

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO NORTE
CAMPUS NATAL - ZONA NORTE

SAMUEL LAU DE SOUZA

ANÁLISE E SÍNTESE DE ANTENAS YAGI-UDA E BIQUAD

NATAL-RN

2017

SAMUEL LAU DE SOUZA

ANÁLISE E SÍNTESE DE ANTENAS YAGI-UDA E BIQUAD

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Técnico Integrado em Eletrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do título de Técnico em Eletrônica.

Orientador: Dr. Érico Cadineli Braz

NATAL-RN

2017

SAMUEL LAU DE SOUZA

ANÁLISE E SÍNTESE DE ANTENAS YAGI-UDA E BIQUAD

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Técnico Integrado em Eletrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do título de Técnico em Eletrônica.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado e aprovado em ___/___/___, pela seguinte Banca Examinadora:

BANCA EXAMINADORA

Prof Dr Érico Cadineli Braz - Orientador

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Prof Msc. Pedro Ivo de Araújo do Nascimento - Avaliador

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Prof Msc Sergio Roberto Dantas - Avaliador

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Dedico a minha vó Etelvina Xavier e a toda minha família, responsáveis pela formação do meu caráter e educação. Auxiliaram e contribuíram para o meu crescimento.

AGRADECIMENTO

Agradeço a todos meus professores que me aconselharam e orientaram durante a fase de amadurecimento educacional e pessoal.

Agradeço a **Sérgio Roberto** por disponibilizar os equipamentos necessários e me ajudar quando necessário.

Agradeço ao radioamador **Igor Jobim** (PY3IG) pela grande contribuição para a evolução desse projeto.

Agradeço ao meu orientador, **Dr. Érico Braz**, que foi responsável por me direcionar no caminho certo para finalizar esse projeto e pelo seu suporte e incentivos.

Agradecimento a minha segunda família, a turma **4.4206.1M, 2017 (NPN)**, por todos momentos bons reservados nesses quatro anos.

A todos meus amigos que me deram forças para continuar.

A todos que me ajudaram a chegar até aqui.

“Quanto mais aumenta nosso conhecimento, mais evidente fica nossa ignorância”.

(John F. Kennedy)

RESUMO

As antenas são fundamentais nos sistemas de comunicações Wireless, tornaram-se essenciais nas diversas atividades humanas. Elas estão presentes em todos os espaços, públicos ou privados, como: casas, locais de trabalho e escolas. Diante disso, este trabalho propõe uma análise e síntese de antenas diretivas para WLAN, operando na faixa de frequência de 2.4GHz (Wi-Fi-802.11/n/g). A característica distintiva dessas antenas é a sua facilidade de construção e seu bom desempenho, embora elas não sejam popularmente difundidas no comércio. Neste trabalho foram abordados a análise, projeto e fabricação das antenas: Biquad com refletor e Yagi-Uda; e foram discutidos parâmetros como ganho, diretividade, impedância de entrada e polarização. Além disso, verificou-se uma boa convergência entre os resultados experimentais e de simulações.

Palavras-chave: Antenas diretivas; Yagi-Uda; Biquad.

ABSTRACT

The antennas are fundamental in the systems of Wireless communications, they have become essential in the diverse human activities. They are present in all public or private spaces, such as houses, workplaces and schools. This work proposes an analysis and synthesis of directional antennas for WLAN, operating in the 2.4GHz frequency band (Wi-Fi-802.11 / n / g). The distinguishing feature of these antennas is their ease of construction and their good performance, although they are not popularly commercialized. In this work the analysis, design and manufacture of antennas were studied: Biquad with reflector and Yagi-Uda; and parameters such as gain, directivity, input impedance and polarization were discussed. In addition, there was good convergence between the experimental and simulation results.

Keywords: Directional antennas; Yagi-Uda; Biquad.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Propagação da onda eletromagnética	18
Figura 2 - Espectro eletromagnético	20
Figura 3 - Estrutura básica de uma comunicação sem fio	21
Figura 4 - Diagramas de radiação	24
Figura 5 - Diagrama de radiação de um dipolo de meia onda	24
Figura 6 - Diagrama de radiação de uma antena direcional	25
Figura 7- Acoplamento entre a antena e a linha de transmissão.....	28
Figura 8 - Perda de retorno de uma antena	30
Figura 9 - Antena dipolo de meia-onda	32
Figura 10 - Distribuição da corrente e tensão no dipolo	33
Figura 11 - Padrão de radiação antena dipolo $\lambda/2$	34
Figura 12 – Dipolo dobrado.....	35
Figura 13 - Tipos de antenas	35
Figura 14 - Antena de quadro simples	36
Figura 15 - Ponto da alimentação de antena de quadro.....	37
Figura 16 - Diagrama de radiação da antena de quadro polarizada horizontalmente.....	37
Figura 17 - Polarização horizontal (A) e vertical (B) da antena de quadro.....	38
Figura 18 - Estrutura da antena Yagi-Uda.....	40
Figura 19 - Yagi - Uda com 2 elementos.....	41
Figura 20 - Diagrama de radiação da Yagi-Uda com 2 elementos	42
Figura 21 – Projeto da antena relacionando o diâmetro dos elementos e a frequência.....	47
Figura 22 - Correção para os valores dos diretores e refletores.....	48
Figura 23 - Correção do segundo refletor	49
Figura 24 - Antena Biquad	51
Figura 25 - Diagrama de radiação de uma antena Biquad	53
Figura 26 - Diferentes tipos de refletores	54
Figura 27 - Alimentação da antena Biquad	54
Figura 28 - Projeto da antena Biquad	56
Figura 29 - Estrutura da antena Yagi-Uda projetada dentro da norma NBS.....	58
Figura 30 - Coeficiente de reflexão da antena Yagi-Uda simulada.....	58
Figura 31 - Ganho e relação frente/costa da antena Yagi-Uda simulada.	59
Figura 32 - Impedância da antena Yagi-Uda.....	59
Figura 33 - Diagrama de radiação da antena Yagi-Uda.	60
Figura 34 - Janela da otimização do software 4nec2.	61
Figura 35 - Impedância após a otimização.....	62
Figura 36 - Ganho da antena Yagi-Uda otimizada	63
Figura 37 - Diagrama de radiação após otimização.	64
Figura 38 - Ganho após o acréscimo de 2 diretores.....	65
Figura 39 - Estrutura da antena Biquad e padrão de radiação tridimensional.	66
Figura 40- Relação de onda estacionária e coeficiente de reflexão da antena Yagi-Uda.	67
Figura 41 - Ganho e relação frente/costa da antena Biquad.	67
Figura 42 - Impedância da antena Biquad.	68
Figura 43 - Diagrama de radiação da antena Biquad.	68
Figura 44 - Fio de cobre(a) com 3 mm e cabo coaxial(b)	71
Figura 45 - Cano eletrodotado (a) de 20 mm e canaleta (b) de 20 mm	71
Figura 46 - Design construído no Corel-Draw.	72

Figura 47 - Elementos da Yagi-Uda fixados na canaleta.....	73
Figura 48 - Dipolo soldado ao cabo coaxial.	73
Figura 49 - Protótipo finalizado	74
Figura 50 - Design do protótipo impresso	74
Figura 51 - Elementos lixados para soldagem do cabo coaxial.....	75
Figura 52 - Antena dipolo soldada ao cabo coaxial.....	75
Figura 53 - Protótipo finalizado	76
Figura 54 - Materiais utilizados na construção da antena Biquad.	77
Figura 55 - Conector N fêmea.....	78
Figura 56 - Conector N fêmea com fios soldados	78
Figura 57 - Construção da antena Biquad finalizada.....	79
Figura 58 - Perda de retorno da antena Yagi-Uda com 4 diretores.	80
Figura 59 - Relação de onda estacionária da antena Yagi-Uda com 4 diretores.....	80
Figura 60 - Perda de retorno da Antena Yagi-Uda com 6 diretores.....	81
Figura 61 - Relação de onda estacionária da antena Yagi-Uda com 6 diretores.....	81
Figura 62 - Perda de retorno da antena Biquad.	82
Figura 63 - Relação de onda estacionária da antena Biquad.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Otimização dos comprimentos dos elementos parasitas.....	45
Tabela 2 - Resultados da aplicação da norma NBS 688	50
Tabela 3 - comprimentos gerados pela otimização	61
Tabela 4 - Relação do ganho com o acréscimo de diretores.....	64
Tabela 5 - Comparação de valores medidos e simulados da antena Yagi-Uda com 4 diretores.....	80
Tabela 6 - Comparação de valores medidos e simulados da antena Yagi-Uda com 6 diretores.....	81
Tabela 7 - Comparação de valores medidos e simulados da antena Biquad.	82

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Delimitação do tema	15
1.1.2 Objetivo Geral	15
1.1.3 Objetivos Específicos.....	15
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 CONCEITOS BÁSICOS.....	17
2.1.1 Ondas eletromagnéticas	17
2.2 INTRODUÇÃO AS ANTENAS	20
2.2.1 Tipos de antenas.....	22
2.3 PARÂMETROS FUNDAMENTAIS DAS ANTENAS	22
2.3.1 Diagrama e padrões de radiação	23
2.3.2 Ganho e diretividade.....	25
2.3.3 Casamento de Impedância.....	27
2.3.4 Relação de onda estacionária (R.O.E) e perda de retorno(S11)	29
2.3.5 Polarização da antena	30
2.3.6 Largura de banda.....	31
2.4 ANTENAS FILAMENTARES.....	31
2.4.1 Dipolo de meia-onda.....	32
2.4.2 Loop de quadro.....	35
3 ANÁLISE E PROJETO	39
3.1 ANTENAS YAGI-UDA.....	39
3.1.1 Introdução histórica.....	39
3.1.2 Análise estrutural.....	40
3.1.3 Projeto	42
3.1.4 Procedimentos do projeto.....	44
3.2 ANTENA BIQUAD.....	50
3.2.1 Introdução histórica.....	50
3.2.2 Análise estrutural.....	52
3.2.3 Projeto	55
4. SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DOS PROJETOS.....	57
4.1 4NEC2.....	57

4.2 SIMULAÇÃO DA ANTENA YAGI-UDA	57
4.2.1 Otimização da antena Yagi-Uda	60
4.2.2 Acréscimo de diretores	64
4.3 SIMULAÇÃO DA ANTENA BIQUAD	65
5. CONSTRUÇÃO E MEDIÇÕES	70
5.1 CONSTRUÇÃO DA ANTENA YAGI-UDA	70
5.1.1 Materiais	70
5.1.2 Antena Yagi-Uda com 4 diretores	72
5.1.3 Antena Yagi-Uda com 6 diretores	74
5.2 CONFECÇÃO DA ANTENA BIQUAD	76
5.2.1 Materiais	76
5.2.2 Construção da antena Biquad	77
5.3 MEDIÇÕES E COMPARAÇÕES	79
5.3.1 Perda de retorno(S11) e relação de onda estacionária	79
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PROPOSTAS PARA O FUTURO	84
APÊNDICE A VALORES PARA PERDA DE RETORNO (S11)	88

1 INTRODUÇÃO

A telecomunicação é elementar em uma sociedade que anseia cada vez mais por dinamismo e velocidade em suas interações. Isso está evidenciado na declaração feita pela ONU em 2011, a qual afirma que o acesso à internet é um direito humano essencial. Entretanto, para que esse acesso ocorra são necessários componentes e estruturas complexas que permitam a transmissão de informação entre dois ou mais pontos. Nesse viés, a antena cumpre a imprescindível função de transformar um sinal elétrico, oriundo do transmissor, em energia eletromagnética radiada, para posteriormente um receptor recebê-lo e o processo ser revertido.

