (RIBEIRO, 2012). Ou seja, demonstra qual é a orientação do campo elétrico lançado ao ambiente aberto aos eixos de coordenadas espacial. Conforme ilustrado na Figura 2.7, a polarização de uma antena pode ser linear (vertical, horizontal ou podendo até mesmo ser inclinada), circular ou elíptica.

Figura 2.7 – Polarização das antenas.



Fonte: A autora.

#### A.6. ÁREA EFETIVA

Os parâmetros de irradiação de antenas (o ganho, a diretividade, o diagrama de irradiação) e as propriedades relativas à impedância (que serão estudados a seguir) têm os mesmos valores quando a antena funciona como receptora, ou quando funciona como



transmissora. Esse conceito é conhecido como teorema da reciprocidade (BALANIS, 2005). Entretanto, há características mais úteis quando referidas à antena receptora, por exemplo, a área útil de captação da antena. A principal delas é denominada como área efetiva.

Toda antena na recepção possui uma área (não necessariamente é igual sua área geométrica) na qual é capaz de captar os sinais presentes no meio ilimitado. No caso ideal a área efetiva de captura ( $A_e$ ) é igual a área geométrica ( $A_g$ ). Entretanto, normalmente tem-se  $A_e < A_g$ , de onde vem o conceito de eficiência de abertura ( $\gamma_a$ ):

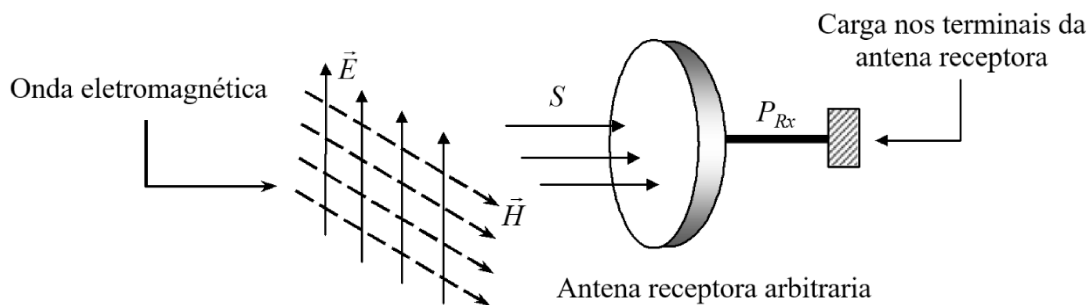
$$\gamma_a (\%) = \frac{A_e}{A_g} \times 100\% \quad (2.9)$$

A relação entre potência recebida  $P_{Rx}$  e a densidade de potência incidente  $S$  na antena receptora tem unidade de área, sendo denominada área efetiva  $A_e$  ilustrada na Figura 2.8, expressa por (RIBEIRO, 2012):

$$A_e = \frac{P_{Rx}}{S} = \frac{\lambda^2 D}{4\pi} \quad (2.9)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda da frequência do sinal recebido pela antena.

**Figura 2.8 – Área de captura de uma antena receptora.**



Adaptado de (RIBEIRO, 2012).

## B. PARÂMETROS DE IMPEDÂNCIA

Os parâmetros de impedância podem ser devidos em impedância de entrada da antena e coeficiente de reflexão.

### B.1. IMPEDÂNCIA DE ENTRADA

Para o transmissor, os terminais de uma antena se comportam como a entrada de uma linha de transmissão. Então, a irradiação para o transmissor é como se houvesse uma carga

consumindo a energia na terminação da linha. Dessa forma, toda antena possui uma impedância de entrada ( $Z_{en}$ ), dada por (RIBEIRO, 2012):

$$Z_{en} = R_{en} + iX_{en} \quad (2.10)$$

A parte real da impedância de entrada de qualquer antena pode ser decomposta em resistência de irradiação ( $R_o$ ) e resistência de perdas ( $R_c$ ), onde:

$$R_{en} = R_o + R_c \quad (2.11)$$

onde a resistência de irradiação é o efeito correspondente à potência irradiada pela passagem da corrente elétrica e a resistência de perdas é o efeito correspondente à potência dissipada (perdida) pela passagem da corrente elétrica no processo de irradiação. Assim, pode-se relacionar as resistências de irradiação e perdas com a eficiência de irradiação como (RIBEIRO, 2012):

$$k = \frac{P'_{Tx}}{P_{Tx}} = \frac{R_o}{R_o + R_c} \quad (2.12)$$

A parte imaginária da impedância de entrada pode apresentar uma reatância indutiva (quando for positiva) ou uma reatância capacitiva (quando for negativa). Uma reatância remete a energia armazenada (como acontece nos capacitores e indutores), assim, a existência de um valor  $X_{en}$  é algo indesejável. Dessa forma, tipicamente nos projetos de qualquer antena se trabalha para que na frequência de operação o valor de  $X_{en}$  seja zero (caracterizando ressonância) ou seja o menor possível.

## B.2. COEFICIENTE DE REFLEXÃO

Entre a linha de alimentação e antena existe uma junção. Como essas duas partes podem ter impedâncias distintas, o estudo do casamento de impedâncias é importantíssimo para definir a qualidade de uma antena. Uma forma de estudar o casamento de impedâncias é a partir da análise do coeficiente de reflexão, dado por (RIBEIRO, 2008)

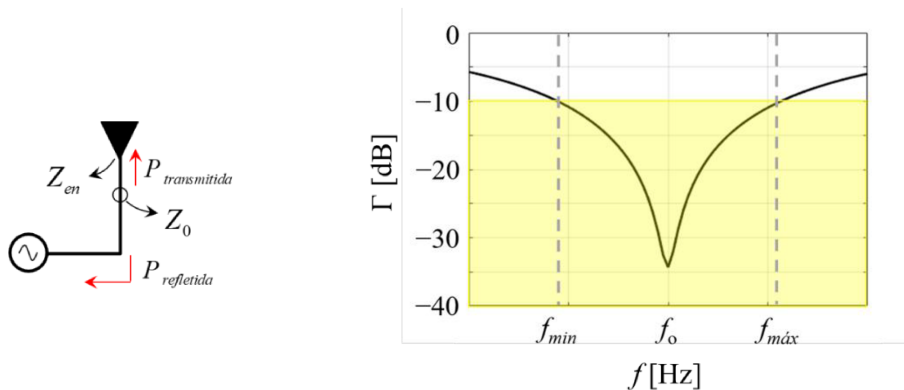
$$\Gamma = \frac{Z_{en} - Z_o}{Z_{en} + Z_o} \quad (0 \leq |\Gamma| \leq 1) \Rightarrow \Gamma_{dB} \text{ (dB)} = 20 \log \left( \frac{Z_{en} - Z_o}{Z_{en} + Z_o} \right) \quad (-\infty \leq |\Gamma_{dB}| \leq 0) \quad (2.13)$$

O módulo ao quadrado do coeficiente de reflexão mede o percentual de potência refletida na junção entre a linha e a antena conforme ilustrado na Figura 2.9(a), de modo que:

$$P_{\text{refletida}} = |\Gamma|^2 P_{Tx} \quad \text{e} \quad P_{\text{transmitida}} = (1 - |\Gamma|^2) P_{Tx} \quad (2.14)$$

Em casos práticos considera-se a banda de uma antena ( $BW = f_{\text{máx}} - f_{\text{min}}$ ) em termos de casamento de impedância limitada entre as frequências em que  $\Gamma_{\text{dB}} \leq -10\text{dB}$  (ver na Figura 2.9(b)). Isso garante que ao menos 90% da potência disponível pelo gerador é entregue a antena, podendo então ser convertida em onda eletromagnética.

**Figura 2.9 – Análise dos parâmetros de impedância de uma antena.**



(a) Ilustração da antena.      (b) Ilustração da resposta em frequência do coeficiente de reflexão.

Fonte: A autora.

É importante destacar que  $Z_0$  pode assumir diferentes valores dependendo da tecnologia e dos padrões de telecomunicações de certa localidade. Todavia, na maioria dos serviços e sistemas de telecomunicações operando na faixa de radiofrequência e micro-ondas tem-se  $Z_0 = 50\Omega$ . Por esse motivo, esse é o valor da impedância de referência utilizada para quantificar todos os estudos que envolvem coeficiente de reflexão nesse trabalho.

## 2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados os conceitos básicos de uma rede sem fio e os principais parâmetros de antenas usadas nas redes com padrões Wi-Fi. Essas informações não são o foco do projeto, porém são base para o estudo sobre antenas para roteadores de uso interno e externo. A partir delas será possível compreender e analisar a qualidade das antenas comerciais aplicadas em Wi-Fi na segunda etapa desse trabalho de conclusão de curso.

# CAPÍTULO 3

## MATERIAIS E MÉTODOS

---

*Neste capítulo é apresentada a metodologia de desenvolvimento para esse trabalho de conclusão de curso. Dessa forma, são discutidas as etapas do trabalho de conclusão de curso 1 e 2 e os recursos necessários para o projeto.*

### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O objetivo desse trabalho é análise numérica de três antenas tipicamente utilizadas nas transmissões de sinais Wi-Fi em ambientes *indoor*, antenas monopolo, helicoidal e IFA. Dessa forma, segue-se uma metodologia voltada ao estudo teórico (principalmente livros) e simulações eletromagnéticas a partir do método dos elementos finitos do programa comercial *Ansys Electronics Desktop*.

### 3.2 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO

Para realizar o estudo comparativo entre as antenas aplicadas ao Wi-Fi realizou-se um conjunto de simulações numéricas. Para tal, teve-se com métricas de desempenho a impedância de entrada na frequência de 2,4 GHz, largura de banda (dado pelo estudo do coeficiente de reflexão) e a irradiação (dada pelo estudo dos diagramas de irradiação e valores de ganho da direção de máxima irradiação). Além disso, realizou-se um estudo comparativo das dimensões das antenas para operarem na mesma faixa de frequências.

### 3.3 RECURSOS

As análises numéricas propostas foram realizadas utilizando o programa comercial ANSYS HFSS (*High Frequency Structural Simulator*) com acesso remoto à máquina disponibilizada pelo professor Danilo Henrique Spadoti da Universidade Federal de Itajubá. Isso se deu devido ao curso de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações do campus de Patos de Minas não possuir a licença do simulador.

### **3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Nesse capítulo foram apresentadas a metodologia e os recursos necessários para o desenvolvimento desse trabalho de conclusão de curso. A partir dessas informações, tem-se a bagagem necessária para o levantamento de resultados e das discussões que serão descritas no Capítulo 4.

# CAPÍTULO 4

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

---

*Neste capítulo é apresentado os resultados esperados para a segunda etapa desse trabalho de conclusão de curso.*

### 4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nesse capítulo serão apresentados os resultados e discussões a respeito das três antenas aplicadas a tecnologia Wi-Fi. Dessa forma, mostra-se os resultados de simulação de cada uma das antenas de modo independentes e por fim, nas conclusões finais do capítulo, é demonstrado um estudo comparativo entre as principais características dessas antenas.

Para melhor compreensão dos resultados, a apresentação dos estudos será dividida em:

- Projeto e análise da antena monopolo;
- Projeto e análise da antena helicoidal;
- Projeto e análise da antena IFA.

### 4.2 PROJETO E ANÁLISE DA ANTENA MONOPOLO

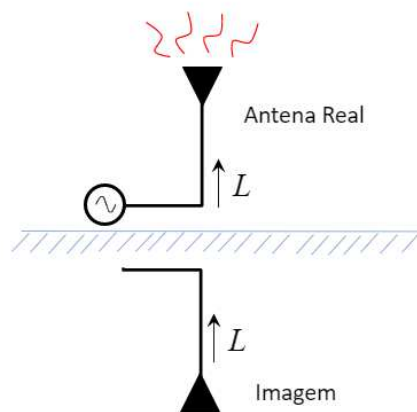
Para entendermos as análises que serão feitas e os resultados obtidos, primeiramente é necessário apresentar uma fundamentação teórica sobre as antenas monopolo, também conhecidas como monopolo vertical ou antena linear vertical próxima a um solo condutor de qualidade.

De forma prática, fisicamente o processo de irradiação dessa antena pode ser explicado pela emissão de uma onda que gera uma onda refletida em um plano condutor (ver na Figura 4.1). Acima desse plano, os campos das duas ondas se unem e o campo resultante é uma combinação da onda emitida pela antena real com a onda emitida por uma imagem da antena dentro da região de reflexão. Para fins de análise, consideramos que o plano de reflexão não existe, e o campo total no ar é a sobreposição do campo de duas antenas, a antena real e sua imagem (RIBEIRO, 2012).

Quando essa antena é muito curta em comparação com o comprimento da onda que está transmitindo, a extremidade da antena fica muito próxima a imagem. Isso faz com que o sistema

funcione como se fosse uma única antena com o dobro do tamanho real, ou seja,  $2L$ . Então, como pode ser visto na Figura 4.1, nessas condições a antena real e a sua imagem se comportam como braços de um dipolo. Assim, o valor tem-se o valor de  $L = \lambda/4$  como sendo um dos mais utilizados em projeto, visto que nessa condição o diagrama de irradiação da antena tende a ser onidirecional no plano perpendicular ao monopolo, o que é visto como importante característica para transmissões de sinais em tecnologias como o Wi-Fi.

**Figura 4.1 – Antena vertical sobre plano condutor.**



Fonte: A autora.

Essa antena e sua imagem formam um dipolo equivalente alimentado no centro, ou seja, o monopolo vertical é considerado um dos “braços” desse dipolo. Ao alimentar um monopolo, uma tensão é aplicada entre seu terminal e o plano condutor. Isso significa que, para a mesma corrente de entrada, apenas metade da tensão de um dipolo simétrico é necessária. Além disso, devido ao comprimento monopolo vertical ser a metade do dipolo equivalente, a resistência de irradiação do monopolo é também metade do valor de um dipolo, de modo que (RIBEIRO, 2012):

$$R_{\text{monopolo}} = \frac{R_{\text{dipolo}}}{2} \quad (4.1)$$

Então, para um monopolo de comprimento  $L = \lambda/4$  tem-se o valor teórico  $R_{\text{monopolo}} \cong 36,6\Omega$ , visto que para o dipolo em que cada braço tem  $L = \lambda/4$  tem-se  $R_{\text{dipolo}} \cong 73,15\Omega$ .

Devido a existência do plano refletor, a energia irradiada pelo monopolo é concentrada apenas na metade do espaço em que irradiaria um dipolo. Assim, tem-se como resultado uma densidade de potência como o dobro da concentração de energia em certa direção do espaço, o

que leva a diretividade da antena monopolo ser duas vezes maior em comparação a antena dipolo, modo que (RIBEIRO, 2012):

$$D_{\text{monopolo}} = 2D_{\text{dipolo}} \quad (4.2)$$

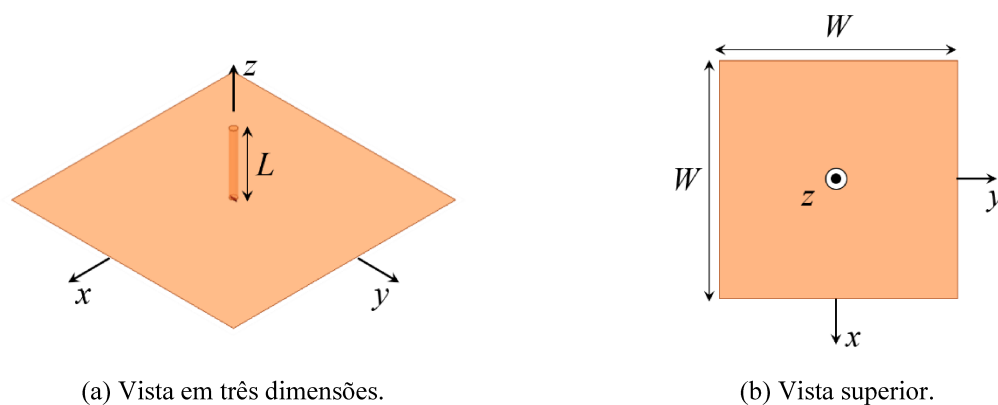
Então, para um monopolo de comprimento  $L = \lambda/4$  tem-se o valor teórico  $D_{\text{monopolo}} \cong 3,28$  (5,15dB), visto que para o dipolo em que cada braço tem  $L = \lambda/4$  tem-se  $D_{\text{dipolo}} \cong 1,64$  (2,15dB).

É importante mencionar que os comportamentos apresentados nas equações (4.1) e (4.2) são válidos apenas para o plano condutor (que geralmente é intitulado como plano de terra) perfeito (com condutividade infinita) com dimensões infinitas. Na prática tais condições não existem, por isso, os valores  $R_{\text{monopolo}}$  e  $D_{\text{monopolo}}$  podem variar de projeto para projeto, dependendo das características do plano de terra.

#### 4.2.1 DIMENSÕES E CARACTERÍSTICAS DA ANTENA MONOPOLO

Nessa seção são apresentados os parâmetros necessários para determinar as dimensões de uma antena monopolo. Basicamente, conforme ilustra a Figura 4.2, tem-se como dimensões de projeto o comprimento ( $L$ ) e o raio do monopolo ( $R$ ) e o comprimento ( $W$ ) e largura ( $W$ ) do plano de terra.

**Figura 4.2 – Dimensões da antena monopolo.**

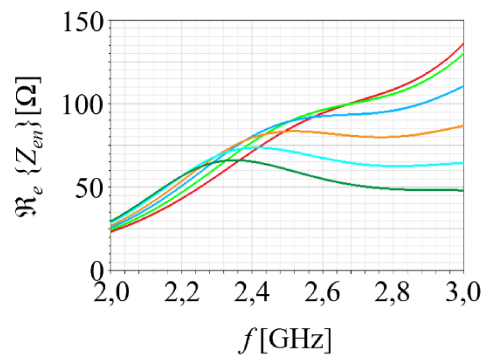


Fonte: A autora.

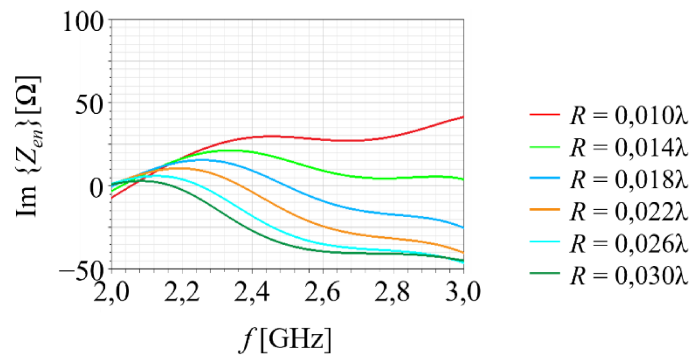


O raio  $R$  é uma variável que afeta principalmente a impedância de entrada da antena, entretanto, não há uma equação que leva ao cálculo de seu valor em projetos. Por esse motivo, análises numéricas a respeito dessa variável são fundamentais para o melhor funcionamento da antena. Assim, para quantificar a influência de  $R$  realizou-se um estudo numérico no simulador ANSYS HFSS, fixando  $L = \lambda/4$  (valor esse que será adotado em todo o projeto) e  $W = 0,8\lambda$  (variável que será melhor estudada a seguir), onde  $\lambda = 125\text{mm}$ , valor calculado para a frequência de 2,4GHz e estudou-se os valores de  $R$  entre  $0,006\lambda$  e  $0,030\lambda$ . Para tal, considerou-se os condutores do dipolo e do plano de terra como perfeitos. Os principais resultados desse estudo são apresentados na Figura 4.3 e na Tabela 4.1.

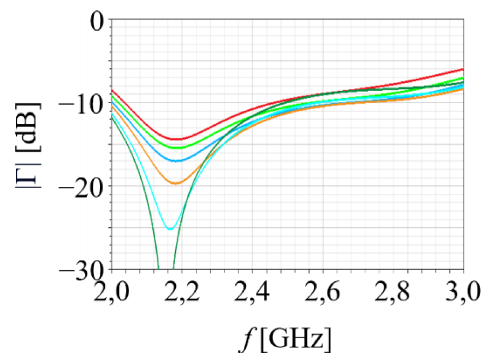
**Figura 4.3 – Análise numérica da influência do raio da antena monopolo na resposta em frequência dos parâmetros de impedância.**



(a) Parte real da impedância de entrada.



(b) Parte imaginária da impedância de entrada.



(c) Coeficiente de reflexão.

Fonte: A autora.

**Tabela 4.1 – Valores da análise numérica da influência do raio da antena monopolo nos parâmetros de impedância.**

$R (\lambda)$	Impedância de entrada para $f = 2,4 \text{ GHz}$		Banda para $ \Gamma  [\text{dB}] \leq -10\text{dB}$		
	$\Re_e \{Z_{en}\} [\Omega]$	$\text{Im} \{Z_{en}\} [\Omega]$	$f_{min} [\text{GHz}]$	$f_{máx} [\text{GHz}]$	$Bw(\%)$
0,006	63,35	35,15	2,065	2,399	14,96
0,008	67,55	32,21	2,049	2,431	17,05
0,010	71,08	29,09	2,037	2,466	19,05
0,012	73,85	25,67	2,029	2,504	20,96
0,014	76,74	20,19	2,019	2,575	24,21
0,016	79,02	15,11	2,011	2,621	26,34
0,018	80,23	9,06	2,003	2,682	29,00
0,020	80,63	2,32	1,996	2,715	30,52
0,022	79,41	-3,77	1,992	2,710	30,54
0,024	77,35	-10,87	1,985	2,645	28,51
0,026	73,51	-18,13	1,976	2,588	26,82
0,028	69,89	-22,87	1,972	2,536	25,02
0,030	65,29	-26,94	1,969	2,495	23,57

Fonte: A autora.

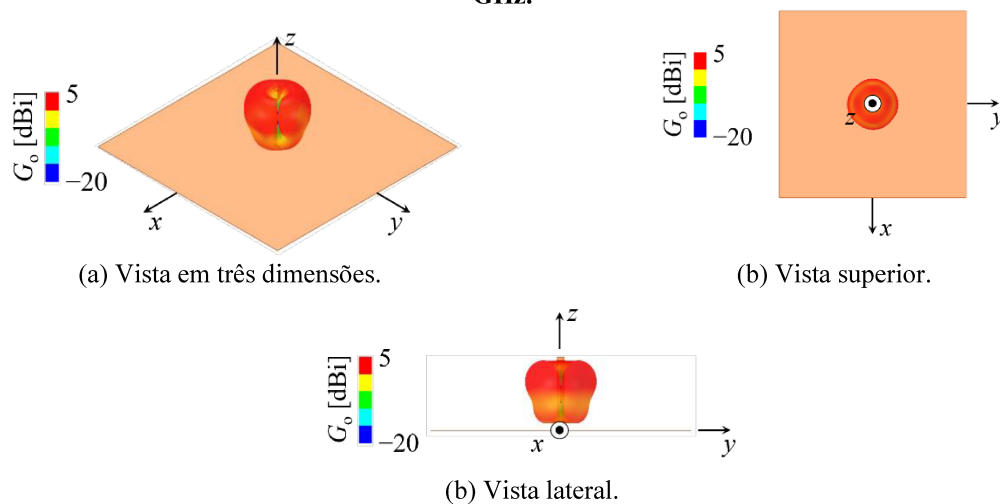
A Figura 4.3 apresenta o comportamento dos parâmetros de impedância do estudo em função dos valores de  $R$ . Na Figura 4.3(a) tem-se o comportamento da parte real da impedância de entrada ( $\Re_e \{Z_{en}\}$ ) onde se percebe que para a frequência de 2,4GHz (frequência de projeto) a resistência tende a crescer até atingir um pico e volta a reduzir como o aumento de  $R$ , com valores variando entre  $60\Omega$  e  $80\Omega$ . Desse modo, se percebe que para dimensões finitas do plano de terra o valor da parte real da impedância de entrada difere-se do que é previsto teoricamente na equação (4.1). Na Figura 4.3(b) tem-se o comportamento da parte imaginária da impedância de entrada ( $\text{Im} \{Z_{en}\}$ ) onde se percebe que para a frequência de 2,4GHz (frequência de projeto) a reatância tende a diminuir com o aumento de  $R$ , com valores variando entre  $35\Omega$  e  $-27\Omega$ . Desse modo se percebe que para dimensões finitas do plano de terra o valor da parte imaginária da impedância de entrada difere-se do que é previsto teoricamente na equação (4.1), não sendo nula (condição de ressonância) para todos os valores de  $R$ . Entretanto, nota-se (observando a Tabela 4.1) que para  $R$  entre  $0,020\lambda$  e  $0,022\lambda$  atinge-se a condição de ressonância, ou seja, quando a antena opera de maneira mais eficiente e a parte imaginária é nula ou próxima de zero. Na Figura 4.3(c) tem-se o comportamento do módulo do coeficiente de reflexão onde se percebe que a banda de operação (definida para  $|\Gamma| [\text{dB}] \leq -10\text{dB}$ ) tende a crescer até atingir um valor máximo e volta a reduzir com o aumento de  $R$ , com valores variando entre 14,96% e 30,54% da frequência central. Nessa abordagem (observando a Tabela 4.1) fica evidente que  $R = 0,022\lambda$  é o responsável pelo maior valor da largura de banda,  $Bw = 30,54\%$ . Por esse motivo, esse valor será o adotado nesse trabalho.

Após definir o valor  $R$  em função do estudo dos parâmetros de impedância, analisou-se o comportamento do ganho da antena na frequência de 2,4 GHz. Para tal, definiu-se  $L = \lambda/4$ ,

$W = 0,8\lambda$  e  $R = 0,022\lambda$ , onde  $\lambda = 125\text{mm}$ . Os principais resultados dessa análise são apresentados nas Figura 4.4 e 4.5.

Na Figura 4.4 tem-se o comportamento do diagrama de irradiação de ganho em três dimensões (sobreposto a antena). Observa-se que o plano de terra reflete a parte inferior da irradiação, porém não totalmente por ser finito. Assim, cria-se um diagrama de irradiação quase onidirecional no plano perpendicular a antena, com ganho na direção de máxima irradiação  $G_o = 3,15\text{ dBi}$ . Desse modo se percebe que para dimensões finitas do plano de terra o valor do ganho (que nesse caso é igual a diretividade pelos condutores empregados na antena serem perfeitos) difere-se do que é previsto teoricamente na equação (4.2).

**Figura 4.4 – Ganho em três dimensões da antena monopolo para  $R = 0,022\lambda$  para a frequência de 2,4 GHz.**



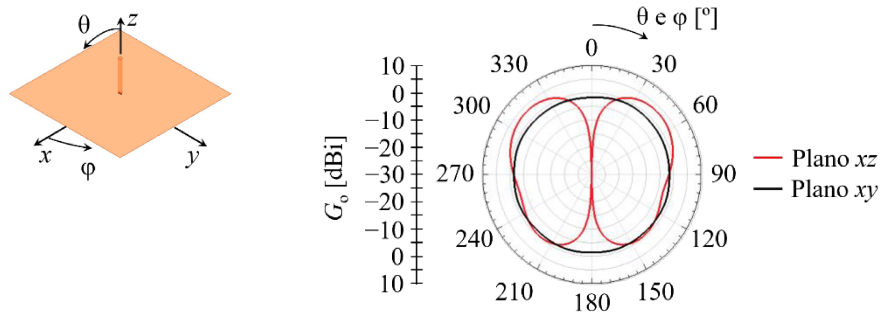
Fonte: A autora.

Para uma melhor visualização na Figura 4.5 tem-se o comportamento do diagrama de irradiação de ganho em duas dimensões em corte realizados nos planos  $xz$  e  $yz$ . Observa-se que na horizontal (plano  $xy$  que varia com o ângulo de coordenadas esféricas  $\phi$ ) o diagrama é onidirecional, porém nessa situação não se tem a máxima irradiação. Observa-se que na vertical (plano  $xz$  que varia com o ângulo de coordenadas esféricas  $\theta$ ) o diagrama tende a concentrar a máxima irradiação para em  $\theta \cong 46^\circ$ , comportamento esse já esperado devido a influência do plano de terra.

As dimensões do plano de terra ( $W \times W$ ) também são variáveis que afetam a impedância de entrada da antena e, além disso, modificam o formato da irradiação. Entretanto, também não há uma equação que leva ao cálculo de seu valor em projetos. Por esse motivo, análises numéricas a respeito dessa variável são fundamentais para o melhor funcionamento da antena. Assim, para quantificar a influência de  $W$  realizou-se um estudo numérico no simulador ANSYS HFSS, fixando  $L = \lambda/4$  (valor esse que será adotado em todo o projeto) e  $R = 0,022\lambda$

(valor estudado anteriormente e definido como o usado no projeto), onde  $\lambda = 125\text{mm}$  na frequência de 2,4 GHz, estudou-se os valores de  $W$  entre  $0,6\lambda$  e  $1,4\lambda$ . Para tal, considerou-se os condutores do dipolo e do plano de terra como perfeitos. Os principais resultados desse estudo são apresentados nas Figuras 4.6 e 4.7 e na Tabela 4.2.

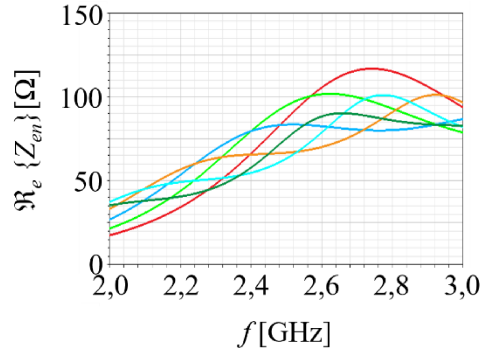
**Figura 4.5 – Ganho em duas dimensões da antena monopolo para  $R = 0,022\lambda$  para a frequência de 2,4GHz.**



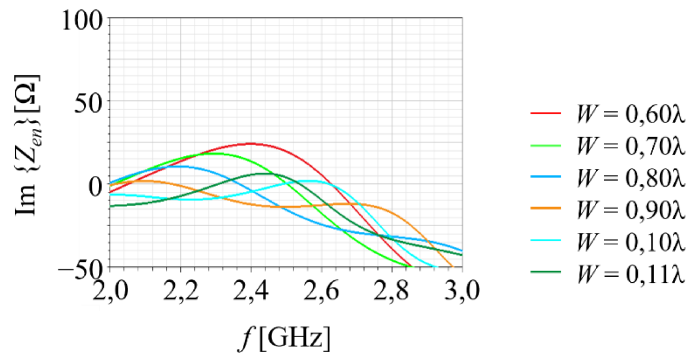
Fonte: A autora.

A Figura 4.6 apresenta o comportamento dos parâmetros de impedância do estudo em função dos valores de  $W$ . Na Figura 4.6(a) tem-se o comportamento da parte real da impedância de entrada onde se percebe que para a frequência de 2,4GHz (frequência de projeto) os valores variam entre  $54,66\Omega$  e  $79,41\Omega$  (conforme a Tabela 4.2). Desse modo percebe-se que para dimensões finitas do plano de terra o valor da parte real da impedância de entrada difere-se do que é previsto teoricamente na equação (4.1), tendo o seu valor oscilante, ora maior e ora menor. Na Figura 4.6(b) tem-se o comportamento da parte imaginária da impedância de entrada onde se percebe que para a frequência de 2,4GHz (frequência de projeto) os valores variam entre  $-12,19\Omega$  e  $24,00\Omega$  (conforme a Tabela 4.2). Desse modo percebe-se que para dimensões finitas do plano de terra o valor da parte imaginária da impedância de entrada difere-se do que é previsto teoricamente na equação (4.1), não sendo nula (condição de ressonância) para todos os valores de  $W$ . Entretanto, nota-se novamente um comportamento oscilatório, em que se pode atingir ressonância para mais de um valor de  $W$ . Na Figura 4.6(c) tem-se o comportamento do módulo do coeficiente de reflexão onde se percebe que a banda de operação (definida para  $|\Gamma| [\text{dB}] \leq -10\text{dB}$ ) tende a crescer até atingir um valor máximo e volta a reduzir como o aumento de  $W$ , com valores variando entre 17,06% e 36,66% da frequência central. Nessa abordagem (observando a Tabela 4.2) fica evidente que  $W = 0,9\lambda$  é o responsável pelo maior valor da largura de banda,  $B_W = 36,66\%$ . Por esse motivo, esse valor será o adotado nesse trabalho.