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

Apesar de sua principal atribuição ser a transmissão de dados, uma antena apresenta diferentes aplicações. No início do século XX, Marconi, ao elevar a altura das antenas receptoras e transmissoras verificou que podia alcançar distâncias maiores, dessa forma, ele possibilitou um maior atrativo comercial ao seu uso, que era facilitar o pedido de socorro de navios em situação de perigo (FUSCO, 2006).

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

Essa inovação teve início na década de 1970, quando Norman Abramson e sua equipe, na Universidade do Havaí, conseguiu montar uma rede local sem fio de sete computadores com objetivo de se comunicar com um computador principal na ilha de Oahu. Essas redes tomaram grandes proporções sendo empregadas comercialmente

em todas partes do mundo. O surgimento das redes WLAN promoveu a integração de uma rede mundial formando a conhecida “internet”.

No início essa conexão era feita por meio de cabos, porém, isso se tornou limitado, uma vez que não era possível manter essa comunicação quando se locomovia para longe do cabeamento. Dessa forma, a tecnologia tomou grandes proporções a partir do momento que os computadores começaram a ser fabricados com equipamentos capazes de manter uma conexão WLAN sem a necessidade de se manterem conectados por cabos. Para se conectar à rede, um computador deve estar dentro da área de cobertura do ponto de acesso fornecido pela antena transmissora. O padrão WLAN mais utilizado é o IEEE 802.11g, que se popularizou com o nome Wi-Fi. Ele opera na frequência de 2.4 GHz, com uma faixa de alcance da ordem de 100 metros (MELLO & COLCHER, 2005).

Por sua vez, a antena cumpre papel imprescindível no funcionamento do sistema WLAN. Geralmente, as antenas instaladas em dispositivos Wi-Fi são omnidirecionais, com baixa direcionalidade. Elas irradiam o sinal na forma de ondas eletromagnéticas em todas direções. Contudo, sob algumas circunstâncias, é desejável que a distância entre dois dispositivos de WLAN deve ser estendido, por exemplo, numa área rural, onde um fazendeiro se encontra distante do ponto de acesso. Esse empecilho pode ser resolvido através de uma antena transmissora que consiga concentrar a maior parte de sua energia em apenas uma direção desejada ao invés de desperdiçar irradiando o sinal em todos os sentidos igualmente. Do mesmo modo, a antena de recepção deve receber o sinal na direção desejada melhor do que nas outras direções.

Daí vem a necessidade do uso de uma antena especial, que possa executar essa tarefa, em uma extremidade, ou em ambas. Esse tipo é normalmente conhecido como antena direcional. Note-se que, quando uma antena transmite o sinal em um determinado sentido mais forte do que nas outras direções, ela também recebe o sinal nessa direção melhor do que nas outras direções devido à sua propriedade recíproca (BALANIS, 2005). Essa propriedade permite que antenas direcionais sejam usadas a fim de conseguir otimizações em uma comunicação, e para redução de interferência (melhoria na qualidade do sinal) uma vez que devido a sua propriedade recíproca a transmissão e recepção de sinais nas direções indesejadas são minimizados.

Além disso, uma antena direcional pode ser implantada para limitar a área de cobertura do ponto de acesso a uma área desejada. Isso é benéfico quando os

usuários, que querem se conectar à rede, estão concentrados em uma determinada área. Por exemplo, é inútil irradiar o sinal para o exterior do edifício, enquanto os usuários estão dentro do edifício.

Dessa forma, é perceptível a grande importância da antena para os sistemas WLAN. As antenas direcionais podem gerar um significativo aumento no desempenho de uma comunicação sem fio, melhorando o alcance, a qualidade do sinal e a área de cobertura. Há muitas empresas que vendem antenas direcionais no mercado. No entanto, muitas dessas antenas comerciais podem ser construídas em uma oficina em casa.

Assim, é neste contexto que este trabalho propõe o projeto, a simulação e a fabricação de antenas (Biquad e Yagi-Uda) capazes de operar na faixa de Wi-Fi (2.4GHz). O estudo dessas antenas foi desenvolvido focando em suas principais características: diretividade, relação de onda estacionária, impedância de entrada, polarização, relação frente/costa e diagrama de radiação.

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Esse projeto foi desenvolvido para apresentar dois tipos de antenas diretivas feitas de fios, que podem ser empregadas em muitas situações do nosso dia a dia, sendo uma possível solução para problemas de interferências de sinais ou longas distâncias entre o receptor e transmissor do sinal. Diante disso, este trabalho propõe uma análise sobre as antenas Biquad e Yagi-uda, como também a fabricação dessas.

1.1.2 Objetivo Geral

Analisar, projetar, simular, construir e medir antenas que permita emitir e receber sinais de comunicação sem fio em uma frequência de 2.4GHz (Wi-Fi, protocolo 802.11g/n).

1.1.3 Objetivos Específicos

- Realizar uma investigação geral sobre as antenas.
- Coletar informações sobre os estudos e avanços das antenas.
- Extrair material bibliográfico que permita conhecer a metodologia do projeto

Como também, os passos necessários para realizar a implementação das antenas.

- Implementar esboços preliminares das antenas diretivas em questão.
- Executar simulações dos esboços preliminares, se necessário fazer mudanças para obter melhores resultados e definir um design final.
- Construir o projeto final.
- Executar as medições das características apresentada pelas antenas no laboratório.
- Comparar os resultados de simulação com os resultados experimentais.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é composto de seis capítulos. No capítulo 1 será feita a introdução ao trabalho proposto, sua motivação e objetivos.

No segundo capítulo será discutido inicialmente os conceitos fundamentais sobre a teoria básica de antenas a serem empregadas nesse estudo como também é apresentado a antenas dipolo e a antena de loop de quadro que são, respectivamente, bases para o desenvolvimento da antena Yagi-Uda e Biquad.

O capítulo três é destinado ao detalhamento das especificações de projeto das antenas a serem fabricadas, assim como o projeto propriamente dito das antenas.

O capítulo quatro é visto uma análise sobre os projetos por meio das simulações e posteriormente feita otimizações visando o melhor desempenho das antenas.

O capítulo cinco trata do detalhamento da montagem dos protótipos das antenas e procedimentos práticos para obtenção dos resultados.

O capítulo seis expõe considerações finais e propostas para trabalhos futuros.

1 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONCEITOS BÁSICOS

Antes de iniciar qualquer discussão sobre os tipos de antenas e suas análises, é necessário explicar os parâmetros fundamentais de cada antena como também os conceitos básicos das ondas eletromagnéticas.

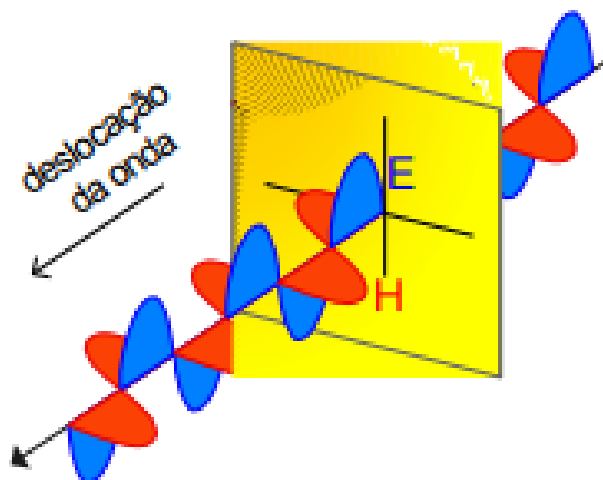
2.1.1 Ondas eletromagnéticas

Para entender os princípios básicos que estão envolvidos no processo de funcionamento de uma antena é necessário fazer uma análise sobre o mecanismo da radiação e geração de ondas eletromagnéticas. Diante disso, é válido explicar o funcionamento de como uma carga acelerada pode gerar radiação e conseqüentemente ondas guiadas.

A influência de uma corrente ou tensão variante no tempo sob um condutor resulta na aceleração de elétrons livres desse, assim, são impulsionados a mover-se pelos espaços existente entre os átomos. Os elétrons se movem para frente e para trás na mesma frequência da tensão ou corrente alternada aplicada ao condutor. A radiação é gerada a partir da aceleração ou desaceleração desses elétrons (FUSCO, 2006).

Essa carga elétrica vibrante produz constantemente uma perturbação no espaço. A consequência é o surgimento de campos elétricos e magnéticos que oscilam com a mesma frequência de vibração da carga: são perturbações autossustentáveis, pois o surgimento de um campo elétrico variável “E” irá gerar um campo magnético “H”, que será também variável. Dessa forma é gerada uma perturbação eletromagnética que se propaga através do espaço, constituída pelos dois campos em recíprocas induções, mostrada na Figura 1. A propagação dessas perturbações não necessita de um meio material já que os campos magnéticos e elétricos podem se propagar no vácuo, mas também pode ocorrer no meio material, em fio de cobre ou na água, por exemplo.

Figura 1 - Propagação da onda eletromagnética.



Fonte:(OLIVEIRA et al., 2004).

De forma geral, quando houver cargas elétricas aceleradas, haverá a produção de ondas eletromagnéticas. Para exemplificar, aplicando isso na transmissão de dados, pode ser feito com a ajuda de uma antena em forma de dois fios retos, conectados a um gerador elétrico partindo do princípio que uma das maneiras de produzir ondas eletromagnéticas é fazer com que os elétrons que estão em um fio condutor oscilem, por meio de corrente ou tensão alternada.

As ondas eletromagnéticas são oscilações de campos elétricos e magnéticos, que transportam energia e informação de um lugar para outro, ou seja, é a transmissora de interações à distância, com a velocidade da luz.

Pode-se resumir as características das ondas eletromagnéticas nas seguintes:

- a) São formadas por campos elétricos e campos magnéticos variáveis;
- b) O campo elétrico é perpendicular ao campo magnético na maioria dos casos;
- c) São ondas transversais (os campos são perpendiculares à direção de propagação);
- d) Propagam-se no vácuo com a velocidade aproximadamente de $3 \times 10^8 \text{ m/s}$;
- e) Podem propagar-se num meio material com velocidade menor que a obtida no vácuo.