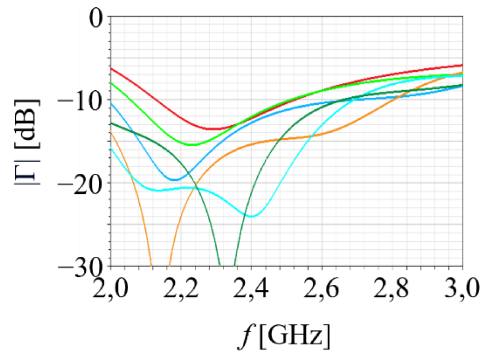
Figura 4.6 – Análise numérica da influência das dimensões do plano de terra da antena monopolo na resposta em frequência dos parâmetros de impedância.



(a) Parte real da impedância de entrada.



(b) Parte imaginária da impedância de entrada.



(c) Coeficiente de reflexão.

Fonte: A autora.

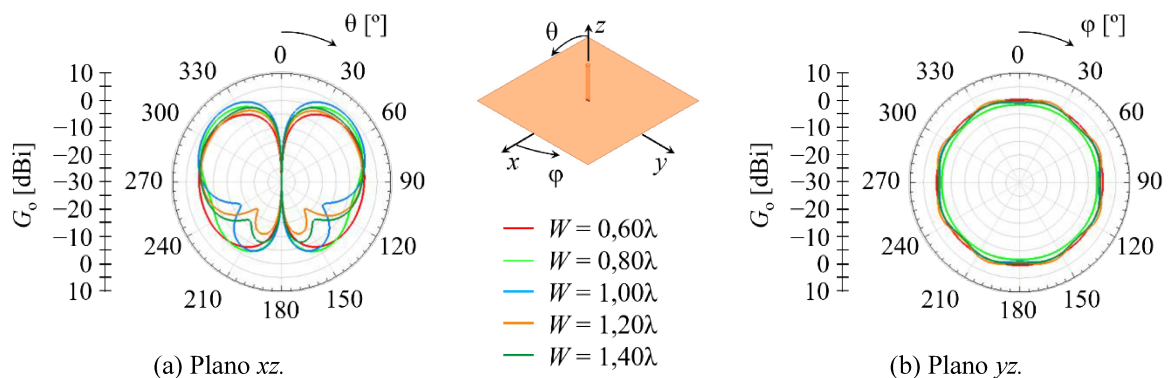
Tabela 4.2 – Valores da análise numérica da influência das dimensões do plano de terra da antena monopolo.

$W (\lambda)$	Impedância de entrada para $f = 2,4$ GHz		Banda para $ \Gamma $ [dB] $\leq -10$ dB			$G_o$ [dBi] para $f = 2,4$ GHz
	$\Re\{Z_{en}\} [\Omega]$	$\text{Im}\{Z_{en}\} [\Omega]$	$f_{min}$ [GHz]	$f_{max}$ [GHz]	$Bw(\%)$	
0,6	66,01	24,00	2,128	2,525	17,06	1,34
0,7	79,39	13,61	2,056	2,514	20,04	2,11
0,8	79,41	-3,77	1,992	2,710	30,54	3,15
0,9	65,58	-12,19	1,936	2,805	36,66	4,04
1,0	54,66	-4,65	1,895	2,693	34,79	4,09
1,1	57,64	5,51	1,891	2,665	33,98	3,50
1,2	66,14	1,71	1,990	2,828	34,79	4,77
1,3	62,22	-3,47	2,016	2,809	32,87	5,27
1,4	56,92	-1,47	1,992	2,755	32,15	5,22

Fonte: A autora.

A Figura 4.7 ilustra o comportamento do diagrama de irradiação de ganho em duas dimensões em corte realizados nos planos  $xz$  e  $yz$  em função do estudo em função dos valores de  $W$ . Observa-se que na horizontal (plano  $yz$  que varia com o ângulo de coordenadas esféricas  $\varphi$ ) o diagrama é onidirecional (ou quase onidirecional), com o valor do ganho variando com  $W$ . Observa-se que na vertical (plano  $xz$  que varia com o ângulo de coordenadas esféricas  $\theta$ ) o diagrama tem a máxima irradiação variando em função de  $W$ . Por exemplo, para  $W = 0,6\lambda$  tem-se  $G_o = 1,34$  em  $\theta \cong 60^\circ$ , para  $W = 0,8\lambda$  tem-se  $G_o = 3,15$  em  $\theta \cong 46^\circ$ , para  $W = 1,0\lambda$  tem-se  $G_o = 4,09$  em  $\theta \cong 44^\circ$ , para  $W = 1,2\lambda$  tem-se  $G_o = 4,77$  em  $\theta \cong 50^\circ$  e para  $W = 1,4\lambda$  tem-se  $G_o = 5,22$  em  $\theta \cong 53^\circ$ . Nota-se também que com o aumento das dimensões do plano de terra o valor do ganho na direção de máxima irradiação (que nesse caso é igual a diretividade pelos condutores empregados na antena serem perfeitos) tende a convergir para o esperado teoricamente na equação (4.2).

**Figura 4.7 – Análise numérica da influência das dimensões do plano de terra da antena monopolo no ganho em duas dimensões para a frequência de 2,4GHz.**



Após as análises realizadas definiu-se como dimensões finais para antena monopolo apresentada nesse trabalho como sendo  $L = \lambda/4$ ,  $W = 0,9\lambda$  e  $R = 0,022\lambda$ . Como a frequência de projeto estudada foi 2,4 GHz, em que  $\lambda = 125\text{mm}$ , as dimensões finais da antena são  $112,5\text{mm} \times 112,5\text{mm} \times 31,25\text{mm}$  (conforme ilustração da Figura 4.2).

### 4.3 PROJETO E ANÁLISE DA ANTENA HELICOIDAL

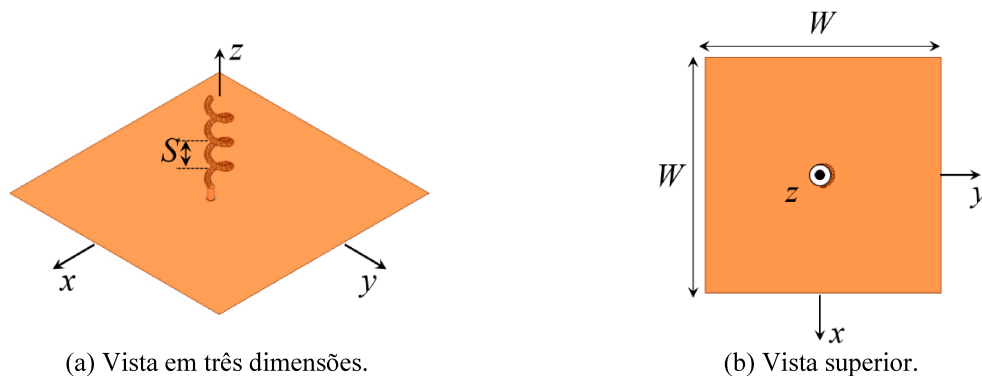
A antena helicoidal (ilustrada na Figura 4.8) é um irradiador filamentoar feita basicamente por um condutor em forma de hélice (RIBEIRO, 2012) com diâmetro  $2R$ . Esse condutor pode ser feito de fio de cobre ou outro material condutor. A hélice é formada por várias voltas com espaçamento uniforme. Uma das extremidades do material condutor é conectada a uma superfície metálica refletora, ao plano de terra e também ao ponto de

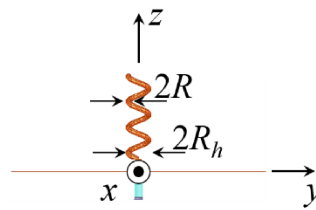
alimentação da antena, geralmente por meio de um cabo coaxial. A outra extremidade por sua vez, não possui conexão elétrica.

O funcionamento da antena helicoidal (principalmente em termos de irradiação) depende da relação entre o comprimento de cada espira e a separação entre elas, em relação ao comprimento de onda. A partir dos valores dessas dimensões, a antena opera no modo normal (também denominado transversal) ou no modo axial (também denominado longitudinal) (RIBEIRO, 2012). O modo axial tem o lobo principal com máxima irradiação na direção do eixo da hélice, na direção de  $z$  positivo conforme a Figura 4.8, caracterizando assim em um irradiador direcional. Essa condição acontece quando o espaçamento ( $S$ ) e o diâmetro ( $2R_h$ ) das espiras estão na ordem das dimensões do comprimento de onda (muito próximo ou maior que  $\lambda$ ). Em tal situação a antena se comporta como uma rede de antenas espirais, sendo que quanto maior um número de espiras maior é o ganho obtido. O modo normal tem a máxima irradiação na direção perpendicular ao eixo da hélice, no plano  $xz$  conforme a Figura 4.8, caracterizando assim em um irradiador onidirecional, com ganho muito próximo à um dipolo de  $\lambda/2$ , na ordem 2 dBi. Essa condição acontece quando  $S$  e  $2R_h$  são muito menores que  $\lambda$ , com valores pouco maiores que 1% de  $\lambda$ , de modo que a antena tem suas dimensões reduzidas em comparação com o modo axial.

Os dois modos de operação das antenas helicoidais são muito utilizados em sistemas de telecomunicações. O modo axial geralmente é empregado em enlaces que requerem altas diretividades com alto ganho, como por exemplo enlaces ponto a ponto terrestres ou via satélite. O modo normal geralmente é empregado em sistemas que visam a transmissão de sinais para grande área de cobertura no entorno da antena, como é o caso de sistemas Wi-Fi.

**Figura 4.8 – Dimensões da antena helicoidal.**





(b) Vista lateral.

Fonte: A autora.

### 4.3.1 DIMENSÕES E CARACTERÍSTICAS DA ANTENA HELICOIDAL

Nessa seção são apresentados os parâmetros necessários para determinar as dimensões de uma antena helicoidal. Basicamente, conforme ilustra a Figura 4.8, tem-se como dimensões de projeto o comprimento, o diâmetro  $2R$  dos fios condutores, o diâmetro  $2R_h$  das espiras, o espaçamento das espiras  $S$ , as dimensões do plano de terra  $W \times W$  e o número de espiras  $N$ . É importante destacar que devido a característica de irradiação o foco será na operação no modo normal.

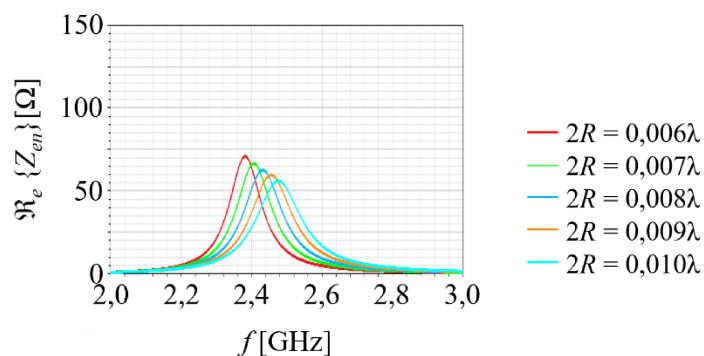
Na literatura existem boas referências bibliográficas sobre antenas helicoidais, como por exemplo em (BALANIS, 2005) e (RIBEIRO, 2012). Entretanto, não há um passo a passo de projeto claro e objetivo para se calcular cada uma das variáveis mencionadas anteriormente. O que é concesso é que para a operação em uma determinada faixa de frequência específica deve ser uma combinação dos valores de  $2R$ ,  $2R_h$ ,  $S$ ,  $W$  e  $N$ . Por esse motivo, serão apresentadas análises numéricas a respeito dessas variáveis para obter o melhor funcionamento da antena na frequência central de 2,4 GHz.

O primeiro estudo realizado foi sobre o impacto dos valores de  $2R$  no projeto da antena. Para tal, considerou-se os condutores das espiras e do plano de terra como perfeitos. Então, para quantificar a influência de  $2R$  realizou-se um estudo numérico no simulador ANSYS HFSS, fixando  $S = 0,04\lambda$ ,  $2R_h = 0,032\lambda$ ,  $W = 0,4\lambda$  e  $N = 3,25$ , onde  $\lambda = 125\text{mm}$  na frequência de 2,4 GHz, e estudou-se os valores de  $2R$  entre  $0,006\lambda$  e  $0,01\lambda$ . É importante destacar que os valores de  $2R_h$ ,  $S$ ,  $W$  e  $N$  não foram escolhidas ao acaso, mas sim obtidos a partir de uma calculadora interna do simulador ANSYS HFSS denominada HFSS Antenna Toolkit. Nesse módulo do *software* são inseridos os valores do comprimento da antena de  $\frac{\lambda}{4}$ ,  $f = 2,4\text{GHz}$  e feita a escolha da geometria helicoidal, a partir desses valores são feitos os cálculos para as demais variáveis utilizadas na antena simulada.

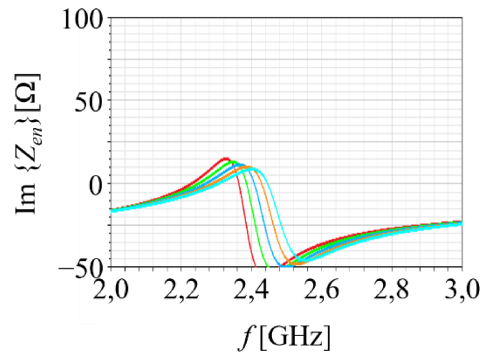


Os principais resultados do estudo da influência de  $2R$  no funcionamento das antenas helicoidais operando no modo normal são apresentados na Figura 4.9 na Tabela 4.3. Primeiramente, nota-se que a resposta em frequência dos parâmetros de impedância de entrada da antena helicoidal é muito similar à um circuito RLC com alto fator de mérito. Isso se justifica principalmente pelas curvas características da parte real (Figura 4.9(a)) e parte imaginária (Figura 4.9(b)) da impedância de entrada. Na Figura 4.9(a) tem-se o comportamento da parte real da impedância de entrada onde se percebe que para a frequência de 2,4GHz (frequência de projeto) os valores variam entre  $27,95\Omega$  e  $65,64\Omega$  (conforme a Tabela 4.3). Na Figura 4.9(b) tem-se o comportamento da parte imaginária da impedância de entrada onde se percebe que para a frequência de 2,4GHz (frequência de projeto) os valores variam entre  $-40,52\Omega$  e  $9,60\Omega$  (conforme a Tabela 4.3). Fica evidente que quanto maior o valor de  $2R$  a operação da antena se desloca para frequências maiores. Na Figura 4.9(c) tem-se o comportamento do módulo do coeficiente de reflexão onde se percebe que a banda de operação (definida para  $|\Gamma| [\text{dB}] \leq -10\text{dB}$ ) com valores variando entre 3,27% e 4,16% da frequência central. Tal comportamento é tido como faixa estreita, sendo justificado pelo alto fator de mérito da antena. Nessa abordagem (observando a Tabela 4.3) fica evidente que  $2R = 0,008\lambda$  leva a antena a operar no entorno de 2,4 GHz, por esse motivo, esse valor será o adotado nesse trabalho. Assim, para os valores até então definidos, a antena apresenta uma banda de operação de 3,78% da frequência central e o ganho na direção de máxima irradiação (com comportamento onidirecional como será melhor apresenta a seguir) de 1,82 dBi.

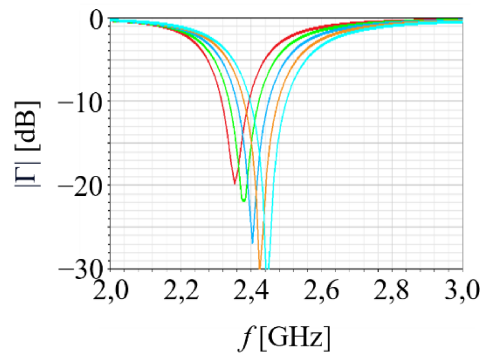
**Figura 4.9 – Análise numérica da influência do diâmetro dos condutores das espiras da antena helicoidal.**



(a) Parte real da impedância de entrada.



(b) Parte imaginária da impedância de entrada.



(c) Coeficiente de reflexão.

Fonte: A autora.

**Tabela 4.3 – Valores da análise numérica da influência do diâmetro dos condutores das espiras da antena helicoidal.**

$2R (\lambda)$	Impedância de entrada para $f = 2,4$ GHz		Banda para $ \Gamma $ [dB] $\leq -10$ dB			$G_o$ [dBi] para $f = 2,4$ GHz
	$\Re\{Z_{en}\} [\Omega]$	$\text{Im}\{Z_{en}\} [\Omega]$	$f_{min}$ [GHz]	$f_{m\acute{a}x}$ [GHz]	$Bw(\%)$	
0,006	64,10	-40,52	2,317	2,394	3,27	1,82
0,007	65,64	-12,61	2,337	2,422	3,57	1,87
0,008	51,02	4,92	2,359	2,450	3,78	1,82
0,009	36,83	9,60	2,380	2,477	3,99	1,81
0,010	27,95	8,87	2,398	2,500	4,16	1,83

Fonte: A autora.

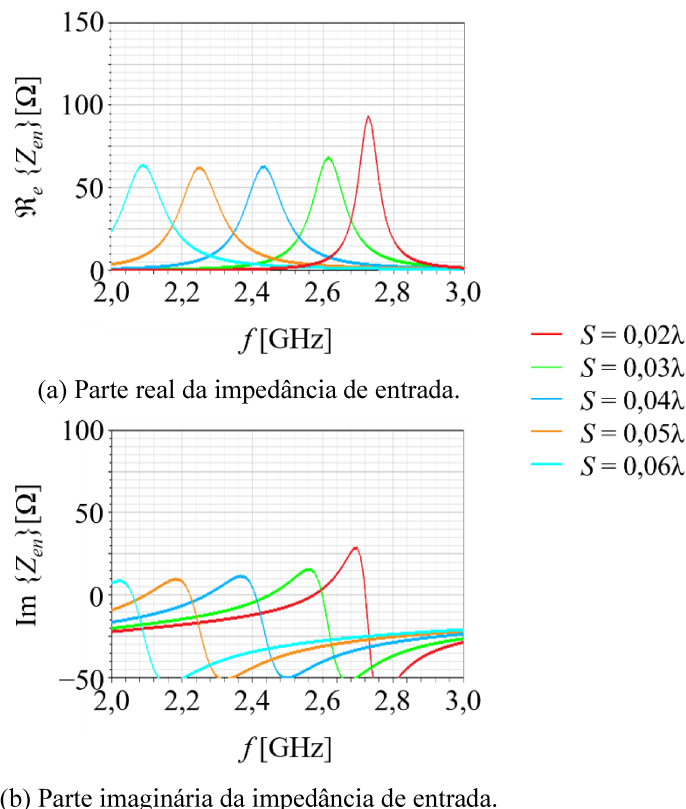
O segundo estudo realizado foi sobre o impacto dos valores de  $S$  no projeto da antena. Para tal, considerou-se novamente os condutores das espiras e do plano de terra como perfeitos. Então, para quantificar a influência de  $S$  realizou-se um estudo numérico no simulador ANSYS HFSS, fixando  $2R = 0,008\lambda$ ,  $2R_h = 0,032\lambda$ ,  $W = 0,4\lambda$  e  $N = 3,25$ , onde  $\lambda = 125\text{mm}$  na frequência de 2,4 GHz, e estudou-se os valores de  $S$  entre  $0,02\lambda$  e  $0,06\lambda$ .

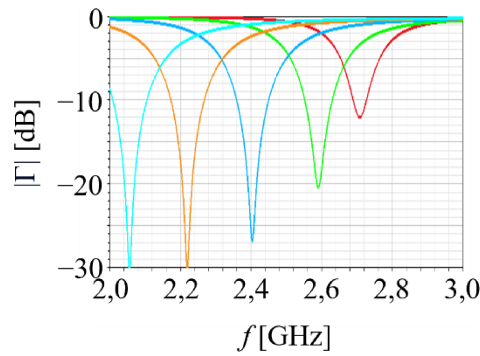
Os principais resultados do estudo da influência de  $S$  no funcionamento das antenas helicoidais operando no modo normal são apresentados na Figura 4.10 na Tabela 4.4. Na Figura 4.10(a) tem-se o comportamento da parte real da impedância de entrada onde se percebe que para a frequência de 2,4GHz (frequência de projeto) os valores variam entre  $0,86\Omega$  e  $51,08\Omega$  (conforme a Tabela 4.4). Na Figura 4.10(b) tem-se o comportamento da parte imaginária da

impedância de entrada onde se percebe que para a frequência de 2,4GHz (frequência de projeto) os valores variam entre  $-43,82\Omega$  e  $5,16\Omega$  (conforme a Tabela 4.4). Fica evidente que quanto maior o valor de  $S$  a operação da antena se desloca para frequências menores. Isso se justifica, pois, quanto maior o  $S$  maior é o comprimento elétrico da antena, que é inversamente proporcional a frequência de operação. Na Figura 4.10(c) tem-se o comportamento do módulo do coeficiente de reflexão onde se percebe que a banda de operação (definida para  $|\Gamma| [\text{dB}] \leq -10\text{dB}$ ) com valores variando entre 1,37% e 4,66% da frequência central. Nessa abordagem (observando a Tabela 4.4) fica evidente que  $S = 0,04\lambda$  leva a antena a operar no entorno de 2,4 GHz, por esse motivo, esse valor será o adotado nesse trabalho. Assim, para os valores até então definidos, a antena apresenta uma banda de operação de 3,78% da frequência central e o ganho na direção de máxima irradiação (com comportamento onidirecional como será melhor apresenta a seguir) de 1,82 dBi.

O terceiro estudo realizado foi sobre o impacto dos valores de  $2R_h$  no projeto da antena. Para tal, considerou-se novamente os condutores das espiras e do plano de terra como perfeitos. Então, para quantificar a influência de  $S$  realizou-se um estudo numérico no simulador ANSYS HFSS, fixando  $2R = 0,008\lambda$ ,  $S = 0,04\lambda$ ,  $W = 0,4\lambda$  e  $N = 3,25$ , onde  $\lambda = 125\text{mm}$  na frequência de 2,4 GHz, e estudou-se os valores de  $2R_h$  entre  $0,025\lambda$  e  $0,04\lambda$ .

**Figura 4.10 – Análise numérica da influência do espaçamento das espiras da antena helicoidal.**





(c) Coeficiente de reflexão.

Fonte: A autora.

**Tabela 4.4 – Valores da análise numérica da influência do espaçamento das espiras da antena helicoidal.**

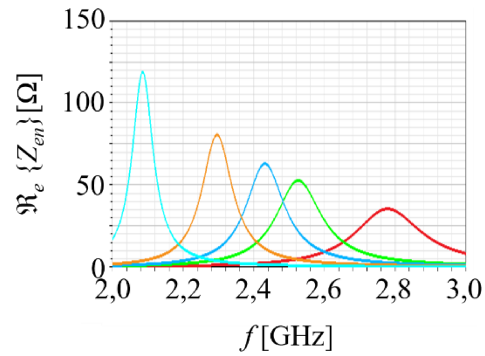
$S (\lambda)$	Impedância de entrada para $f = 2,4$ GHz		Banda para $ \Gamma $ [dB] $\leq -10$ dB			$G_o$ [dBi] para $f = 2,4$ GHz
	$\Re\{Z_{en}\}$ [ $\Omega$ ]	$\Im\{Z_{en}\}$ [ $\Omega$ ]	$f_{min}$ [GHz]	$f_{max}$ [GHz]	$Bw$ (%)	
0,02	0,86	-11,85	2,689	2,726	1,37	1,84
0,03	3,75	-4,44	2,552	2,630	3,01	1,87
0,04	51,08	5,16	2,359	2,450	3,78	1,82
0,05	12,37	-43,82	2,173	2,268	4,28	1,80
0,06	4,07	-3,20	2,010	2,106	4,66	1,72

Fonte: A autora.

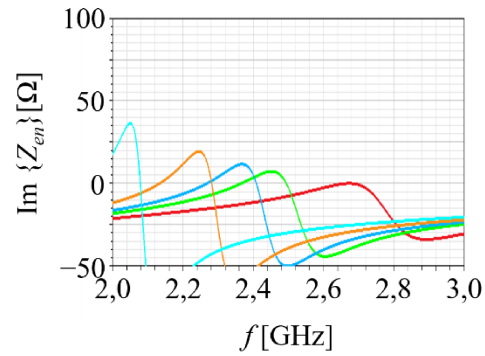
Os principais resultados do estudo da influência de  $2R_h$  no funcionamento das antenas helicoidais operando no modo normal são apresentados na Figura 4.11 na Tabela 4.5. Na Figura 4.11(a) tem-se o comportamento da parte real da impedância de entrada onde se percebe que para a frequência de 2,4GHz (frequência de projeto) os valores variam entre 2,27 $\Omega$  e 51,08 $\Omega$  (conforme a Tabela 4.5). Na Figura 4.11(b) tem-se o comportamento da parte imaginária da impedância de entrada onde se percebe que para a frequência de 2,4GHz (frequência de projeto) os valores variam entre -52,37 $\Omega$  e 5,16 $\Omega$  (conforme a Tabela 4.5). Fica evidente também que quanto maior o valor de  $2R_h$  a operação da antena se desloca para frequências menores. Isso se justifica, pois, quanto maior o  $2R_h$  também maior é o comprimento elétrico da antena, que é inversamente proporcional a frequência de operação. Na Figura 4.11(c) tem-se o comportamento do módulo do coeficiente de reflexão onde se percebe que a banda de operação (definida para  $|\Gamma|$  [dB]  $\leq -10$ dB) com valores variando entre 3,09% e 3,96% da frequência central. Nota-se que o diâmetro das espiras afeta a impedância de entrada da antena de modo que se tem pioras e melhoras no casamento de impedâncias dependendo dos valores de  $2R_h$ , destacando que para  $2R_h = 0,040\lambda$  não se identifica banda de operação. Fica evidente também (observando a Tabela 4.5) que  $2R_h = 0,032\lambda$  leva a antena a operar no entorno de 2,4 GHz, por esse motivo, esse valor será o adotado nesse trabalho. Assim, para os valores até então

definidos, a antena apresenta uma banda de operação de 3,78% da frequência central e o ganho na direção de máxima irradiação (com comportamento onidirecional como será melhor apresenta a seguir) de 1,82 dBi.

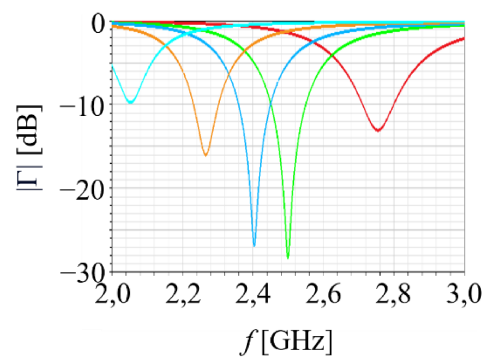
**Figura 4.11 – Análise numérica da influência do diâmetro das espiras da antena helicoidal.**



(a) Parte real da impedância de entrada.



(b) Parte imaginária da impedância de entrada.



(c) Coeficiente de reflexão.

Fonte: A autora.

**Tabela 4.5 – Valores da análise numérica da influência do diâmetro das espiras da antena helicoidal.**

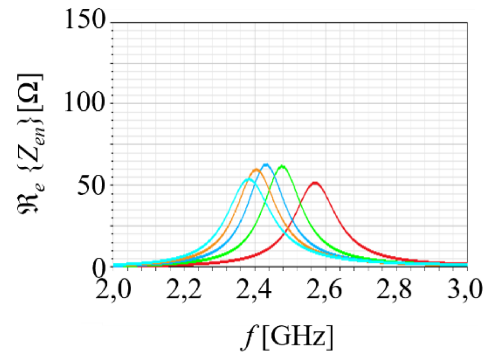
$2R_h$ ( $\lambda$ )	Impedância de entrada para $f = 2,4$ GHz		Banda para $ \Gamma $ [dB] $\leq -10$ dB			$G_o$ [dBi] para $f = 2,4$ GHz
	$\Re\{Z_{en}\}$ [ $\Omega$ ]	$\Im\{Z_{en}\}$ [ $\Omega$ ]	$f_{min}$ [GHz]	$f_{máx}$ [GHz]	$Bw$ (%)	
0,025	2,27	-11,46	2,711	2,799	3,19	1,78
0,030	13,58	3,49	2,451	2,550	3,96	1,78
0,032	51,08	5,16	2,359	2,450	3,78	1,82
0,035	17,33	-52,37	2,232	2,302	3,09	1,84
0,040	1,93	-33,86	-	-	-	1,73

Fonte: A autora.

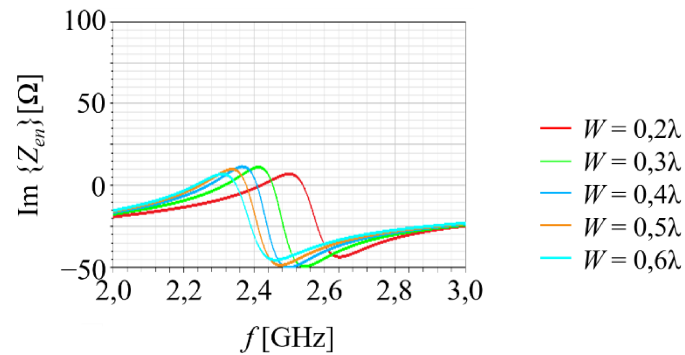
O quarto estudo realizado foi sobre o impacto dos valores de  $W$  no projeto da antena. Para tal, considerou-se novamente os condutores das espiras e do plano de terra como perfeitos. Então, para quantificar a influência de  $S$  realizou-se um estudo numérico no simulador ANSYS HFSS, fixando  $2R = 0,008\lambda$ ,  $S = 0,04\lambda$ ,  $2R_h = 0,032\lambda$  e  $N = 3,25$ , onde  $\lambda = 125$ mm na frequência de 2,4 GHz, e estudou-se os valores de  $W$  entre  $0,2\lambda$  e  $0,6\lambda$ .

Os principais resultados do estudo da influência de  $W$  no funcionamento das antenas helicoidais operando no modo normal são apresentados na Figura 4.12 na Tabela 4.6. Na Figura 4.12(a) tem-se o comportamento da parte real da impedância de entrada onde se percebe que para a frequência de 2,4GHz (frequência de projeto) os valores variam entre  $7,34\Omega$  e  $59,70\Omega$  (conforme a Tabela 4.6). Na Figura 4.12(b) tem-se o comportamento da parte imaginária da impedância de entrada onde se percebe que para a frequência de 2,4GHz (frequência de projeto) os valores variam entre  $-30,30\Omega$  e  $10,73\Omega$  (conforme a Tabela 4.6). Fica evidente também que quanto maior o valor de  $W$  a operação da antena se desloca para frequências menores. Na Figura 4.12(c) tem-se o comportamento do módulo do coeficiente de reflexão onde se percebe que a banda de operação (definida para  $|\Gamma|$  [dB]  $\leq -10$ dB) com valores variando entre 3,57% e 4,12% da frequência central, destacando que quanto maior o valor  $W$  maior a banda observada. Apesar de a  $Bw$  ser maior com o aumento de  $W$ , fica evidente (observando a Tabela 4.6) que  $W = 0,4\lambda$  leva antena a operar no entorno de 2,4 GHz, por esse motivo, esse valor será o adotado nesse trabalho. Assim, para os valores até então definidos, a antena apresenta uma banda de operação de 3,78% da frequência central e o ganho na direção de máxima irradiação (com comportamento onidirecional como será melhor apresenta a seguir) de 1,82 dBi.

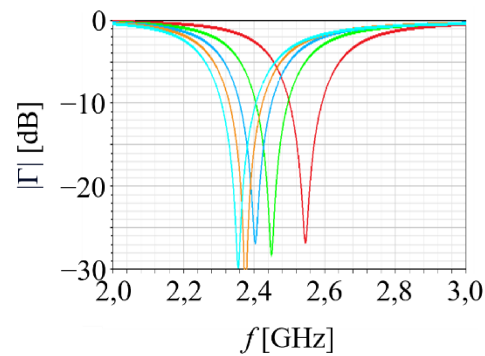
Figura 4.12 – Análise numérica da influência das dimensões do plano de terra da antena helicoidal.



(a) Parte real da impedância de entrada.



(b) Parte imaginária da impedância de entrada.



(c) Coeficiente de reflexão.

Fonte: A autora.

Tabela 4.6 – Valores da análise numérica da influência das dimensões do plano de terra da antena helicoidal.