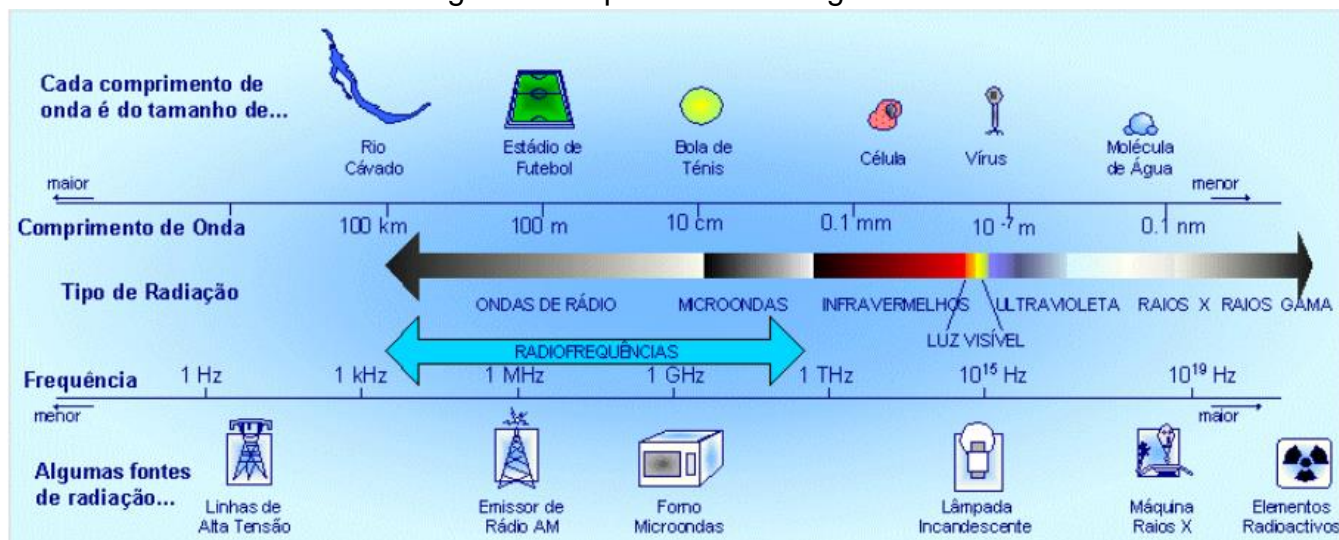
Dependendo da aplicação, as ondas eletromagnéticas assumem diferentes propriedades, podendo variar seu comprimento de onda (λ), frequência (F), amplitude, direção, velocidade de propagação e polarização (SHIMIZU, [20--]).

Como se pode ver na Figura 2, o espectro eletromagnético apresenta uma classificação para cada intervalo de frequência, o que também determina sua aplicação. A frequência representa o número de ciclos da onda num ponto do espaço em cada segundo, medindo-se em Hertz [Hz], em homenagem a Heinrich Hertz. Por se tratar de uma onda variante no tempo, a distância percorrida por essa onda, no espaço, durante um ciclo designa-se por comprimento de onda, medindo-se em metros [m]. O comprimento de onda λ e a frequência f estão interligados entre si, através da velocidade de propagação no meio, demonstrado na fórmula: $\lambda * f = v$, em que v é a velocidade de propagação no meio (OLIVEIRA et al., 2004).

Já a amplitude se refere às medições das intensidades que o campo elétrico e magnético atinge, medindo, respectivamente, volts por metro [V/m] e ampere por metro [A/m], e sua densidade de potência medida em watt por metro quadrado [W/m²]. Durante a propagação das ondas eletromagnéticas essa amplitude pode ser alterada devido a obstáculos que interferem gerando fenômenos de reflexão ou difração, contudo a frequência permanece a mesma.

Um outro conceito importante é o de polarização de uma onda eletromagnética, que se refere a orientação do campo elétrico, dessa onda, em relação ao solo. O campo magnético, normalmente, é perpendicular ao campo elétrico e os dois são perpendiculares à direção da propagação e a polarização vertical ou horizontal dependerá do sentido do campo elétrico. Por exemplo, quando uma antena dipolo é colocada na vertical ela irradia o campo elétrico nesse mesmo sentido, dessa forma dizemos que a antena está polarizada verticalmente, o mesmo se aplica quando colocada na horizontal, a antena é polarizada horizontalmente. Outros tipos de polarização existem como é o caso da polarização circular e elíptica, muito usadas em transmissões via satélite e antenas helicoidais (ONDAS... [20--]).

Figura 2 - Espectro eletromagnético.



Fonte: (OLIVEIRA et al., 2004).

2.2 INTRODUÇÃO AS ANTENAS

Desde dos tempos antigos, o ser humano procurou maneiras de se comunicar com outras pessoas a longas distâncias. Inicialmente, utilizaram-se métodos audíveis, como tambores e cornetas. Depois, utilizaram-se métodos visuais, como bandeiras e sinais de fumaça. No entanto, foi apenas com a descoberta das ondas eletromagnéticas, e posteriormente a invenção das antenas, que essas comunicações a longa distância se tornaram viáveis.

Tanto Maxwell como Faraday previam a existência de ondas eletromagnéticas que se propagam pelo espaço. Heinrich Hertz confirmou essas previsões com suas experiências em 1887, para o qual ele teve que desenvolver algumas das primeiras antenas de dipolo e de espira.

Dessa forma, se iniciou uma história que continua a evoluir até hoje. Desde Hertz e Marconi, os sistemas de comunicação sem fio e, portanto, as antenas, tornaram-se indispensáveis na nossa vida moderna. Eles estão em toda parte: em nossas casas e trabalhos, em nossos carros e aviões, em satélites, navios e naves espaciais. Elas até nos acompanham, em nossos celulares.

O Padrão de Definições IEEE (IEEE Std 145-1993) define uma antena como "um meio para irradiar ou receber ondas de rádio". Em outras palavras, a antena é uma estrutura de transição entre o espaço livre e um dispositivo guiado. Outra definição mais geral diz que é um dispositivo cuja função é emitir ou receber energia

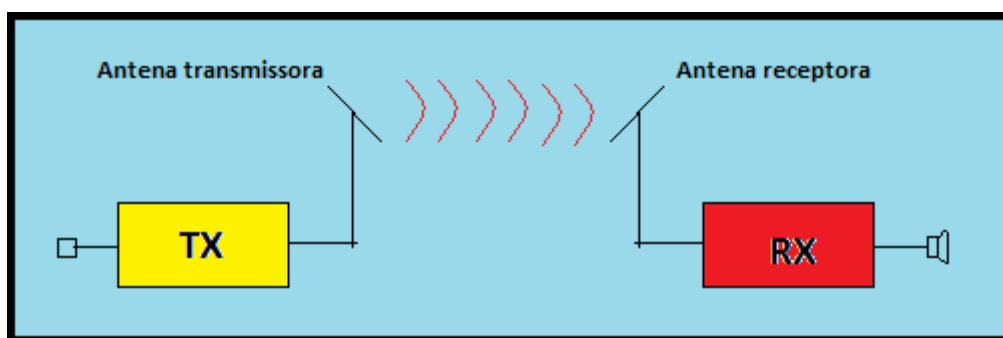
irradiada sob a forma de ondas eletromagnéticas. Em comunicações bidirecionais, a mesma antena é normalmente utilizada para transmissão e recepção. A linha de transmissão pode assumir a forma de uma linha coaxial ou uma guia de ondas, e é usado para transportar energia eletromagnética a partir de uma fonte transmissora para a antena, ou da antena para o receptor.

Uma antena funciona da seguinte maneira: o transmissor produz o sinal da informação na forma de corrente alternada (corrente de radiofrequência). Ao circular na antena de transmissão, a corrente de RF produz uma onda eletromagnética a seu redor, que se irradia pelo ar. Ao atingir uma antena receptora, a onda eletromagnética induz nela uma pequena corrente elétrica, cujas oscilações acompanham o movimento da onda. Essa corrente é muito mais fraca do que a presente na antena transmissora, sendo amplificada no receptor (CARVALHO; BADINHAN, 2011).

As antenas podem assumir diferentes formatos dependendo da sua aplicação. Por exemplo, a radiodifusão é um segmento que busca a cobertura de todas direções(omnidirecional), dessa maneira, se utiliza antenas omnidirecionais como os dipolos e monopolo. No entanto, em um enlace ponto a ponto, como uma comunicação telefônica a longa distâncias, necessita-se de uma antena diretiva, como as Yagi-Udas ou Parabólicas, que ao contrário de uma omnidirecional, irradia ondas eletromagnéticas com maior intensidade em uma direção, oferecem maior ganho, mas podem cobrir apenas uma pequena área para onde são apontadas, em ângulos pequenos.

A estrutura básica de uma comunicação sem fio é apresentada na Figura 3. TX representa o transmissor responsável por enviar o sinal para antena transmissora que convertera o sinal em ondas eletromagnéticas que se propagam pelo ar até atingir uma antena receptora. Por sua vez, essa antena converterá essas ondas em eletricidade que posteriormente é decodificada pelo o receptor, RX.

Figura 3 - Estrutura básica de uma comunicação sem fio.



Fonte: Autoria própria (2017).

2.2.1 Tipos de antenas

Alguns dos principais tipos de antenas estão listados abaixo, usando a classificação fornecida por Balanis (2005) em seu livro *Antenna Theory: Analysis and Design*.

Antenas de fio ou filamentosas: elas são construídas com fios condutores e podem assumir várias formas, como fio reto (Dipolo), um loop ou uma helicoidal. Apesar de serem as primeiras antenas, elas continuam sendo um dos tipos mais versáteis e usados.

Antenas de Abertura: essas antenas irradiam ondas por uma boca ou fenda, podendo assumir geometrias diferentes. As antenas de abertura mais comuns são as antenas corneta e antenas parabólicas. Uma aplicação comum de uma antena corneta é na terminação de um guia de onda para direcionar a propagação de ondas sonoras. Usualmente trabalham na banda de micro-ondas (0,3 a 30 GHz).

Antenas com Refletores: necessidade de se comunicar em grandes distâncias levou engenheiros e cientistas a utilizar refletores para aumentar direcionalidade e a distância máxima da radiação transmitida. Refletores "amplificam" a radiação emitida por um alimentador primário. O Refletor Parabólico é o exemplo mais conhecido deste tipo de antenas.

Antenas de Patch (microstrip): tecnologia do circuito impresso usa linhas de transmissão microfita. Na década de 1970, descobriu-se que essas linhas de microfita poderiam ser usadas como antenas. As antenas de patch são compostas por um patch de metal dispostos sobre um substrato dielétrico posicionado acima de um plano de metal. O patch pode assumir uma variedade de formas, mas as mais comuns são retangulares e circulares. Seu baixo perfil, sua fabricação simples e econômica, bem como sua versatilidade, o torna ideal para aplicações como telefones celulares.