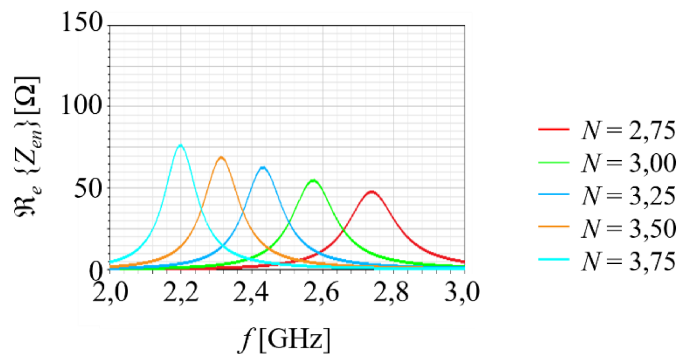
$W (\lambda)$	Impedância de entrada para $f = 2,4$ GHz		Banda para $ \Gamma $ [dB] $\leq -10$ dB			$G_o$ [dBi] para $f = 2,4$ GHz
	$\Re\{Z_{en}\}$ [Ω]	$\text{Im}\{Z_{en}\}$ [Ω]	$f_{min}$ [GHz]	$f_{max}$ [GHz]	$Bw(\%)$	
0,2	7,34	-1,65	2,501	2,592	3,57	2,35
0,3	25,54	10,73	2,405	2,496	3,71	2,15
0,4	51,08	5,16	2,359	2,450	3,78	1,82
0,5	59,70	-15,82	2,331	2,424	3,91	1,40
0,6	51,45	-30,30	2,308	2,405	4,12	1,38

Fonte: A autora.

O quinto estudo realizado foi sobre o impacto dos valores de  $N$  no projeto da antena. Para tal, considerou-se novamente os condutores das espiras e do plano de terra como perfeitos. Então, para quantificar a influência de  $S$  realizou-se um estudo numérico no simulador ANSYS HFSS, fixando  $2R = 0,008\lambda$ ,  $S = 0,04\lambda$ ,  $2R_h = 0,032\lambda$  e  $W = 0,4\lambda$ , onde  $\lambda = 125\text{mm}$  na frequência de 2,4 GHz, e estudou-se os valores de  $N$  entre 2,75 e 3,75.

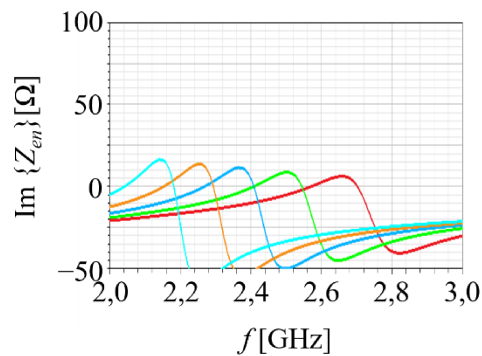
Os principais resultados do estudo da influência de  $N$  no funcionamento das antenas helicoidais operando no modo normal são apresentados na Figura 4.13 na Tabela 4.7. Na Figura 4.13(a) tem-se o comportamento da parte real da impedância de entrada onde se percebe que para a frequência de 2,4GHz (frequência de projeto) os valores variam entre  $2,16\Omega$  e  $51,08\Omega$  (conforme a Tabela 4.7). Na Figura 4.13(b) tem-se o comportamento da parte imaginária da impedância de entrada onde se percebe que para a frequência de 2,4GHz (frequência de projeto) os valores variam entre  $-52,23\Omega$  e  $5,16\Omega$  (conforme a Tabela 4.7). Fica evidente também que quanto maior o valor de  $N$  a operação da antena se desloca para frequências menores. Isso se justifica, pois, quanto maior o  $N$  também maior é o comprimento elétrico da antena, que é inversamente proporcional a frequência de operação. Na Figura 4.13(c) tem-se o comportamento do módulo do coeficiente de reflexão onde percebe-se que a banda de operação (definida para  $|\Gamma| [\text{dB}] \leq -10\text{dB}$ ) com valores variando entre 3,60% e 3,78% da frequência central. Fica evidente também (observando a Tabela 4.7) que  $N = 3,25$  leva a antena a operar no entorno de 2,4 GHz, por esse motivo, esse valor será o adotado nesse trabalho. Desse modo, a configuração final da antena terá três espiras interinas e mais um segmento de um quarto de espira. Assim, com todas as dimensões definidas, a antena apresenta uma banda de operação de 3,78% da frequência central e o ganho na direção de máxima irradiação (com comportamento onidirecional como será melhor apresenta a seguir) de 1,82 dBi.

**Figura 4.13 – Análise numérica da influência do número de espiras da antena helicoidal.**

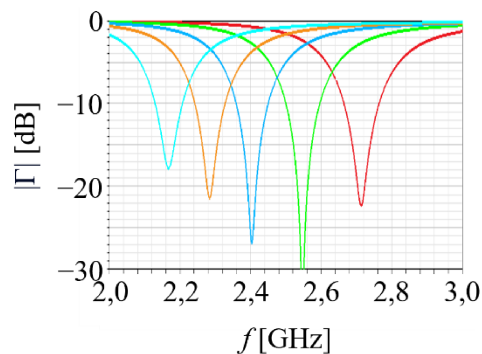


(a) Parte real da impedância de entrada.





(b) Parte imaginária da impedância de entrada.



(c) Coeficiente de reflexão.

Fonte: A autora.

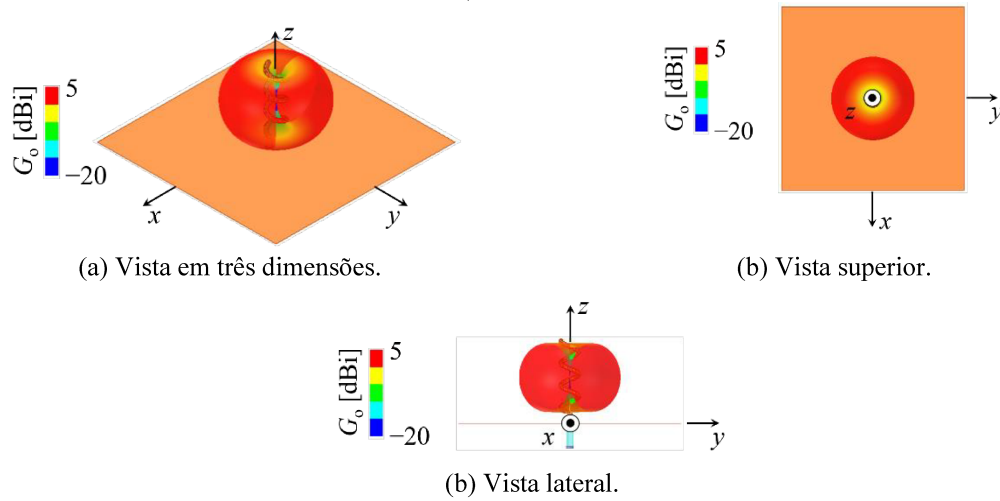
**Tabela 4.7 – Valores da análise numérica da influência do número de espiras da antena helicoidal.**

$N$	Impedância de entrada para $f = 2,4$ GHz		Banda para $ \Gamma $ [dB] $\leq -10$ dB			$G_o$ [dBi] para $f = 2,4$ GHz
	$\Re\{Z_{en}\}$ [Ω]	$\text{Im}\{Z_{en}\}$ [Ω]	$f_{min}$ [GHz]	$f_{máx}$ [GHz]	$Bw$ (%)	
2,75	2,16	-10,06	2,664	2,763	3,65	1,83
3,00	7,56	-0,75	2,500	2,596	3,77	1,84
3,25	51,08	5,16	2,359	2,450	3,78	1,82
3,50	24,53	-52,23	2,243	2,328	3,72	1,76
3,75	6,42	-50,06	2,130	2,208	3,60	1,84

Fonte: A autora.

Após quantificar as dimensões finais da antena helicoidais operando no modo normal para a frequência central de 2,4 GHz a partir de estudos, analisou-se as características de irradiação para a antena já com os valores finais das variáveis, ou seja,  $2R = 0,008\lambda$ ,  $S = 0,04\lambda$ ,  $2R_h = 0,032\lambda$ ,  $W = 0,4\lambda$  e  $N = 3,25$ . Na Figura 4.14 tem-se o comportamento do diagrama de irradiação de ganho em três dimensões (sobreposto a antena). Observa-se que devido as dimensões reduzidas do plano de terra e ao efeito das espiras, tem-se um efeito de reflexão por parte do plano de terra praticamente inexistente. Assim, tem-se um diagrama de irradiação onidirecional no plano perpendicular a antena, com ganho na direção de máxima irradiação  $G_o = 1,82$  dBi.

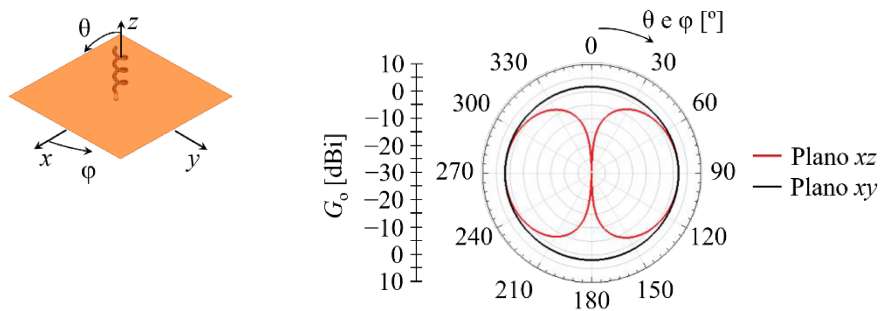
**Figura 4.14 – Ganho em três dimensões do modelo final da antena helicoidal para a frequência de 2,4 GHz.**



Fonte: A autora.

Para uma melhor visualização na Figura 4.15 tem-se o comportamento do diagrama de irradiação de ganho em duas dimensões em corte realizados nos planos  $xz$  e  $yz$ . Observa-se que na horizontal (plano  $xy$  que varia com o ângulo de coordenadas esféricas  $\phi$ ) o diagrama é onidirecional na direção onde ocorre a máxima irradiação. Observa-se que na vertical (plano  $xz$  que varia com o ângulo de coordenadas esféricas  $\theta$ ) o diagrama tem-se simetria de irradiação, com máxima irradiação para em  $\theta = 90^\circ$ , ou seja, na direção perpendicular a antena. Isso é uma característica importante para o Wi-Fi, visto que no plano horizontal em todas as direções o sinal será direcionado com mesma intensidade.

**Figura 4.15 – Ganho em duas dimensões do modelo final da antena helicoidal para a frequência de 2,4 GHz.**

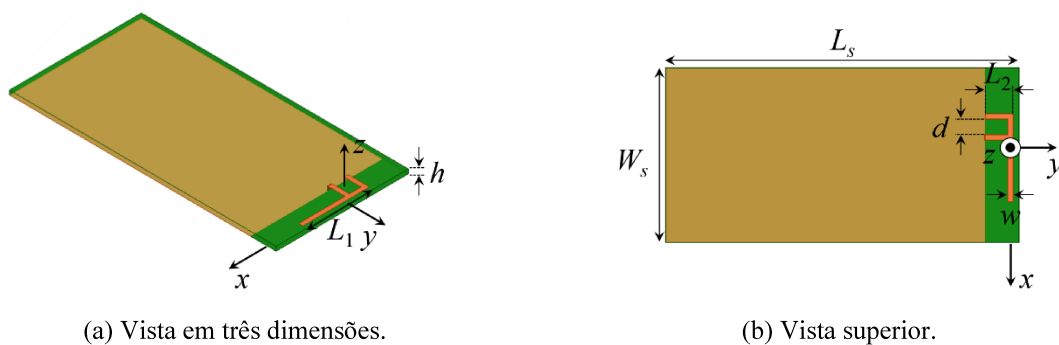


Após as análises realizadas definiu-se como dimensões finais para antena monopolo apresentada nesse trabalho como sendo  $2R = 0,008\lambda$ ,  $S = 0,04\lambda$ ,  $2R_h = 0,032\lambda$ ,  $W = 0,4\lambda$  e  $N = 3,25$ . Como a frequência de projeto estudada foi 2,4 GHz, em que  $\lambda = 125\text{mm}$ , as dimensões finais da antena são  $50,0\text{mm} \times 50,0\text{mm} \times 19,0\text{mm}$  (conforme ilustração da Figura 4.8). Desse modo, nota-se uma considerável redução nas dimensões se comparado a antena monopolo.

## 4.4 PROJETO E ANÁLISE DA ANTENA IFA

Uma antena F invertida planar (do inglês *Planar Inverted-F Antenna* - IFA), conforme mostrado na Figura 4.16, consiste em um irradiador planar projetado em placa de circuito impresso (BALANIS, 2005). A geometria é formada por duas camadas (comumente denominadas de *layers* no inglês) de material condutor separadas por um laminado dielétrico de permissividade relativa  $\epsilon_r$  e espessura  $h$ . Na camada superior tem-se a antena de fato, como fator de F, e na parte inferior um plano de terra (que geralmente é a estrutura metálica onde se colocam os componentes em um circuito impresso que a antena está integrada). Basicamente, em projeto deve determinar as dimensões da antena em F, formadas por  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $d$  e  $W$ . Além disso, tem-se as dimensões do plano de terra  $L_s$  e  $W_s$ , que afetam o funcionamento da antena, porém dependem do circuito como um todo em que a antena será integrada. É importante destacar que um dos condutores paralelos superiores do F (geralmente o que fica no meio da letra) está ligado a porta de alimentação e o outro é curto-circuitado ao plano de terra.

Figura 4.16 – Dimensões da antena IFA.



Fonte: A autora.

Devido a geometria da IFA ser baseada em circuitos impressos, tem-se uma antena compacta, de fácil construção e adaptação em diferentes dispositivos, além de geralmente possuir baixo custo. Por isso, essas antenas são muito utilizadas em dispositivos sem fio, como *smartphones*, *notebooks* e roteadores Wi-Fi.

Apesar de muito utilizadas, não há uma formulação matemática objetiva para o dimensionamento das variáveis dessa antena. As únicas informações relativamente importantes são que o comprimento  $L_1$  deve ser aproximadamente um quarto de comprimento de onda guiado ( $\lambda_g$ ) e que a posição da alimentação em relação ao pino de curto controla a impedância de entrada, à medida que a alimentação se aproxima do pino de curto-circuito, a impedância de entrada é reduzida (BALANIS, 2005). Por esse motivo, geralmente no projeto das IFA faz necessário análises numéricas em simuladores como o ANSYS HFSS.

#### 4.4.1 DIMENSÕES E CARACTERÍSTICAS DA ANTENA IFA

Seguindo a mesma metodologia das antenas monopolo e helicoidal, as variáveis que compõe a geometria da antena IFA foram estudadas em função do comprimento de onda. Entretanto, é importante destacar que devido a presença do laminado dielétrico, para a IFA deve-se considerar o comprimento de onda guiado e não apenas o comprimento de onda no vácuo. Por esse motivo, pode-se adotar a seguinte relação entre  $\lambda$  e  $\lambda_g$  (BALANIS, 2005):

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{\left(\frac{\epsilon_r + 1}{2}\right)}} \quad (4.3)$$

em que o termo dentro da raiz no numerador remete ao valor médio entre a permissividade dielétrica do laminado dielétrico e do ar. A média se faz necessária visto que ao ser guiada na estrutura parte da onda viaja no ar e parte no dielétrico.

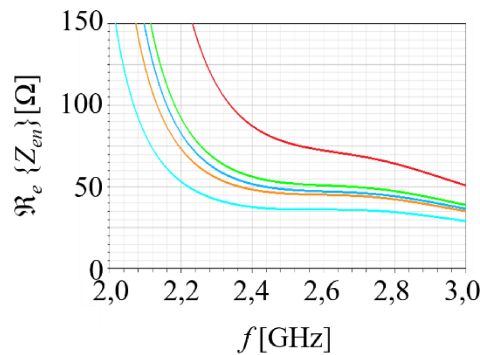
Para esse projeto escolheu-se o laminado dielétrico RT/duroid® 5880 da empresa Rogers Corporation, em que se tem  $\epsilon_r = 2,2$  e  $h = 1,575\text{mm}$ . A escolha desse material se justifica pela baixa perda dielétrica na faixa até 10 GHz, sendo assim muito utilizado em antenas planares aplicadas a tecnologias como o Wi-Fi (ROGERS CORPORATION, 2023). Dessa forma, admitindo a frequência de projeto de 2,4 GHz, em que  $\lambda = 125\text{mm}$ , chega-se à  $\lambda_g = 98,82\text{mm}$ .

O primeiro estudo realizado foi sobre o impacto dos valores de  $L_1$  no projeto da antena. Para tal, considerou-se os condutores das duas camadas (antena em F e plano de terra) como perfeitos. Então, para quantificar a influência de  $L_1$  realizou-se um estudo numérico no simulador ANSYS HFSS, fixando  $L_2 = 0,08\lambda_g$ ,  $W = 0,015\lambda_g$ ,  $d = 0,044\lambda_g$ ,  $L_s = \lambda_g$  e  $W_s = 0,5\lambda_g$ , e estudou-se os valores de  $L_1$ . Para tal, conforme descrito em (BALANIS, 2005), definiu-se a variação de  $L_1$  no entorno de um quarto de comprimento de onda guiado, analisando entre  $0,23\lambda_g$  e  $0,27\lambda_g$ . É importante destacar que os valores de  $L_2$ ,  $W$ ,  $d$ ,  $L_s$  e  $W_s$  não foram escolhidas ao acaso, mas sim obtidos a partir de uma calculadora HFSS Antenna Toolkit.

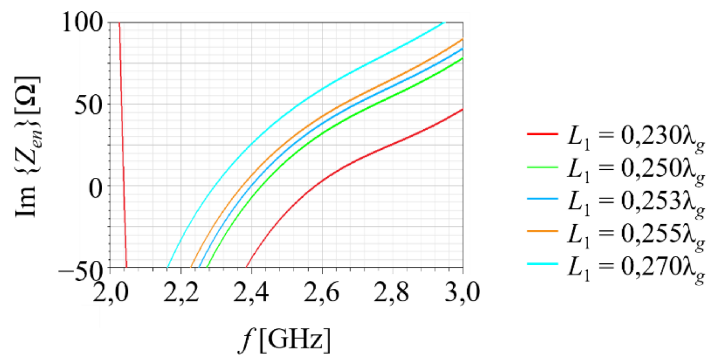
Os principais resultados do estudo da influência de  $L_1$  no funcionamento das antenas IFA são apresentados na Figura 4.17 na Tabela 4.8. Na Figura 4.17(a) tem-se o comportamento da parte real da impedância de entrada em que para a frequência de 2,4 GHz os valores variam entre  $37,72\Omega$  e  $87,37\Omega$  (conforme a Tabela 4.8), em que se tem o valor de  $\Re\{Z_{en}\}$  crescendo com o aumento de  $L_1$ . Na Figura 4.17(b) tem-se o comportamento da parte imaginária da impedância de entrada onde se percebe que para a frequência de 2,4 GHz os valores variam entre  $-44,33\Omega$  e  $25,47\Omega$  (conforme a Tabela 4.8), em que se tem também o valor de  $\text{Im}\{Z_{en}\}$

crescendo com o aumento de  $L_1$ . Na Figura 4.17(c) tem-se o comportamento do módulo do coeficiente de reflexão onde se percebe que a banda de operação (definida para  $|\Gamma|$  [dB]  $\leq -10$ dB) com valores variando entre 8,96% e 16,79% da frequência central. Fica evidente que  $L_1 = 0,253\lambda_g$  leva a antena a apresentar em 2,4 GHz  $\Re\{Z_{en}\}$  e  $\text{Im}\{Z_{en}\}$  muito próximos de, respectivamente  $50\Omega$  (condição para casamento de impedâncias) e  $0\Omega$  (condição para a ressonância). Por esse motivo, esse valor será o adotado nesse trabalho. Assim, para os valores das variáveis definidos até então, a antena apresenta uma banda de operação de 11,34% da frequência central e o ganho na direção de máxima irradiação (com comportamento não onidirecional como será melhor apresenta a seguir) de 4,04 dBi.

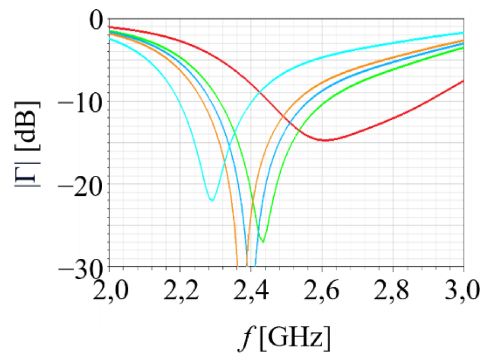
**Figura 4.17 – Análise numérica da influência do comprimento  $L_1$  da antena IFA.**



(a) Parte real da impedância de entrada.



(b) Parte imaginária da impedância de entrada.



(c) Coeficiente de reflexão.

Fonte: A autora.

Tabela 4.8 – Valores da análise numérica da influência do comprimento  $L_1$  da antena IFA.

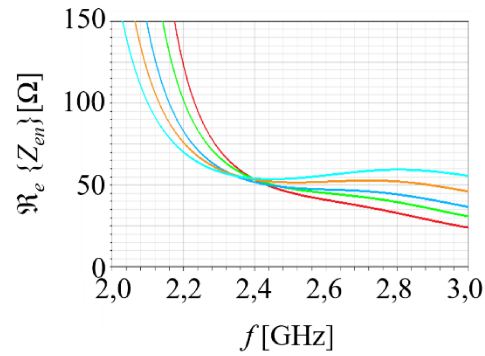
$L_1$ ( $\lambda_g$ )	Impedância de entrada para $f = 2,4$ GHz		Banda para $ \Gamma $ [dB] $\leq -10$ dB			$G_o$ [dBi] para $f = 2,4$ GHz
	$\Re_e \{Z_{en}\}$ [ $\Omega$ ]	$\text{Im} \{Z_{en}\}$ [ $\Omega$ ]	$f_{min}$ [GHz]	$f_{máx}$ [GHz]	$Bw$ (%)	
0,230	87,37	-44,33	2,449	2,898	16,79	3,92
0,250	56,28	-7,28	2,312	2,612	12,19	4,01
0,253	51,78	0,07	2,287	2,562	11,34	4,04
0,255	48,38	6,28	2,263	2,527	11,02	4,03
0,270	37,72	25,47	2,197	2,403	8,96	4,10

Fonte: A autora.

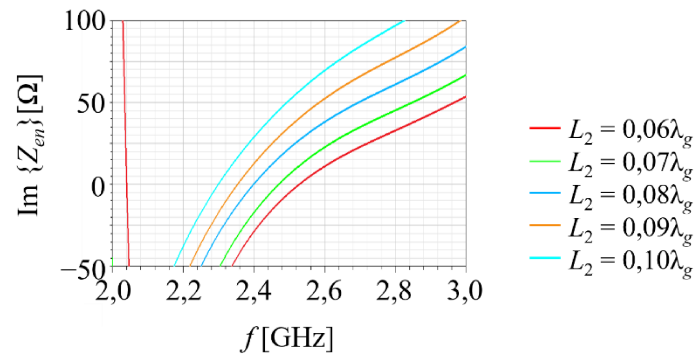
O segundo estudo realizado foi sobre o impacto dos valores de  $L_2$  no projeto da antena. Para tal, considerou-se também os condutores das duas camadas como perfeitos. Então, para quantificar a influência de  $L_2$  realizou-se um estudo numérico no simulador ANSYS HFSS, fixando  $L_1 = 0,253\lambda_g$ ,  $W = 0,015\lambda_g$ ,  $d = 0,044\lambda_g$ ,  $L_s = \lambda_g$  e  $W_s = 0,5\lambda_g$ , e estudou-se os valores de  $L_2$ , analisando entre  $0,06\lambda_g$  e  $0,1\lambda_g$ .

Os principais resultados do estudo da influência de  $L_2$  no funcionamento das antenas IFA são apresentados na Figura 4.18 na Tabela 4.9. Na Figura 4.18(a) tem-se o comportamento da parte real da impedância de entrada em que para a frequência de 2,4 GHz os valores variam entre  $51,78\Omega$  e  $53,97\Omega$  (conforme a Tabela 4.9), em nota-se que os valores de  $\Re_e \{Z_{en}\}$  não se alteram significativamente como  $L_2$ , estando (para a condição estudada) sempre bem próximo de  $50\Omega$ . Na Figura 4.18(b) tem-se o comportamento da parte imaginária da impedância de entrada onde se percebe que para a frequência de 2,4 GHz os valores variam entre  $-28,96\Omega$  e  $28,63\Omega$  (conforme a Tabela 4.9), em que, assim como para  $L_1$ , tem-se o valor de  $\text{Im}\{Z_{en}\}$  crescendo com o aumento de  $L_2$ . Na Figura 4.18(c) tem-se o comportamento do módulo do coeficiente de reflexão onde se percebe que a banda de operação (definida para  $|\Gamma|$  [dB]  $\leq -10$ dB) com valores variando entre 9,29% e 13,33% da frequência central. Fica evidente que  $L_2 = 0,08\lambda_g$  leva antena a apresentar em 2,4 GHz  $\Re_e \{Z_{en}\}$  e  $\text{Im}\{Z_{en}\}$  muito próximos de, respectivamente,  $50\Omega$  (condição para casamento de impedâncias) e  $0\Omega$  (condição para a ressonância). Por esse motivo, esse valor será o adotado nesse trabalho. Assim, para os valores das variáveis definidos até então, a antena apresenta uma banda de operação de 11,34% da frequência central e o ganho na direção de máxima irradiação (com comportamento não onidirecional como será melhor apresenta a seguir) de 4,04 dBi. Entretanto, é importante destacar que a variável  $L_2$  (que não é apresentada de modo tão claro na literatura) pode ser utilizada para ajuste da faixa de operação, visto que se tem o deslocamento em frequência da operação da antena e variação da largura de banda (que tende a ser maior quanto menor for o valor de  $L_2$ ) com a modificação dessa variável. Desse modo, essa conclusão é uma importante constatação desse trabalho.

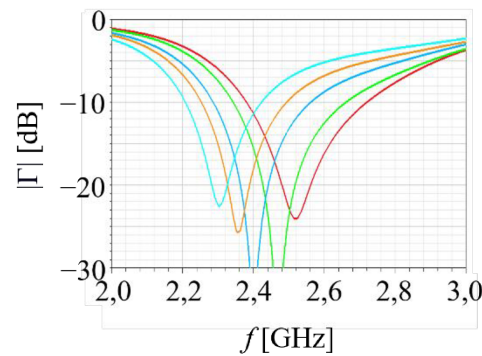
Figura 4.18 – Análise numérica da influência do comprimento  $L_2$  da antena IFA.



(a) Parte real da impedância de entrada.



(b) Parte imaginária da impedância de entrada.



(c) Coeficiente de reflexão.

Fonte: A autora.

Tabela 4.9 – Valores da análise numérica da influência do comprimento  $L_2$  da antena IFA.

$L_2$ ( $\lambda_g$ )	Impedância de entrada para $f = 2,4$ GHz		Banda para $ \Gamma $ [dB] $\leq -10$ dB			$G_0$ [dBi] para $f = 2,4$ GHz
	$\Re\{Z_{en}\}$ [Ω]	$\Im\{Z_{en}\}$ [Ω]	$f_{min}$ [GHz]	$f_{máx}$ [GHz]	$Bw$ (%)	
0,06	53,46	-28,96	2,381	2,721	13,33	3,92
0,07	53,63	-17,34	2,343	2,662	12,75	3,99
0,08	51,78	0,07	2,287	2,562	11,34	4,04
0,09	53,27	12,50	2,254	2,494	10,11	3,99
0,10	53,97	28,63	2,208	2,423	9,29	4,07

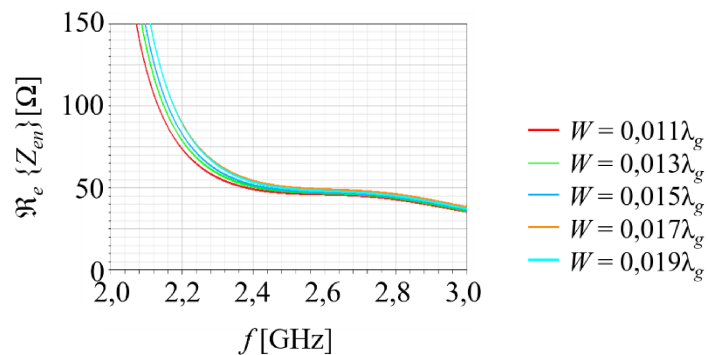
Fonte: A autora.

O terceiro estudo realizado foi sobre o impacto dos valores de  $W$  no projeto da antena. Para tal, considerou-se também os condutores das duas camadas como perfeitos. Então, para quantificar a influência de  $W$  realizou-se um estudo numérico no simulador ANSYS HFSS,

fixando  $L_1 = 0,253\lambda_g$ ,  $L_2 = 0,08\lambda_g$ ,  $d = 0,044\lambda_g$ ,  $L_s = \lambda_g$  e  $W_s = 0,5\lambda_g$ , e estudou-se os valores de  $W$ , analisando entre  $0,011\lambda_g$  e  $0,019\lambda_g$ .

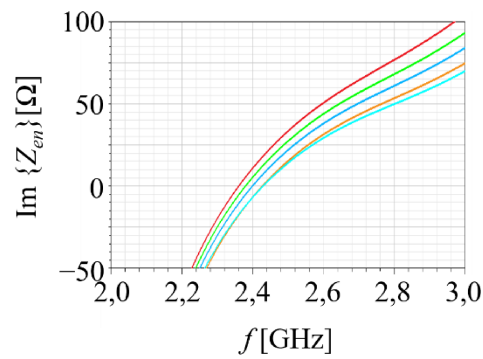
Os principais resultados do estudo da influência de  $W$  no funcionamento das antenas IFA são apresentados na Figura 4.19 na Tabela 4.10. Na Figura 4.19(a) tem-se o comportamento da parte real da impedância de entrada em que para a frequência de 2,4 GHz os valores variam entre  $49,22\Omega$  e  $54,39\Omega$  (conforme a Tabela 4.10), em que os valores de  $\Re\{Z_{en}\}$ , assim como para  $L_2$ , não se alteram significativamente com  $W$ , estando (para a condição estudada) sempre bem próximo de  $50\Omega$ . Na Figura 4.19(b) tem-se o comportamento da parte imaginária da impedância de entrada onde se percebe que para a frequência de 2,4 GHz os valores variam entre  $-6,97\Omega$  e  $10,77\Omega$  (conforme a Tabela 4.10), em que, de modo oposto à como para  $L_1$  e  $L_2$ , tem-se o valor de  $\text{Im}\{Z_{en}\}$  decrescendo com o aumento de  $W$ . Na Figura 4.19(c) tem-se o comportamento do módulo do coeficiente de reflexão onde se percebe que a banda de operação (definida para  $|\Gamma| [\text{dB}] \leq -10\text{dB}$ ) com valores variando entre 9,8% e 13,61% da frequência central. Fica evidente que  $W = 0,015\lambda_g$  leva a antena a apresentar em 2,4 GHz  $\Re\{Z_{en}\}$  e  $\text{Im}\{Z_{en}\}$  muito próximos de, respectivamente,  $50\Omega$  e  $0\Omega$ . Por esse motivo, esse valor será o adotado nesse trabalho. Assim, para os valores das variáveis definidos até então, a antena apresenta uma banda de operação de 11,34% da frequência central e o ganho na direção de máxima irradiação (com comportamento não onidirecional como será melhor apresenta a seguir) de 4,04 dBi. Entretanto, é importante destacar que a variável  $W$  (que também não é apresentada de modo tão claro na literatura) pode ser utilizada também para ajuste da faixa de operação, visto que se tem o deslocamento em frequência da operação da antena e variação da largura de banda (que tende a ser maior quanto maior for o valor de  $W$ ) com a modificação dessa variável. Desse modo, essa conclusão também é uma importante constatação desse trabalho.

**Figura 4.19 – Análise numérica da influência do comprimento  $W$  da antena IFA.**

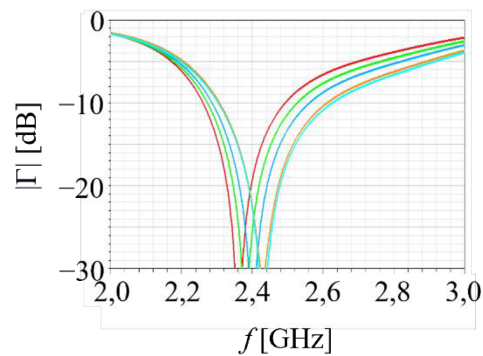


(a) Parte real da impedância de entrada.





(b) Parte imaginária da impedância de entrada.



(c) Coeficiente de reflexão.

Fonte: A autora.