Conjunto de Antenas. Certas aplicações requerem características de radiação que não pode ser alcançado com um único elemento. No entanto, com a combinação de vários elementos radiadores, é possível obter uma flexibilidade para obter a radiação desejada. O conjunto de antenas é analisado como uma única unidade; seus campos irradiados são a soma dos campos irradiados por cada um dos seus elementos.

2.3 PARÂMETROS FUNDAMENTAIS DAS ANTENAS

Simular e fabricar uma antena se faz necessário possuir um conhecimento mínimo sobre os efeitos e parâmetros que a constitui. Essa parte do documento, tem como objetivo tratar as propriedades básicas inerentes a todas as antenas que servirão como base para verificação dos resultados e discussões. Importante ressaltar que os parâmetros descritos serão apenas aqueles importantes na análise da antena e no software de simulação. Termos que estiverem entre aspas foram retirados da


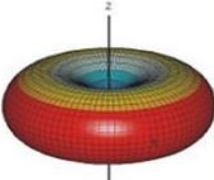
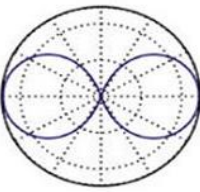

Norma IEEE, Definições Padronizadas de Termos para Antenas (IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas-145-1993). Em grande parte, as descrições dos parâmetros são baseadas no livro escrito por Balanis (2005).

Em virtude do princípio da reciprocidade, pode-se mostrar que as propriedades (impedância, ganho, etc.) de qualquer antena são iguais tanto na emissão como na recepção. Dessa forma, para um melhor entendimento, nas análises sobre antenas, o ponto de vista adotado é a partir da transmissora.

2.3.1 Diagrama e padrões de radiação

O diagrama de radiação é definido como “a função matemática ou a representação gráfica das propriedades de radiação da antena em função das coordenadas espaciais”. Apesar da irradiação ser tridimensional é frequentemente apresentado em planos horizontais e verticais. É de grande importância, pois o diagrama inclui informações acerca da propriedade da radiação: densidade de potência, intensidade da radiação, intensidade de campo, diretividade, fase ou polarização, se tornando fundamental nas análises diante simulações e resultados. Na Figura 4 é apresentado vários tipos de diagrama de radiação gerados por uma antena dipolo de meia onda.

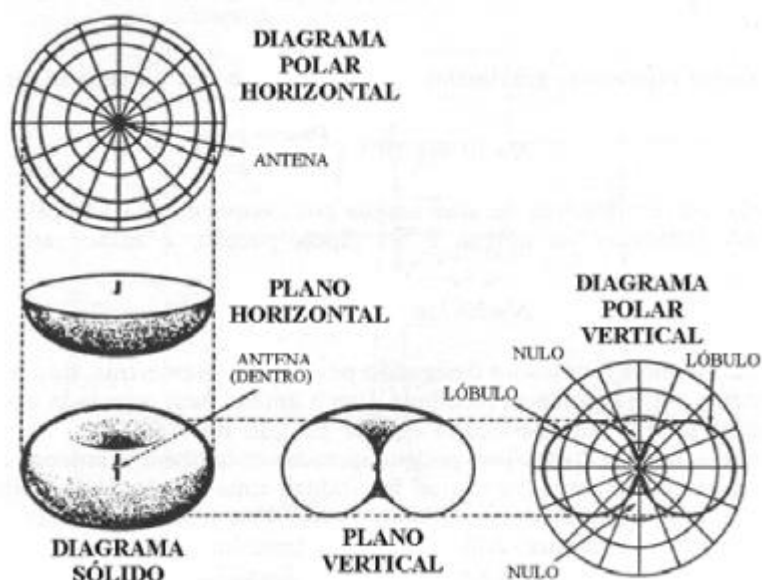
Figura 4 - Diagramas de radiação.

Tipo de Antena	Diagrama Tridimensional	Diagrama Vertical ou de Elevação	Diagrama Horizontal ou de Azimute
			
Dipolo de Meia Onda	G = 2,15 dBi G = 0 dBd	Plano Elétrico	Plano Magnético

Fonte: Fartaria (2015).

O diagrama vertical e horizontal representa uma fatia do plano tridimensional como mostra a Figura 5. Usualmente essas representações adere a escala logarítmica, chamada de decibéis, isso possibilita a acentuação de valores muito pequenos como também de valores grandes.

Figura 5 - Diagrama de radiação de um dipolo de meia onda.



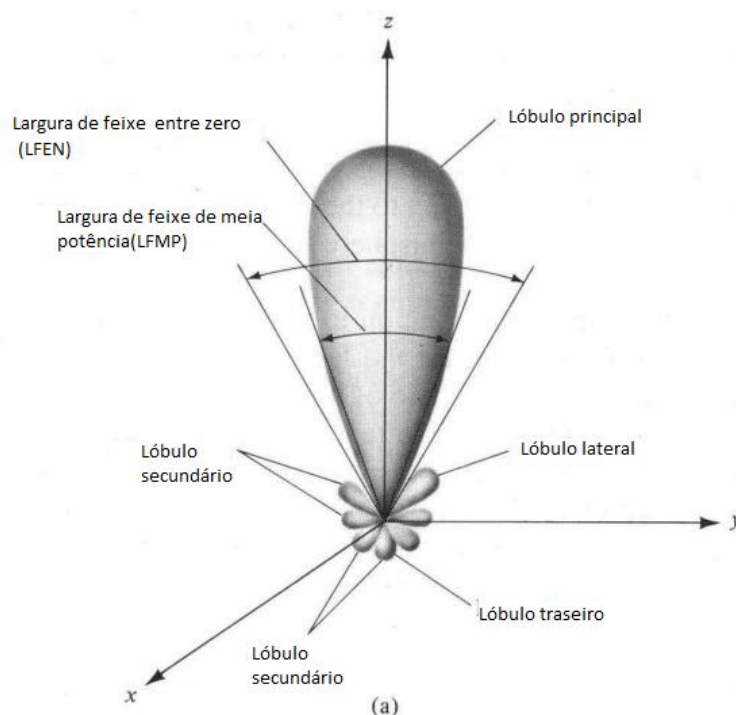
Fonte: Hoffmann e Gómez (2006).

Geralmente uma antena se encaixa em três padrões típicos de radiação. Uma antena isotrópica é aquela que não constitui nenhum tipo de perda em sua radiação,

irradia potência em todas direções, se trata de um caso ideal, sendo impossível de reproduzir, no entanto, é usada como base para expressar a diretividade de outras antenas. Uma antena direcional, observada na Figura 6, tem a capacidade de irradiar ou receber ondas eletromagnéticas de forma mais eficiente em direções específicas. A Figura 4 e 5 corresponde a uma antena omnidirecional, ela é caracterizada por irradiar igualmente somente em um plano.

Em um padrão de radiação direcional, como os mostrados na Figura 6, a zona em que a radiação é máxima é denominada feixe principal ou o lóbulo principal. As zonas de menor amplitude que rodeiam esse lóbulo máximo, são chamadas de lóbulos laterais. Algumas antenas também têm lóbulos de menores amplitude a 180° do lóbulo principal, estes são lóbulos traseiros. Os lóbulos laterais e traseiros representam a radiação em direções indesejadas e devem ser reduzidos o máximo possível. A relação entre a potência do feixe principal e os lóbulos traseiros é chamada relação frente-costa (em inglês, Front-to-Back Ratio).

Figura 6 - Diagrama de radiação de uma antena direcional.



Fonte: Balanis(2005).

2.3.2 Ganho e diretividade

O ganho e a diretividade são parâmetros muito importantes para determinar a aplicação de uma antena, em casos que é verificado uma grande distância entre duas

antenas é viável a escolha de uma alta diretividade, pois a potência será concentrada apenas em uma direção.

A diretividade pode ser definida como a razão entre a intensidade de radiação em uma dada direção e a intensidade de radiação gerada em uma antena isotrópica, supondo que as duas irradiam a mesma quantidade de potência. Quanto maior o valor de D , maior diretividade terá. No caso da antena isotrópica; $D = 1$.

$$D = \frac{E_{Ant}}{E_{iso}} \quad (1)$$

Onde:

E_{Ant} Radiação da antena a ser comparada

E_{iso} Radiação da antena isotrópica

A diretividade pode ser expressa nos diagramas de irradiação, como mostra a Figura 6, podendo variar de acordo com a aplicação. A Yagi-Uda por exemplo, é uma antena diretiva, comumente usada na recepção de sinal de TV ou telefônico.

O uso do termo ganho diretivo foi substituído por diretividade perante a atualização de 1983 e continuação da Norma IEEE Definições Padronizadas de Termos para Antenas. Dessa forma, a diretividade é equivalente ao ganho diretivo máximo de uma antena.

Além do ganho diretivo existe também o ganho de potência. Ele é geralmente expresso em dBi (com relação a antena isotrópica) ou dBd (com relação a antena dipolo), sendo relacionados por meio da fórmula:

$$dBi = dBd + 2,15$$

O ganho de potência está diretamente ligado a diretividade, entretanto, também leva em consideração a eficiência como também as propriedades direcionais da antena. Uma determinada antena ineficiente demandará mais potência de entrada para atingir a mesma densidade de potência em comparação a antena teórica.

Relação que pode ser explicada pela seguinte equação:

$$G = e \times D \quad (2)$$

Onde:

G = Ganho

e= Eficiência

D= Diretividade

Em uma análise simples e direta, podemos dizer que a eficiência de uma antena é dada pela relação entre a potência irradiada e a potência gerada pelo transmissor que chega a antena pela linha de alimentação. Em outras palavras, é a razão da potência média irradiada pela antena e a potência de entrada (BULGARONI, 2016).

2.3.3 Casamento de Impedância

Uma antena deve ser conectada a um transmissor e irradiar a potência máxima com um mínimo de perdas. Para que isso aconteça a antena deve ser adaptada ao transmissor para que ocorra a máxima transferência de potência, que geralmente é feita através de uma linha de transmissão, observado na Figura 7. Esta linha também influenciará na adaptação, considerando sua impedância característica, atenuação e comprimento.

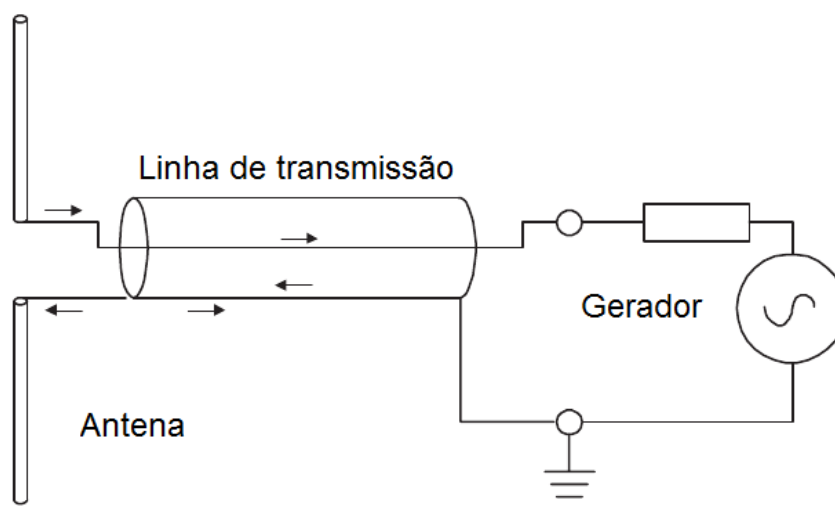
Em geral, é chamada de impedância a oposição que todos os materiais apresentam quando percorridos por um fluxo de corrente alternada, processo análogo à resistência em corrente contínua. As antenas não são exceções a esse fenômeno e geralmente têm uma impedância característica entre 50 e 75 Ω .