**Tabela 4.10 – Valores da análise numérica da influência do comprimento  $W$  da antena IFA.**

$W$ ( $\lambda_g$ )	Impedância de entrada para $f = 2,4$ GHz		Banda para $ \Gamma $ [dB] $\leq -10$ dB			$G_o$ [dBi] para $f = 2,4$ GHz
	$\Re_e \{Z_{en}\}$ [ $\Omega$ ]	$\text{Im} \{Z_{en}\}$ [ $\Omega$ ]	$f_{min}$ [GHz]	$f_{m\acute{a}x}$ [GHz]	$Bw$ (%)	
0,011	49,22	10,77	2,261	2,494	9,8	4,05
0,013	50,72	5,26	2,274	2,528	10,58	4,04
0,015	51,78	0,07	2,287	2,562	11,34	4,04
0,017	54,39	-6,84	2,308	2,612	12,36	4,03
0,019	53,52	-6,97	2,304	2,627	13,10	4,00

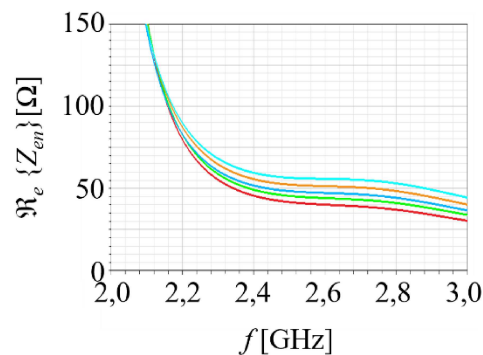
Fonte: A autora.

O quarto estudo realizado foi sobre o impacto dos valores de  $d$  no projeto da antena. Para tal, considerou-se também os condutores das duas camadas como perfeitos. Então, para quantificar a influência de  $d$  realizou-se um estudo numérico no simulador ANSYS HFSS, fixando  $L_1 = 0,253\lambda_g$ ,  $L_2 = 0,08\lambda_g$ ,  $W = 0,015\lambda_g$ ,  $L_s = \lambda_g$  e  $W_s = 0,5\lambda_g$ , e estudou-se os valores de  $W$ , analisando entre  $0,036\lambda_g$  e  $0,052\lambda_g$ .

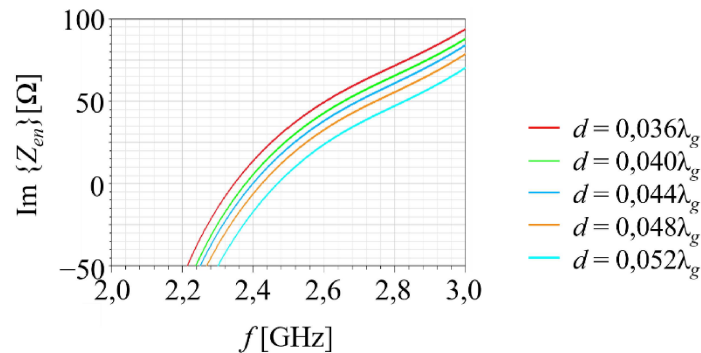
Os principais resultados do estudo da influência de  $d$  no funcionamento das antenas IFA são apresentados na Figura 4.20 na Tabela 4.11. Na Figura 4.20(a) tem-se o comportamento da parte real da impedância de entrada em que para a frequência de 2,4 GHz os valores variam entre  $45,62\Omega$  e  $59,52\Omega$ , em que os valores de  $\Re_e \{Z_{en}\}$ , assim como para  $L_1$ , crescem com  $d$ . Na Figura 4.20(b) tem-se o comportamento da parte imaginária da impedância de entrada onde se percebe que para a frequência de 2,4 GHz os valores variam entre  $-17,22\Omega$  e  $13,64\Omega$ , em que,

assim como  $W$ , tem-se os valores de  $\text{Im}\{Z_{en}\}$  decrescendo com o aumento de  $d$ . Na Figura 4.20(c) tem-se o comportamento do módulo do coeficiente de reflexão onde percebe-se que a banda de operação com valores variando entre 9,7% e 13,10% da frequência central. Fica evidente para  $d = 0,044\lambda_g$  a antena apresenta em 2,4 GHz  $\Re\{Z_{en}\}$  e  $\text{Im}\{Z_{en}\}$  muito próximos de, respectivamente,  $50\Omega$  e  $0\Omega$ . Por esse motivo, esse valor será o adotado nesse trabalho. Assim, para os valores das variáveis definidos até então, a antena apresenta uma banda de operação de 11,34% da frequência central e o ganho na direção de máxima irradiação (com comportamento não onidirecional como será melhor apresenta a seguir) de 4,04 dBi.

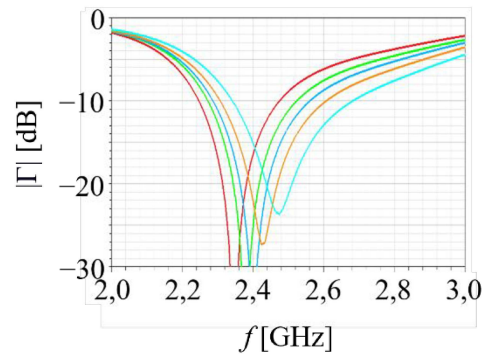
Figura 4.20 – Análise numérica da influência do comprimento  $d$  da antena IFA.



(a) Parte real da impedância de entrada.



(b) Parte imaginária da impedância de entrada.



(c) Coeficiente de reflexão.

Fonte: A autora.

Tabela 4.11 – Valores da análise numérica da influência do comprimento  $d$  da antena IFA.

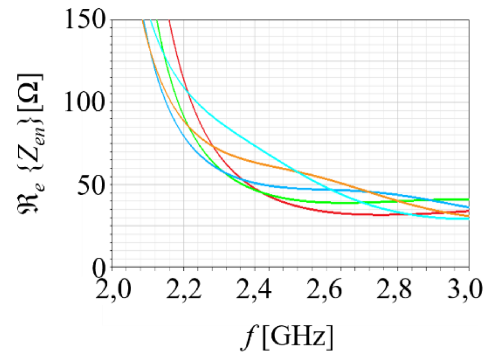
$d$ ( $\lambda_g$ )	Impedância de entrada para $f = 2,4$ GHz		Banda para $ \Gamma $ [dB] $\leq -10$ dB			$G_o$ [dBi] para $f = 2,4$ GHz
	$\Re\{Z_{en}\}$ [ $\Omega$ ]	$\text{Im}\{Z_{en}\}$ [ $\Omega$ ]	$f_{min}$ [GHz]	$f_{max}$ [GHz]	$Bw$ (%)	
0,036	45,62	13,64	2,247	2,476	9,70	4,06
0,040	49,22	5,34	2,273	2,525	10,50	4,01
0,044	51,78	0,07	2,287	2,562	11,34	4,04
0,048	55,66	-6,38	2,307	2,609	12,29	4,01
0,52	59,52	-17,22	2,342	2,684	13,61	3,98

Fonte: A autora.

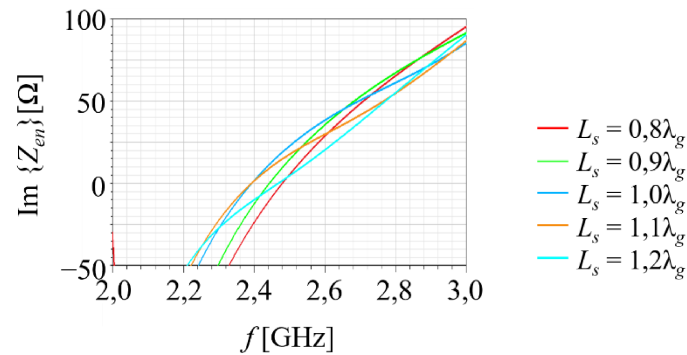
O quinto estudo realizado foi sobre o impacto dos valores de  $L_s$  no projeto da antena. Para tal, considerou-se também os condutores das duas camadas como perfeitos. Então, para quantificar a influência de  $L_s$  realizou-se um estudo numérico no simulador ANSYS HFSS, fixando  $L_1 = 0,253\lambda_g$ ,  $L_2 = 0,08\lambda_g$ ,  $W = 0,015\lambda_g$ ,  $d = 0,044\lambda_g$  e  $W_s = 0,5\lambda_g$ , e estudou-se os valores de  $L_s$ , analisando entre  $0,8\lambda_g$  e  $1,2\lambda_g$ .

Os principais resultados do estudo da influência de  $L_s$  no funcionamento das antenas IFA são apresentados na Figura 4.21 na Tabela 4.12. Na Figura 4.21(a) tem-se o comportamento da parte real da impedância de entrada em que para a frequência de 2,4 GHz os valores variam entre  $47,74\Omega$  e  $73,62\Omega$  (conforme a Tabela 4.12), em que os valores de  $\Re\{Z_{en}\}$ , decrescem com  $L_s$ . Na Figura 4.21(b) tem-se o comportamento da parte imaginária da impedância de entrada onde se percebe que para a frequência de 2,4 GHz os valores variam entre  $-23,92\Omega$  e  $1,39\Omega$  (conforme a Tabela 4.12), em que quando  $L_s$  se distancia do valor de  $\lambda_g$  (para menos ao para mais) nota-se a  $\text{Im}\{Z_{en}\}$  cada vez mais distante da ressonância. Na Figura 4.21(c) tem-se o comportamento do módulo do coeficiente de reflexão onde se percebe que a banda de operação (definida para  $|\Gamma|$  [dB]  $\leq -10$ dB) com valores variando entre 8,21% e 14,93% da frequência central. Fica evidente para  $L_s = \lambda_g$  a antena a apresentar em 2,4 GHz  $\Re\{Z_{en}\}$  e  $\text{Im}\{Z_{en}\}$  muito próximos de, respectivamente,  $50\Omega$  e  $0\Omega$ . Por esse motivo, esse valor será o adotado nesse trabalho. Assim, para os valores das variáveis definidos até então, a antena apresenta uma banda de operação de 11,34% da frequência central e o ganho na direção de máxima irradiação (com comportamento não onidirecional como será melhor apresenta a seguir) de 4,04 dBi. Entretanto, é importante destacar que a variável  $L_s$  (que não é apresentada de modo tão claro na literatura) é de fundamental importância para a operação na faixa de frequências desejada pela antena, sendo necessário estudar o seu valor para as condições de projeto em questão.

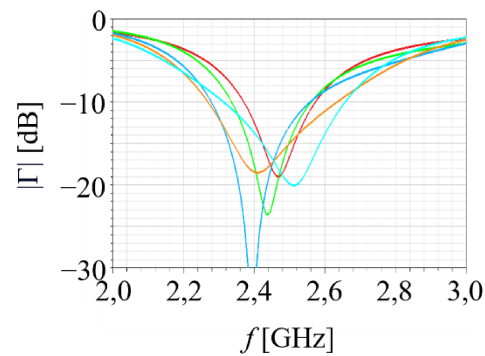
Figura 4.21 – Análise numérica da influência do comprimento  $L_s$  da antena IFA.



(a) Parte real da impedância de entrada.



(b) Parte imaginária da impedância de entrada.



(c) Coeficiente de reflexão.

Fonte: A autora.

Tabela 4.12 – Valores da análise numérica da influência do comprimento  $L_s$  da antena IFA.

$L_s$ ( $\lambda_g$ )	Impedância de entrada para $f = 2,4$ GHz		Banda para $ \Gamma $ [dB] $\leq -10$ dB			$G_o$ [dBi] para $f = 2,4$ GHz
	$\Re\{Z_{en}\}$ [Ω]	$\Im\{Z_{en}\}$ [Ω]	$f_{min}$ [GHz]	$f_{máx}$ [GHz]	$Bw$ (%)	
0,8	47,74	-23,92	2,371	2,574	8,21	3,79
0,9	46,82	-12,60	2,336	2,562	9,23	3,89
1,0	51,78	0,07	2,287	2,562	11,34	4,04
1,1	63,51	1,39	2,269	2,635	14,93	4,19
1,2	73,62	-10,05	2,313	2,658	13,88	4,54

Fonte: A autora.

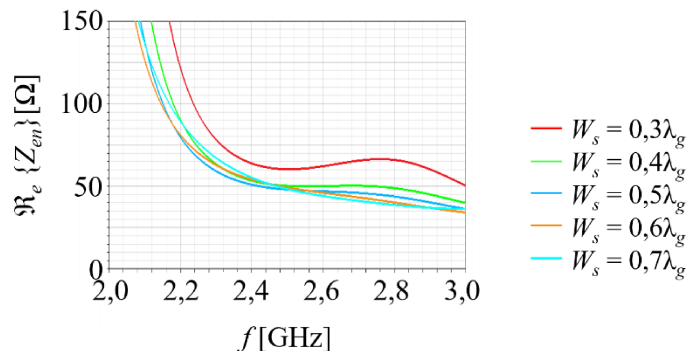
O sexto estudo realizado foi sobre o impacto dos valores de  $W_s$  no projeto da antena. Para tal, considerou-se também os condutores das duas camadas como perfeitos. Então, para quantificar a influência de  $W_s$  realizou-se um estudo numérico no simulador ANSYS HFSS,

fixando  $L_1 = 0,253\lambda_g$ ,  $L_2 = 0,08\lambda_g$ ,  $W = 0,015\lambda_g$ ,  $d = 0,044\lambda_g$  e  $L_s = \lambda_g$ , e estudou-se os valores de  $W_s$ , analisando entre  $0,3\lambda_g$  e  $0,7\lambda_g$ .

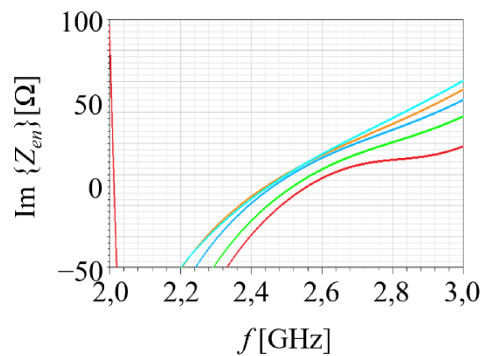
Os principais resultados do estudo da influência de  $W_s$  no funcionamento das antenas IFA são apresentados na Figura 4.22 na Tabela 4.13. Na Figura 4.22(a) tem-se o comportamento da parte real da impedância de entrada em que para a frequência de 2,4 GHz os valores variam entre  $51,78\Omega$  e  $63,87\Omega$  (conforme a Tabela 4.13), em que os valores de  $\Re\{Z_{en}\}$  ficam mais distantes de  $50\Omega$  quando os valores de  $W_s$  se distanciam (para menos ao para mais) de  $0,5\lambda_g$ . Na Figura 4.22(b) tem-se o comportamento da parte imaginária da impedância de entrada onde percebe-se que para a frequência de 2,4 GHz os valores variam entre  $-24,00\Omega$  e  $7,05\Omega$  (conforme a Tabela 4.13). Na Figura 4.22(c) tem-se o comportamento do módulo do coeficiente de reflexão onde se percebe que a banda de operação (definida para  $|\Gamma| [\text{dB}] \leq -10\text{dB}$ ) com valores variando entre 11,34% e 14,60% da frequência central. Fica evidente para  $W_s = 0,5\lambda_g$  a antena a apresentar em 2,4 GHz  $\Re\{Z_{en}\}$  e  $\text{Im}\{Z_{en}\}$  muito próximos de, respectivamente,  $50\Omega$  e  $0\Omega$ . Por esse motivo, esse valor será o adotado nesse trabalho. Assim, para os valores das variáveis definidos até então, a antena apresenta uma banda de operação de 11,34% da frequência central e o ganho na direção de máxima irradiação (com comportamento não onidirecional como será melhor apresentado a seguir) de 4,04 dBi. Entretanto, é importante destacar que a variável  $W_s$  (que não é apresentada de modo tão claro na literatura) também é de fundamental importância para a operação na faixa de frequências desejada pela antena, sendo necessário estudar o seu valor para as condições de projeto em questão.

Após quantificar as dimensões finais da antena IFA operando na frequência central de 2,4 GHz a partir de estudos, analisou-se as características de irradiação para a antena já com os valores finais das variáveis, ou seja,  $L_1 = 0,253\lambda_g$ ,  $L_2 = 0,08\lambda_g$ ,  $W = 0,015\lambda_g$ ,  $d = 0,044\lambda_g$ ,  $L_s = \lambda_g$  e  $W_s = 0,5\lambda_g$ .