No entanto, ao determinar este valor, você deve levar em consideração o fator adicionado pelos conectores e a linha de transmissão. Por isso, em sistemas de comunicações, devem ser tomadas precauções especiais nas adaptações, uma vez que estas apresentam reflexões indesejadas e conseqüentemente perdas. Essas adaptações são comumente chamadas de “casamento de impedância”. A antena está perfeitamente casada quando está em ressonância com o circuito de saída de RF e ainda possui a mesma impedância deste circuito, pois, a máxima transferência de potência ocorre quando a impedância da carga e do circuito de saída são iguais. Quando uma antena e seu cabo de alimentação não estão com as impedâncias

casadas, uma parte da energia elétrica não é transferida para a antena. A energia não transferida então é refletida em forma de uma onda de volta para o transmissor.

É importante determinar a resistência da entrada da antena, pois, só assim, conseguirá determinar a impedância da linha de transmissão para que haja o “casamento”.

Figura 7- Acoplamento entre a antena e a linha de transmissão.



Fonte: Leithold (2017).

$$Z_A = R_A \pm jX_A$$

Onde: Z_A é a impedância de entrada (Ω).

R_A é a resistência de entrada (Ω).

jX_A é a reatância de entrada (Ω).

A impedância é representada pela letra Z e é composta de um número complexo cuja parte real constitui uma resistência e a parte imaginária uma reatância. Quando a antena tem a parte resistiva igual a da linha de transmissão e não existe reatância, então pode-se dizer que ocorreu a máxima transferência de potência. Entretanto, na prática, isso é impossível, portanto, sempre é gerado uma relação de onda estacionária que não são irradiadas (ROE).

2.3.4 Relação de onda estacionária (R.O.E) e perda de retorno(S11)

No momento que a antena possui uma impedância de entrada diferente da linha de transmissão então haverá um descasamento de impedância entre esses dois meios, ao alimentarmos tal conjunto com um sinal de radiofrequência, teremos uma determinada quantidade de ondas refletidas, que será maior ou menor de acordo com a diferença de impedância entre a antena e a linha de transmissão.

No decorrer da linha de transmissão, que liga o gerador a antena, em alguns pontos, a composição da onda incidente e refletida produz interferências construtivas e, em outros, interferências destrutivas. Provocando o máximo e mínimo da onda estacionária. Essa relação entre máximos e mínimos de tensão ao longo da linha é chamada de relação de onda estacionária(ROE).

Ao utilizar uma antena que tenha suas impedâncias casadas e esteja operando na sua frequência de ressonância, ela apresentará uma relação de onda estacionária mínima, mas quando alteramos a frequência do sinal logo se formará uma nova relação que culminará na mudança dessa impedância, ocorrendo assim, o descasamento de impedância da antena com a linha de transmissão, tendo como consequência o aumento da relação de ondas estacionárias (RODRIGUES, 2009).

A sigla R.O.E. (relação de onda estacionária) ou COE (coeficiente de ondas estacionárias) podem também aparecer como SWR, que vem do inglês standing wave ratio. Essa relação é definida por:

$$ROE = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{|V_0|+|V_1|}{|V_0|-|V_1|} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (3)$$

Onde Γ é o coeficiente de reflexão, V_0 é a tensão incidente e V_1 é a tensão refletida na entrada da antena.

O coeficiente de reflexão pode ser encontrado a partir da equação 3 ou por meio da impedância da linha de transmissão e entrada da antena, fórmulas definidas, respectivamente, na equação 4 e 5:

$$|\Gamma| = \frac{ROE - 1}{ROE + 1} \quad (4)$$

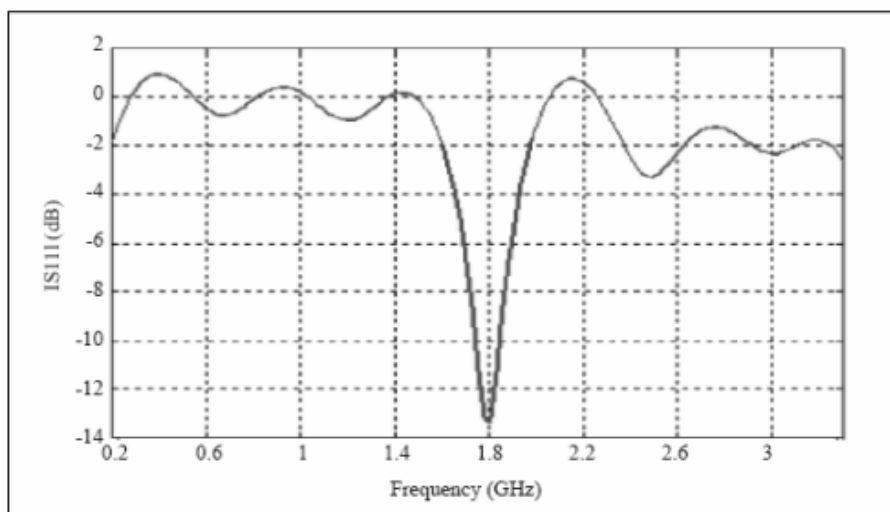
$$|\Gamma| = \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0} \quad (5)$$

A sigla Z_A representa a impedância de entrada da antena, Z_0 é a impedância da linha de transmissão.

Os equipamentos utilizados para medições do desempenho de uma antena geralmente empregam o parâmetro perda de retorno (S_{11}). Um gráfico simples da perda de retorno pode ser observado na Figura 8, esse parâmetro relaciona a fórmula de coeficiente de reflexão com a escala logarítmica em dB, então, a equação usada para definir perda de retorno é:

$$P_r(dB) = 10 \log|\Gamma|^2 = 20\log|\Gamma| \quad (6)$$

Figura 8 - Perda de retorno de uma antena.



Fonte: Ramachandran, Minz e Parupalli (2006).

2.3.5 Polarização da antena

A polarização de uma antena refere-se apenas à orientação da onda eletromagnética irradiado por ela. Uma antena pode ser polarizada de forma linear (geralmente horizontal ou vertical), elíptica ou circular. Se uma antena irradia uma onda eletromagnética polarizada verticalmente, a antena é definida como polarizada verticalmente; se o uma antena irradia uma onda eletromagnética polarizada horizontalmente, diz que a antena é polarizada horizontalmente; se o campo elétrico

irradiado em um padrão elíptico, é polarizado elipticamente; e se o campo elétrico gira em um padrão circular, é polarizado circularmente.

2.3.6 Largura de banda

A definição de largura de banda é muito ampla. De acordo com "Definições Padrão IEEE de Termos para Antenas "(1993), é" o intervalo de frequências dentro das quais o desempenho da antena, com respeito a alguma característica, atende a um padrão especificado ". Além da impedância, existem muitos outros parâmetros da antena que podem ser usados para caracterizar a largura de banda, como padrão de radiação, eficiência, polarização ou largura do feixe. Tudo depende das necessidades da aplicação para o qual a antena foi construída, por exemplo, ao se tratar de uma antena para televisão aquela que tem uma largura de banda maior conseguirá abranger mais canais.

Normalmente, a largura de banda pode ser definida de acordo com o coeficiente de onda estacionária. Por exemplo, é dito que uma antena opera entre a frequência 600 -100 MHz com uma ROE < 2. Esta afirmação implica que, na faixa das frequências mencionadas, até 11,1% da potência transmitida para a antena será refletida. Em outras frequências, a potência refletida poderá ser ainda maior, tornando essa conexão inviável.

2.4 ANTENAS FILAMENTARES

As antenas filamentosas ou antenas de fio são as mais antigas, por serem feitas de um material de fácil manuseio e pequenas dimensões, apresentam uma grande quantidade de aplicações. Dentre elas, o dipolo é a antena mais antiga, sendo sua invenção atribuída a Heinrich Hertz. Possuindo uma grande extensão de estudos e projetos, ela é usada como base para outras antenas e referências teóricas. Essa classe de antena tem características que possibilitam versatilidade para inúmeras funções, decorrente da fácil construção aliada a baixos custos. Seus filamentos podem ser dispostos de modo a produzir certas propriedades de radiação. As suas características principais são ganho baixo ou moderado, impedância de entrada real e largura de banda estreita. As antenas de fios são classificadas de acordo com seu comprimento e formato, a mais simples e popular é antena dipolo de meia onda,

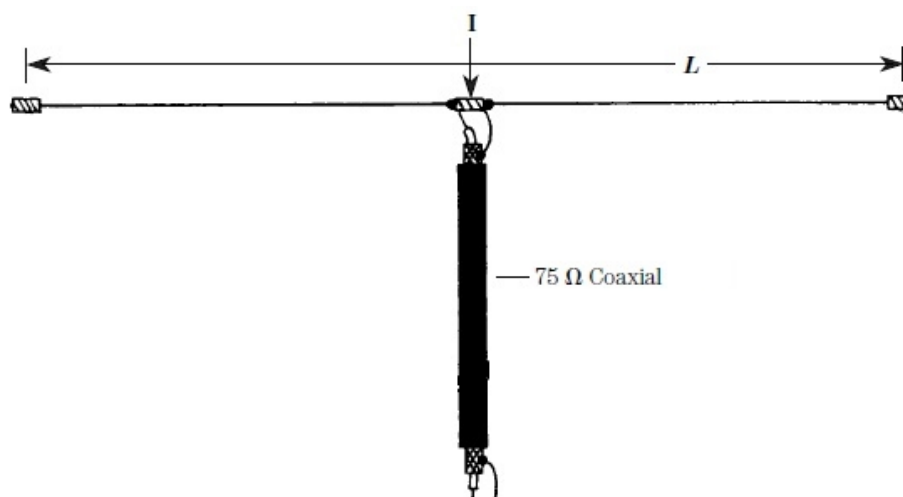
contudo, as antenas de loop também se destacam por possuir um tamanho compacto e uma moderada diretividade.

2.4.1 Dipolo de meia-onda

O dipolo de meio comprimento de onda é uma antena muito popular, isso ocorre devido sua facilidade de construção e a sua impedância de entrada que é de 73Ω , valor próximo dos 50Ω e 75Ω usados nas linhas de transmissões. Dessa forma facilitando o casamento de impedância.

A Figura 9 mostra a união de dois elementos metálicos que formam um dipolo com a alimentação feita por uma linha de transmissão localizada no centro, nesse caso a linha de transmissão usada foi cabo coaxial.

Figura 9 - Antena dipolo de meia-onda.



Fonte: Autoria própria (2017).

O nome dessa antena se deve ao fato que o comprimento total dela (L) é metade do comprimento de onda:

$$L = \frac{\lambda}{2} \quad (7)$$

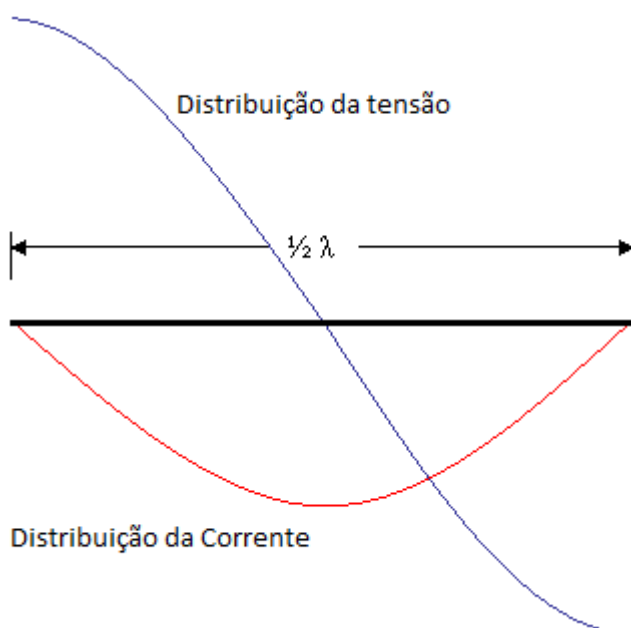
A relação entre o comprimento de onda e uma frequência é dada por:

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{F} \quad (8)$$

O comprimento de onda (λ) é dado em metros e F, a frequência em hertz. A constante 3×10^8 é um valor aproximado da velocidade da luz. Na prática, a antena dipolo real de $\lambda/2$ costuma ser cortada 5% mais curta do que o valor teórico para que se compense os efeitos das bordas (capacitivos) em suas pontas (SERRES, 2012).

A Figura 10 mostra como se dar a distribuição da corrente e tensão ao longo da antena, no ponto central a corrente é máxima e a tensão é mínima, isso faz um ponto conveniente para alimentar a antena, pois apresenta baixa impedância. Isso torna sua alimentação mais fácil, pois altas tensões de RF podem apresentar muitos problemas para os equipamentos que fornecem essa energia.

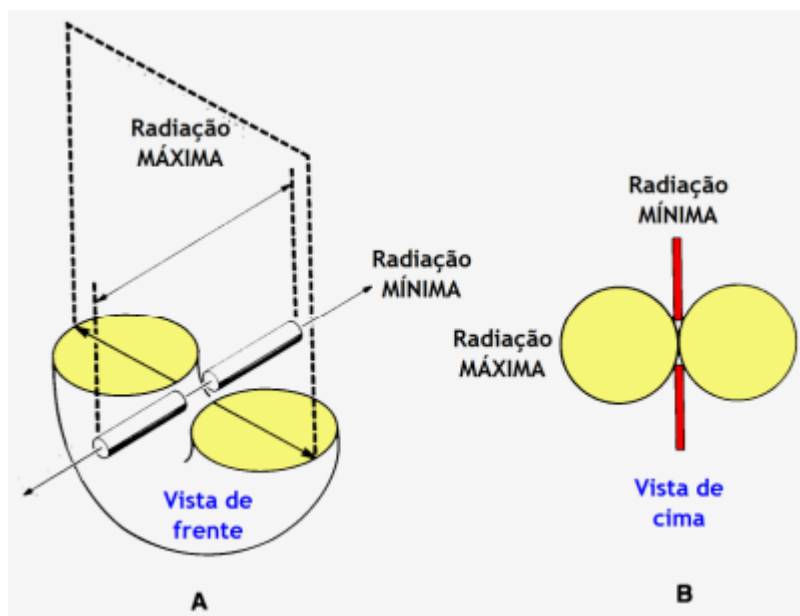
Figura 10 - Distribuição da corrente e tensão no dipolo.



Fonte: Autoria própria (2017).

A partir da movimentação das cargas elétricas ao longo da antena e numa sequência de tempo são formadas as ondas eletromagnéticas. Simultaneamente, o campo magnético H dá origem à linha de campo elétrico E, conforme foi explicado na seção 2.3.1, é formado um padrão de radiação que pode ser observado na Figura 11.

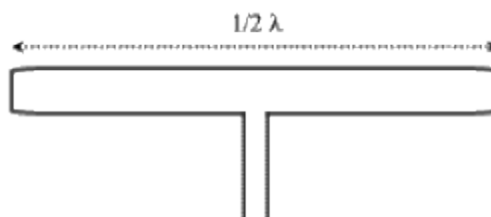
Figura 11 - Padrão de radiação antena dipolo $\lambda/2$.



Fonte: Azevedo (2011).

A radiação máxima ocorre nos lados da antena e a radiação mínima ocorre na direção das pontas. Se está na horizontal, o padrão será bidirecional, isto é, o dipolo tem igual sensibilidade tanto com pontos nulos nas extremidades. Se o centro estiver mais alto que as extremidades, ela será chamada de “V invertida” os pontos nulos das extremidades serão mais pronunciados. Se o fio estiver na vertical obteremos um padrão de irradiação omnidirecional no plano horizontal. Por se tratar de um padrão omnidirecional essa antena é muito requisitada na recepção comunicações móveis, rádios e televisões. Comparando o padrão de irradiação de uma antena dipolo a uma antena isotrópica, o dipolo tem uma diretividade de 2,15 dBi. Existem outras variações dessa antena, um exemplo é o dipolo dobrado mostrado na Figura 12, possui uma impedância aproximadamente de 300Ω , sua vantagem é uma maior largura de banda.

Figura 12 – Dipolo dobrado.

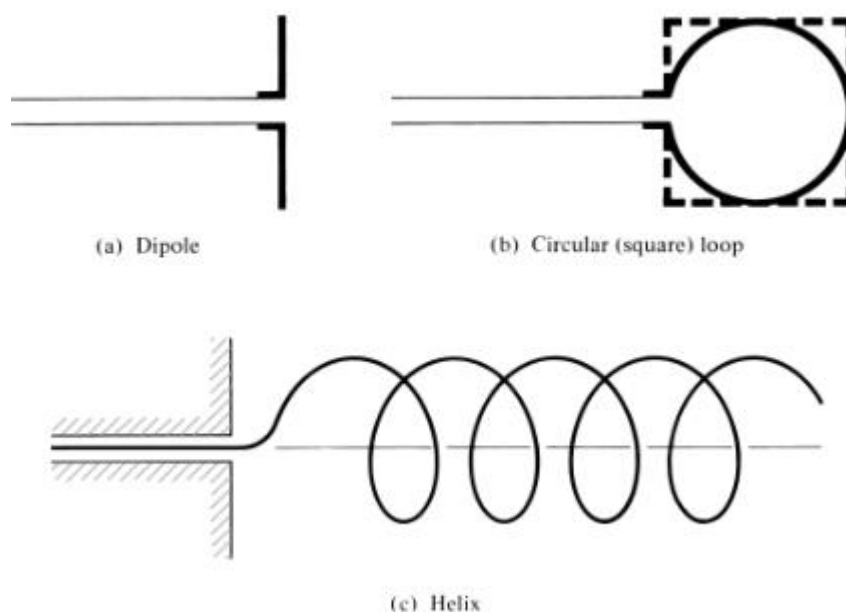


Fonte: Autoria própria (2017).

2.4.2 Loop de quadro

Loops são outro tipo de antena de fio simples e versátil. Eles assumem formas diferentes, tais como circulares, quadradas, retangulares, triangulares, elípticas e outras. Embora o dipolo seja considerado como uma configuração evoluída a partir de uma linha de transmissão aberta, o loop pode ser visto como uma configuração evoluída a partir de uma linha de transmissão fechada, como mostrado na Figura 13. Devido a sua simplicidade de análise construção, a antena loop de quadro se tornou popular.

Figura 13 - Tipos de antenas.

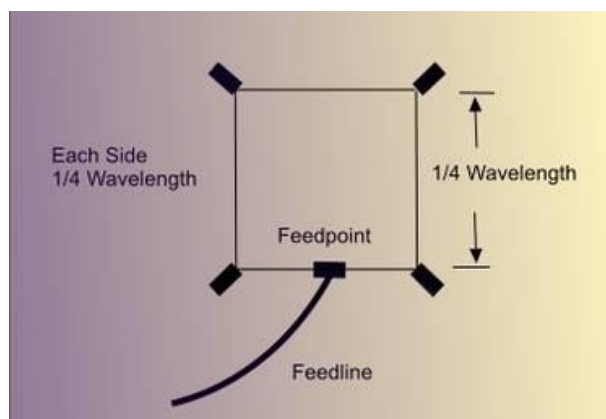


Fonte: Balanis (2005).

Antenas de quadro são classificadas em duas categorias, eletricamente pequenas e eletricamente grandes. As antenas eletricamente pequenas são aquelas cujo comprimento total (circunferência) é, em geral, menor que um décimo do comprimento de onda. Os quadros eletricamente grandes são aqueles cuja circunferência é da ordem do comprimento de onda no espaço livre. A maioria das aplicações de antenas quadro se dá nas faixas de HF (3-30 MHz), VHF (30-330 MHz) e UHF (300-3000 MHz) (BALANIS, 2005).

A antena de quadro é talvez a mais eficaz e eficientes das grandes antenas de loop, e é certamente a mais popular. A antena de quadro consiste de um circuito de fio (com o tamanho de um comprimento de onda) formando um quadrado. Ele fornece cerca de 2,3 dBi (KRAUS; MARHEFKA; KHAN, 2006). O padrão de radiação azimutal é uma figura '8', similar a um dipolo polarizado horizontalmente mostrado na Figura 14, com dois lóbulos oposto entre si (CARR, 2001).

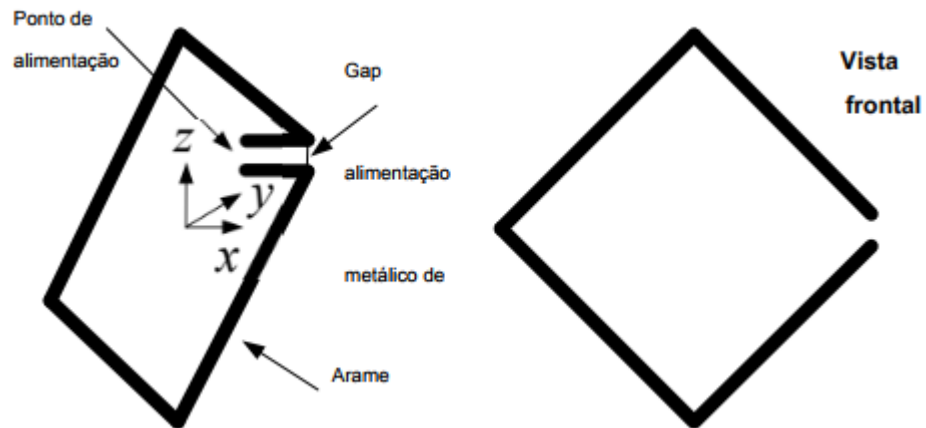
Figura 14 - Antena de quadro simples.