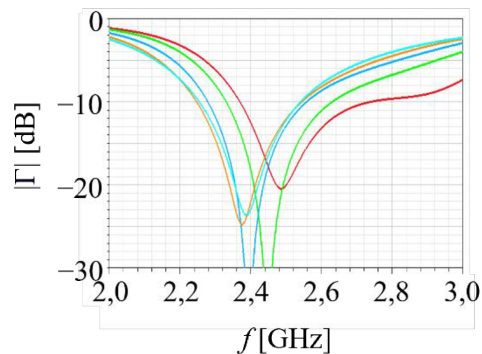
**Figura 4.22 – Análise numérica da influência do comprimento  $W_s$  da antena IFA.**



(a) Parte real da impedância de entrada.



(b) Parte imaginária da impedância de entrada.



(c) Coeficiente de reflexão.

Fonte: A autora.

**Tabela 4.13 – Valores da análise numérica da influência do comprimento  $W_s$  da antena IFA.**

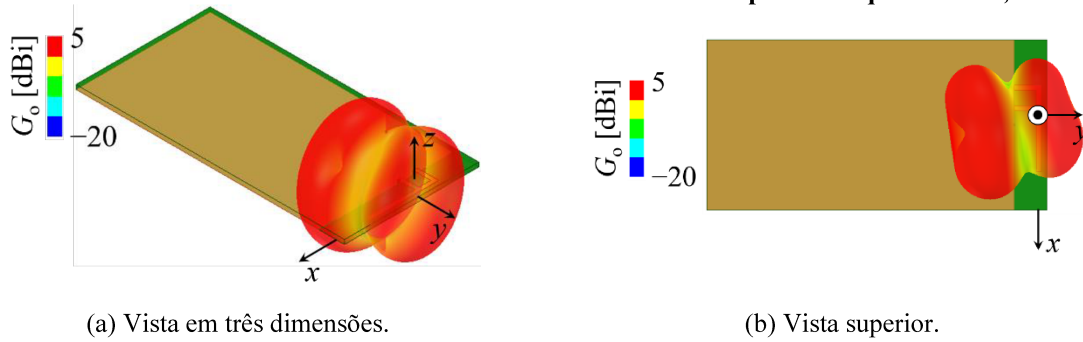
$W_s$ ( $\lambda_g$ )	Impedância de entrada para $f = 2,4$ GHz		Banda para $ \Gamma $ [dB] $\leq -10$ dB			$G_o$ [dBi] para $f = 2,4$ GHz
	$\Re\{Z_{en}\}$ [ $\Omega$ ]	$\text{Im}\{Z_{en}\}$ [ $\Omega$ ]	$f_{min}$ [GHz]	$f_{m\acute{a}x}$ [GHz]	$Bw$ (%)	
0,3	63,87	-24,00	2,369	2,742	14,60	5,20
0,4	53,48	-12,53	2,331	2,631	12,09	4,77
0,5	51,78	0,07	2,287	2,562	11,34	4,04
0,6	54,12	7,05	2,247	2,545	12,44	3,54
0,7	55,32	5,17	2,255	2,542	11,97	3,43

Fonte: A autora.

Na Figura 4.23 tem-se o comportamento do diagrama de irradiação de ganho em três dimensões (sobreposto a antena). Observa-se que devido ao formato da antena e efeito de reflexão por parte do plano de terra, tem-se um diagrama de irradiação não onidirecional, com ganho na direção de máxima irradiação  $G_o = 4,04$  dBi.

Desse modo, não é observado (como visto na antena helicoidal) que em todas as direções o sinal será direcionado com mesma intensidade. Assim, pode haver direções em que a qualidade do sinal seja reduzida ao ponto de não haver conexão com os sinais Wi-Fi.

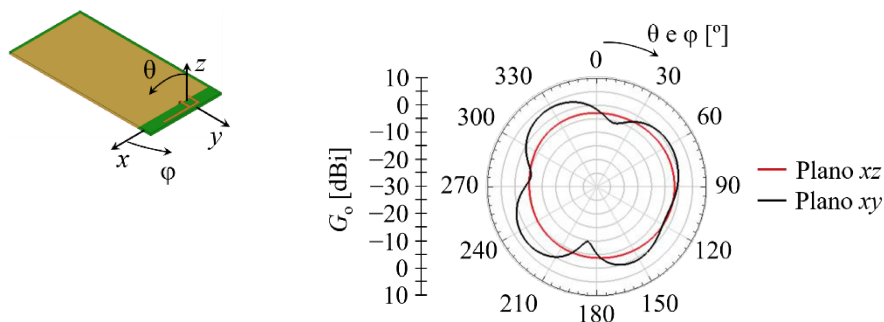
**Figura 4.23 – Ganho em três dimensões do modelo final da antena IFA para a frequência de 2,4GHz.**



Fonte: A autora.

Para uma melhor visualização dessa característica, na Figura 4.24 tem-se o comportamento do diagrama de irradiação de ganho em duas dimensões em corte realizados nos planos  $xz$  e  $yz$ . Fica mais nítido que na horizontal (plano  $xy$  que varia com o ângulo de coordenadas esféricas  $\phi$ ) o diagrama é não onidirecional, havendo nulos (ou direções com menores valores de intensidade de irradiação). Observa-se que na vertical (plano  $xz$  que varia com o ângulo de coordenadas esféricas  $\theta$ ) o diagrama até tem comportamento onidirecional, porém, na direção perpendicular a antena, em  $\theta = 90^\circ$ , não há a máxima irradiação. Assim, esse modelo de antena no quesito irradiação é inferior as antenas monopolo e helicoidal.

**Figura 4.24 – Ganho em duas dimensões do modelo final da antena IFA para a frequência de 2,4GHz.**



Após as análises realizadas definiu-se como dimensões finais para antena IFA apresenta nesse trabalho como sendo  $L_1 = 0,253\lambda_g$ ,  $L_2 = 0,08\lambda_g$ ,  $W = 0,015\lambda_g$ ,  $d = 0,044\lambda_g$ ,  $L_s = \lambda_g$  e  $W_s = 0,5\lambda_g$ . Como a frequência de projeto estudada foi 2,4 GHz e material dielétrico utilizado tem  $\epsilon_r = 2,2$  e  $h = 1,575\text{m}$ , em que  $\lambda_g = 98,82\text{mm}$ , as dimensões finais da antena são  $98,82\text{mm} \times 49,41\text{mm} \times 1,575\text{mm}$  (conforme ilustração da Figura 4.16).

## 4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse capítulo apresentou-se os resultados e discussões sobre esse trabalho de conclusão de curso. Assim, foram apresentados resultados de simulação dos parâmetros de impedância e de irradiação de três antenas comumente utilizadas em roteadores Wi-Fi. Além disso, após os estudos definiu-se as dimensões finais de cada antena que levassem ao melhor funcionamento da faixa de frequência no entorno de 2.4 GHz. Assim, foi possível também quantificar a relação entre os valores de dimensões das antenas.

Na Tabela 4.14 tem-se o estudo comparativo entre as três antenas analisadas. É importante destacar que os modelos finais foram otimizados e tem como métrica principal a operação centrada em 2,4 GHz. Desse modo, cada uma das antenas com vantagens e desvantagens. A antena monopolo apresenta a maior banda, porém o maior volume (calculado a partir das medidas de largura, comprimento do plano de terra e comprimento da antena). A antena helicoidal apresenta diagrama de irradiação perfeitamente onidirecional, porém a menor banda. A antena IFA apresenta o menor volume, porém o digrama não onidirecional. Desse modo, não é justo dizer qual a melhor para essa aplicação, mas sim apresentar as vantagens e desvantagens que pode levar a escolha para determinada aplicação.

**Tabela 4.14 – Comparativo entre as três antenas analisadas.**

<b>Antena</b>	<b><math>Bw(\%)</math></b>	<b><math>G_o</math> [dBi]</b>	<b>Tipo de irradiação</b>	<b>Volume [m<sup>3</sup>]</b>
Monopolo	36,66	4,04	Quase onidirecional	0,0004
Helicoidal	3,78	1,82	Onidirecional	0,00005
IFA	11,34	4,04	Não onidirecional	0,000008

Fonte: A autora.



# CAPÍTULO 5

## CONCLUSÕES, CONTRIBUIÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

---

*Neste capítulo são apresentadas as conclusões e os desenvolvimentos futuros que poderão ser realizados tomando como base esse trabalho de conclusão de curso.*

### 5.1 CONCLUSÃO E CONTRIBUIÇÃO

Este trabalho de conclusão apresentou um estudo comparativo entre três antenas comumente utilizadas para roteadores Wi-Fi, atuando na faixa de frequências no entorno de 2,4 GHz. Para tal, realizou-se um conjunto de estudos em cada antena, tendo como objetivo apresentar vantagens e desvantagens de cada modelo.

Para melhor compreensão do trabalho como um todo, cada capítulo trouxe conceitos específicos. Apresentou-se nos Conceitos Introdutórios (Capítulo 1) as motivações, objetivos e justificativas para o desenvolvimento do trabalho. No Referencial Teórico (Capítulo 2) discorreu-se com a teoria básica de antenas de redes Wi-Fi, para assim fundamentar o desenvolvimento. Em Materiais e Métodos (Capítulo 3) foi descrito os recursos de desenvolvimento do trabalho de conclusão de curso, bem como as etapas para o desenvolvimento, citando o simulador que utilizado. Em Resultados e Discussões (Capítulo 4) foram apresentados os estudos sobre cada uma das três antenas, destacando e comparando as características observadas.

Com as informações apresentadas no Capítulos anteriores pode ser concluir que foram atendidos os critérios esperados para o trabalho de conclusão de curso. Assim, tem-se um estudo comparativo que pode indicar qual dessas três antenas pode ser vista com mais vantajosa para uma aplicação específica do Wi-Fi.

### 5.2 TRABALHOS FUTUROS

Acredita-se que o trabalho atingiu os objetivos propostos, entretanto, há possibilidades de melhorias e continuações. Uma primeira sugestão para continuação do trabalho é adicionar outros modelos de antenas que operam no Wi-Fi nesse estudo, destacando a escolha de antenas

que possam operar não somente em 2,4 GHz, mas em mais de uma banda como 5,1 GHz. Além disso, o estudo pode ser aplicado a antenas que trabalhem em outras tecnologias, como por exemplo em comunicação móvel celular.

# REFERÊNCIAS

---

- DE ALMEIDA, J. M. F. **Breve história da Internet**. n. Universidade do Minho. Departamento de Sistemas de Informação, 2005.
- BALANIS, C. A. **Antenna theory: analysis and design**, 3rd ed., John Wiley and Sons, Nova York, 2005.
- BUCCO R. Tele.Síntese: **Brasileiros usam o WIFI 58% do tempo em que passam conectados a redes sem fio**, 2016. Disponível em: <https://www.telesintese.com.br/brasileiros-usam-o-wifi-58-do-tempo-que-passam-conectados/>. Acesso em: 09 abril de 2021.
- CAMBRAIA, G. **Análise da propagação para WLAN na faixa de frequência de 2,4GHz em ambientes internos**. Trabalho de conclusão de curso – Departamento de Engenharia Elétrica do CEFET-MG. Belo Horizonte - MG, 2014.
- CHEN Z. N.; LIU D.; NAKANO H.; QING X.; and ZWICK T.; **Handbook of Antenna Technologies**, Springer, 2016.
- CISCO. “**Cisco Annual Internet Report (2018–2023)**”, White Paper, 2020. Disponível em: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>. Acesso em: 30 de março de 2021.
- CLOUDFLARE. **O que é latência?** Disponível em: <https://www.cloudflare.com/pt-br/learning/performance/glossary/what-is-latency/>. Acesso em: 27 março de 2023.
- COLDBACH, G. **Wireless Networking: Introduction to Bluetooth and WiFi**, eBook Kindle, 2019.
- DUARTE, F. L. C.; CARVALHO, C. P.; LEITE, J. J. R. e SEGUNGO, F. C. G. S. "Análise de Propagação de Sinais em Ambiente Indoor: Uma Comparação Entre Os Modelos One Slope, ITU-R P.1238-1, Keenan-Motley e Medições in Loco," em IV Encontro de Computação do Oeste Potiguar (ECOP 2019). Pau dos Ferros/RN - 22 a 24 de maio de 2019.
- EISHIMA R. Canal Tech: **Internet alcança 74% dos brasileiros e 58% utilizam a rede apenas pelo celular**, 2020. Disponível em: <https://canaltech.com.br/internet/internet-alcanca-74-dos-brasileiros-e-58-utilizam-a-rede-apenas-pelo-celular-165851/>. Acesso em: 09 abril de 2021.
- FILHO, B. Città Telecom: **O que é WiFi? Para que serve? Como usar?** 2016. Disponível em: <https://www.cittatelecom.com.br/2016/06/o-que-e-wifi-para-que-serve-como-usar/>. Acesso em: 09 abril de 2021.
- GTA UFRJ. **Arquitetura de Rede Sem Fio 802.11**. Disponível em: [https://www.gta.ufrj.br/grad/01\\_2/802-mac/](https://www.gta.ufrj.br/grad/01_2/802-mac/) Acesso em: 09 abril de 2021.

GTA UFRJ. **IEEE 802.11**. Disponível em: [https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel878/redes1-2016-1/16\\_1\\_2/saullo/trabalho\\_redes1/Referencias/IEEE%20802.11.pdf](https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel878/redes1-2016-1/16_1_2/saullo/trabalho_redes1/Referencias/IEEE%20802.11.pdf) Acesso em: 09 abril de 2021.

JARDIM, F. de M. **Treinamento Avançado em Redes Wireless**, 1ª Ed. Editora Digerati Books, 2007.

LATHI, B. P. **Sistemas de Comunicações Analógicos e Digitais Modernos**, 4ª Ed., Editora LTC, 2012.

NAJNUDEL, M. **Estudo de Propagação em Ambientes Fechados para o Planejamento de WLANs**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Rio de Janeiro - RJ, 2004.

OFICINA DA NET. **O que é wireless e como funciona?** Disponível em: <https://www.oficinadanet.com.br/>. Acesso em: 06 de abril de 2021

POSITIVO CASA INTELIGENTE. **Qual a diferença entre potência e velocidade do roteador Wi-Fi?**, 2021. Disponível em: <https://blog.positivocasainteligente.com.br/qual-a-diferenca-entre-potencia-e-velocidade-do-roteador-wi-fi/>. Acesso em: 27 março de 2023.

RAPPAPORT, T. S. **Comunicações Sem Fio: Princípios e Práticas**, 2ª Ed., Pearson, 2009.

RIBEIRO, J. A. J. **Engenharia de antenas: fundamentos, projetos e aplicações**, Érica, 2012.

RIBEIRO, J. A. J. **Engenharia de micro-ondas: fundamentos e aplicações**, Érica, 2008.

ROGERS CORPORATION. **“RT/duroid® 5880 Laminates”**. Disponível em: <https://www.rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/rt-duroid-laminates/rt-duroid-5880-laminates>>. Acesso em: 05 Abril de 2023.

SALTIÉL, Renan Mathias Ferreira. **Indústria 4.0 e Sistema Hyundai de Produção: suas interações e diferenças**, 2017. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/317369702\\_Industria\\_40\\_e\\_Sistema\\_Hyundai\\_de\\_Producao\\_suas\\_interacoes\\_e\\_diferencas](https://www.researchgate.net/publication/317369702_Industria_40_e_Sistema_Hyundai_de_Producao_suas_interacoes_e_diferencas). Acesso em: 20 março de 2023.

SILVA M. A. **Análise de propagação de redes WLAN em ambientes indoor**. Trabalho de conclusão de curso – Departamento de Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Santa Catarina. São José - SC, 2018.

SÓ FÍSICA. **"Como funcionam as redes Wi-Fi?"** Virtuoso Tecnologia da Informação, 2008-2021. Disponível em: [http://www.sofisica.com.br/conteudos/curiosidades/wi\\_fi.php](http://www.sofisica.com.br/conteudos/curiosidades/wi_fi.php). Acesso em: 09 abril de 2021.

TANENBAUM, A. S. e WETHERALL, D. **"Redes de Computadores,"** 5ª Ed., Pearson, 2011.

TELECO. **Redes Sem Fio: Tecnologias de Redes Sem Fio**, 2017. Página 3. Disponível em: [https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialredespbaid/pagina\\_3.asp](https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialredespbaid/pagina_3.asp). Acesso em: 09 abril de 2021.

UNIVERSITY OF COLORADO. **WIRELESS LOCAL AREA NETWORK IEE 802.11.**  
Disponível em: <http://www.cs.uccs.edu/> Acesso em: 06 de abril de 2021.