Fonte:(CLYMER, 2017).

O loop de quadro pode ser alimentado no meio de qualquer segmento ou nos cantos, na interseção dos segmentos, como mostra a Figura 15.

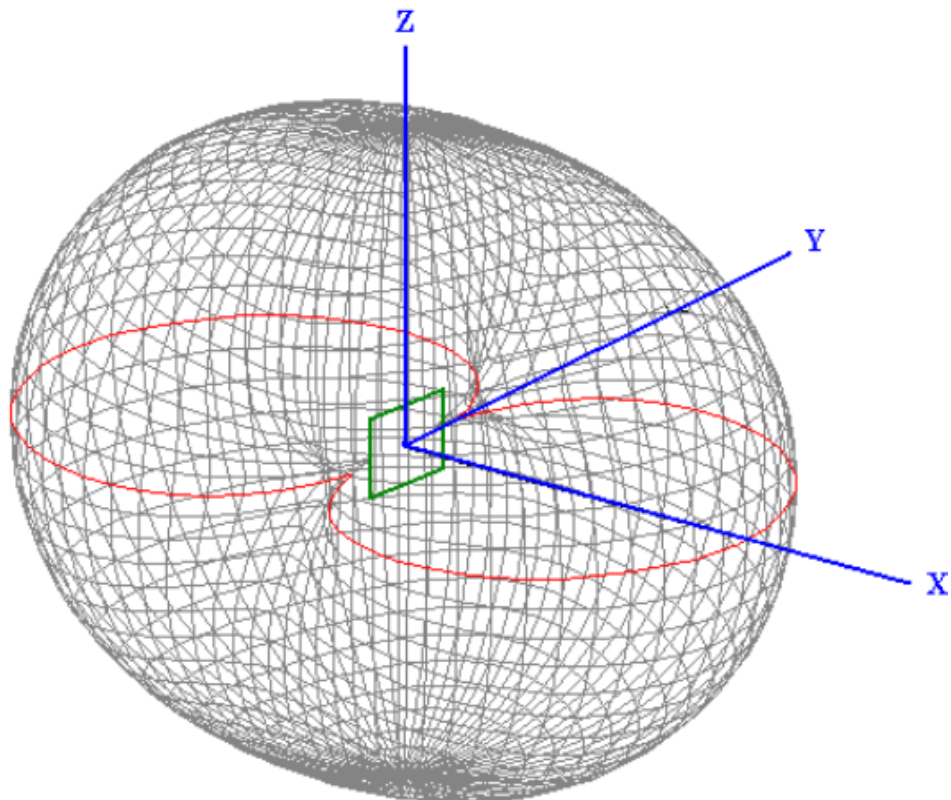
Figura 15 - Ponto da alimentação de antena de quadro.



Fonte: Wongpaibool (2009).

O padrão de radiação é mostrado na Figura 16. Este padrão é encontrado quando cada segmento mede um quarto do comprimento de onda. Note-se que é um padrão similar ao número '8' que também é gerado pela antena dipolo, neste caso, cada lóbulo é irradiado para fora do quadro, tanto na frente como atrás (CARR, 2001).

Figura 16 - Diagrama de radiação da antena de quadro.



Fonte: Antenas... (2010).

O comprimento total do fio para se fazer o loop, pode ser encontrada a partir de:

$$L = \frac{300 \times 10^6}{F} \quad (9)$$

Onde:

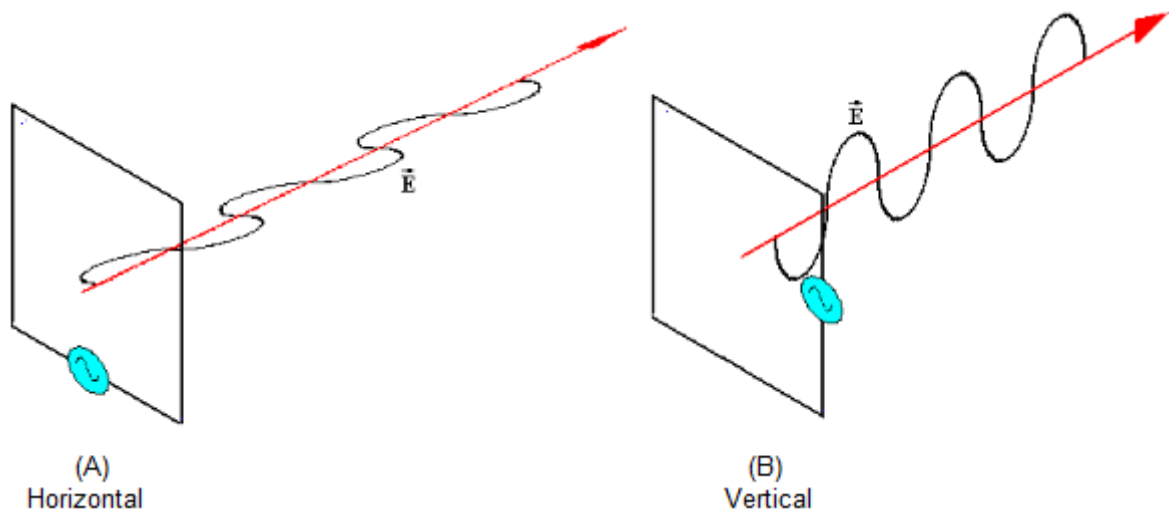
L = comprimento em metros

F = frequência de operação

300×10^6 = aproximação da velocidade da luz

A polarização da antena de quadro é observada na Figura 17.

Figura 17 - Polarização horizontal (A) e vertical (B) da antena de quadro.



Fonte: Antenas... (2010).

A impedância de entrada desta antena consiste em resistência e reatância, a impedância no espaço livre é próxima de 200Ω (KRAUS; MARHEFKA; KHAN, 2006). Assim, a antena de quadro por si só não é apropriada para ligação direta com um cabo coaxial de 50Ω ou 75Ω .

3 ANÁLISE E PROJETO

3.1 ANTENAS YAGI-UDA

3.1.1 Introdução histórica

A antena Yagi-Uda foi inventada em 1926 por Shintaro Uda da Universidade Imperial de Tohoku, Sendai, Japão, com a colaboração de Hidetsugu Yagi, também da Universidade Imperial de Tohoku (origem do nome Yagi-Uda). Por meio de uma simples estrutura de dipolo, combinada com elementos parasitas, conhecidos como refletores e diretores, construíram uma antena de alto desempenho (OLIVEIRA, 2007).

A partir da antena dipolo de meia onda é possível obter antenas que irradiam ou recebem ondas eletromagnéticas em um feixe estreito, que permite concentrar energia em um ponto determinado, conseguindo desta forma, que a concentração do campo de irradiação em um ponto seja muito maior que aquela que seria obtido com outra antena de mesma potência.

A invenção do Dr. Yagi não foi usada no Japão logo de início, uma vez que o projeto da antena não tinha o objetivo de manter comunicação entre pontos, mas para ser usada na guerra como uma arma radioativa. Yagi fez experiências em ratos, nos quais ele submeteu forte ondas de rádio concentradas graças à direcionalidade da antena. Yagi publicou a primeira referência sobre a antena na língua inglesa, em um artigo de 1928, e o associou o nome da antena ao seu nome. No entanto, ele mesmo reconheceu a contribuição de Uda para o design, acrescentando o nome do seu colega ao nome da antena, Yagi-Uda (DUARTE; ALFONSO; VELÁSQUEZ, 2015).

Foi aceito na Europa e América do Norte, onde foi incorporado a produção comercial, de sistemas de transmissão, TV e outros. O uso desta antena no Japão só começou a ser usado durante a Segunda Guerra Mundial, após descobrirem que o exército inimigo utilizava como antena radar.

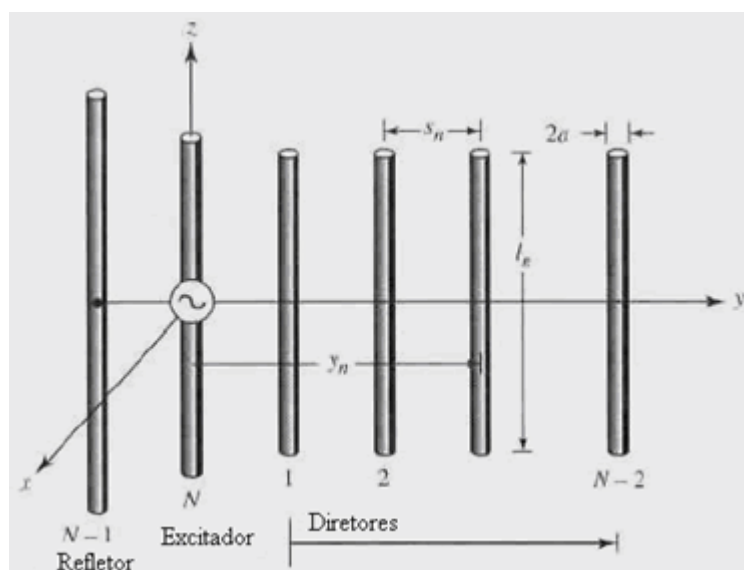
Atualmente as antenas Yagi ainda são utilizadas para recepção de radiofrequências e amplamente utilizadas para receber sinais de televisão e telefonia, operando na faixa VHF e UHF e também usadas por radioamadores. Além disso, após o surgimento da tecnologia Wireless, a antena Yagi também foi adotada como meio de se conseguir uma melhor comunicação em longas distâncias. Como por exemplo

em áreas rurais onde é necessário antenas com ganho diretivo elevado para conseguir se conectar a um ponto mais distante.

3.1.2 Análise estrutural

A estrutura da antena yagi pode ser observado na Figura 18 abaixo.

Figura 18 - Estrutura da antena Yagi-Uda.



Fonte:(BALANIS, 2005).

A estrutura pode ser dividida em elementos parasitas e excitadores: o elemento excitador pode ser chamado também de elemento ativo. Ele se conecta diretamente a linha de transmissão e recebe a energia da fonte. Os elementos parasitas, por sua vez, não se conectam à linha de transmissão e recebem a energia através de indução mútua. Esses elementos são classificados como refletores e diretores (MARTÍNEZ, 2012).

O elemento ativo pode ser formado por um simples dipolo ou um dipolo dobrado. Já os elementos parasitas são formados por diretores e refletores. De modo geral, o refletor tem a função de diminuir a intensidade do sinal que está em sua direção e incrementa na direção do dipolo, geralmente possuem o comprimento 5% maior que o excitador, já os diretores têm a função de intensificar o sinal na direção dos diretores, tendo um comprimento 5% menor que o elemento excitador (BALANIS, 2005).

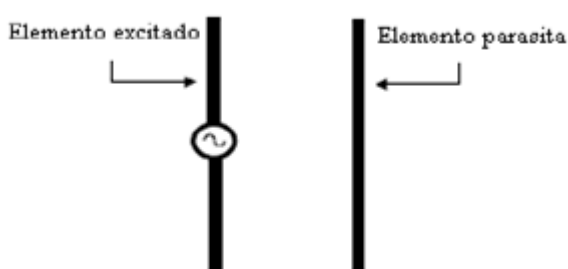
A corrente que circula no elemento alimentado irradia um campo eletromagnético, que induz correntes nos "elementos parasitas". As correntes induzidas nesses elementos também irradiam campos eletromagnéticos que, por sua vez, induzem correntes nos outros. Finalmente, a corrente que circula em cada um dos elementos é o resultado da interação entre todos os elementos. A amplitude e a fase da corrente dependem da posição e das dimensões de cada elemento. O campo eletromagnético irradiado pela antena em cada direção será a soma dos campos irradiados por cada um dos elementos. Esta soma é complicada porque a amplitude e a fase da corrente que circulam em cada elemento são diferentes.

Análogo ao processo da corrente, a impedância da antena Yagi-Uda não depende somente do elemento excitador, mas também da impedância mútua entre os elementos. Dessa forma, a impedância do dipolo de meia onda que é aproximadamente 75Ω diminui quando está em conjunto com outros elementos (OLIVEIRA, 2007).

A polarização da antena Yagi-Uda é análoga a ao processo da antena dipolo de meia, tendo em vista que se trata de um conjunto de vários elementos, todos devem estar alinhados na mesma polarização.

A estrutura mais simples da antena Yagi-Uda é formada apenas por dois elementos, representada na Figura 19.

Figura 19 - Yagi - Uda com 2 elementos.

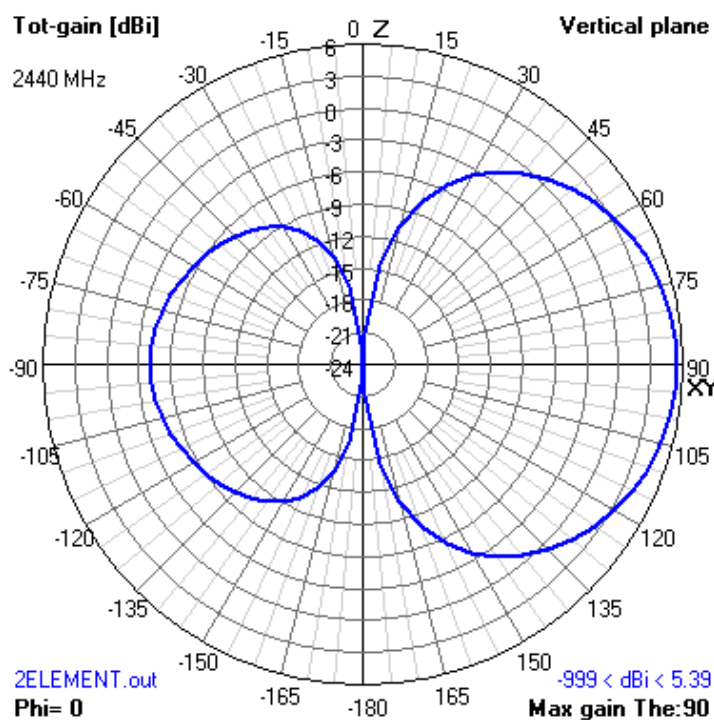


Fonte: Oliveira (2007).

Ao energizar o elemento do radiador com uma tensão, é gerada uma distribuição de corrente ao longo do condutor produzindo ondas eletromagnéticas que são irradiadas. Quando o elemento parasita é introduzido ao lado do dipolo excitado, uma distribuição de corrente é induzida neste elemento. Esta corrente é função do acoplamento mútuo entre os elementos e a intensidade do campo irradiado pelo dipolo.

Com o auxílio do software 4nec2 é possível verificar como se desdobra os principais parâmetros dessa antena. A Figura 20 representa o diagrama de radiação para um modelo com dois elementos para faixa Wi-Fi. Com um dipolo de comprimento $0,434\lambda$, refletor $0,556\lambda$ e espaçamento de $0,02\lambda$.

Figura 20 - Diagrama de radiação da Yagi-Uda com 2 elementos.



A introdução de um elemento acarreta em mudanças que afetam diretamente a forma que as ondas eletromagnéticas são irradiadas pela antena. O modelo de irradiação do dipolo de meia onda visto na Figura 12 se alterou com a presença de elemento que assume a função de um refletor ou diretor. Dessa forma, o resultado é uma antena mais diretiva, sendo possível uma maior concentração de energia em uma determinada direção. Essa relação de diretiva pode se tornar maior com o acréscimo de elementos diretores.

3.1.3 Projeto

O projeto de uma antena Yagi-Uda consiste em variar o tamanho, o número de elementos e os espaçamentos entre eles para alcançar uma determinada frequência de ressonância acompanhando os parâmetros principais como ganho, impedância e relação frente/costa.

Inicialmente essas antenas eram feitas por meio de equações simples e muitas vezes o resultado não era o esperado. Porém, estudos mais aprofundados sobre o eletromagnetismo permitiu a introdução de fórmulas matemáticas, gerando melhores resultados. Com o advento de computadores de alta velocidade muitas técnicas numéricas diferentes, baseadas em formulações analíticas, foram utilizadas para derivar as dimensões geométricas dos parâmetros da antena Yagi-Uda para um melhor desempenho.

Uma das técnicas de projeto muito popularizada foi escrita por Viezbicke(1976) para a agência do governo americano denominada National Bureau of Standards (NBS). A NBS propõe uma metodologia de projeto baseada em medidas sobre protótipos construídos para antenas Yagi-Udas e apresentando seus resultados em seu trabalho (DUARTE, 2015). Apesar de ser um trabalho datado da década de 70, ainda hoje é um valioso documento, pois permite projetar de maneira prática este tipo de antena através de uma série de gráficos e tabelas que fornecem informações necessárias para determinar os valores dos parâmetros como: comprimento dos elementos, diâmetro, separação, quantidade de elementos e efeito do suporte, e por último o ganho máximo do agrupamento.

Os gráficos incluídos só podem ser usados para projetar antenas com 1, 3, 10, 15 e 12 diretores, com diretividade correspondente a 7.1, 9.2, 10.2, 12.25, 13.4 e 14.2 dBd, respectivamente, e com uma razão diâmetro/comprimento de onda de $0.001 \leq d/\lambda \leq 0.04$.

O elemento excitado usado é o dipolo de $\lambda/2$, e as medidas realizadas na frequência de $F = 2440$ MHz. Esse valor representa a média da faixa Wi-Fi que se estende aproximadamente de 2400 a 2480 MHz. Um empecilho encontrado foi a limitação dos gráficos frente a uma frequência elevada. Isso é explicado pelo fato que na época que foi desenvolvido o projeto, as altas frequências não eram tão difundidas. Dessa forma, não foi possível um projeto dentro das normas do NBS com mais de 4 diretores. O procedimento usado para o projeto da antena está descrito no próximo tópico.

3.1.4 Procedimentos do projeto

Para o cálculo da antena e com referência no método NBS, a antena é projetada contendo 4 diretores, com um ganho total de 10.2dBd, uma linha de transmissão de 50 Ω e um tubo de 20mm de material dielétrico usado para o suporte.

A frequência central de operação da antena é 2440 MHz, valor definido com base na média da largura de banda utilizada no padrão 802.11g que se estende aproximadamente de 2400 a 2480 MHz.

Depois disso, a partir da tabela e de gráficos, se faz necessário definir algumas constantes para depois realizar um balanceamento no tamanho dos elementos. Para facilitar esses cálculos, são utilizados passos descritos em Balanis (2005), Duarte (2015) e Viezbicke (1976).

1. Especificar os parâmetros do projeto:

Nesta etapa foi determinada alguns parâmetros básicos, com base na Tabela 1. A diretividade escolhida foi 10.2 dBd ou 12,3 dBi, na qual é necessário o uso de 4 diretores. O material escolhido para constituir os elementos da antena foi o fio de cobre devido a seu baixo custo comercial como também as capacidades físicas que o fazem ser o mais utilizado na fabricação de antenas de fios.

Tabela 1 - Otimização dos comprimentos dos elementos parasitas.

$d/\lambda = 0.0085$ $s_{12} = 0.2\lambda$		LENGTH OF YAGI-UDA (IN WAVELENGTHS)					
		0.4	0.8	1.20	2.2	3.2	4.2
LENGTH OF REFLECTOR (l_1/λ)		0.482	0.482	0.482	0.482	0.482	0.475
LENGTH OF DIRECTORS, λ	l_3	0.442	0.428	0.428	0.432	0.428	0.424
	l_4		0.424	0.420	0.415	0.420	0.424
	l_5		0.428	0.420	0.407	0.407	0.420
	l_6			0.428	0.398	0.398	0.407
	l_7				0.390	0.394	0.403
	l_8				0.390	0.390	0.398
	l_9				0.390	0.386	0.394
	l_{10}				0.390	0.386	0.390
	l_{11}				0.398	0.386	0.390
	l_{12}				0.407	0.386	0.390
	l_{13}					0.386	0.390
	l_{14}					0.386	0.390
	l_{15}					0.386	0.390
	l_{16}					0.386	
	l_{17}					0.386	
SPACING BETWEEN DIRECTORS (s_{ij}/λ)		0.20	0.20	0.25	0.20	0.20	0.308
DIRECTIVITY RELATIVE TO HALF-WAVE DIPOLE (dB)		7.1	9.2	10.2	12.25	13.4	14.2
DESIGN CURVE (SEE FIGURE 10.25)		(A)	(B)	(B)	(C)	(B)	(D)

Fonte: Viezbicke (1976).

2. Selecionar diâmetro(d) dos elementos e diâmetro(D) do suporte.

O diâmetro escolhido foi 3 mm por ser um tamanho relativamente grosso, desse modo, apresentando uma maior rigidez diante de fios mais finos. O suporte escolhido foi uma canaleta, com diâmetro de 20 mm, que é o suficiente para fixar os elementos.

3. Calcular o comprimento de onda do projeto - $\lambda = c / f$.

O comprimento de onda (λ) para a frequência de 2440 MHz é aproximadamente 123 mm. A partir do comprimento são definidos o tamanho e espaçamentos dos elementos.

4. Calcular a razão d / λ . Caso não esteja entre o intervalo $0,001 \leq d / \lambda \leq 0,04$ é necessário redefinir o diâmetro dos elementos ou mudar a frequência.

$$\frac{d}{\lambda} = \frac{3 \times 10^{-3}}{2440 \times 10^6} = 0.0243$$

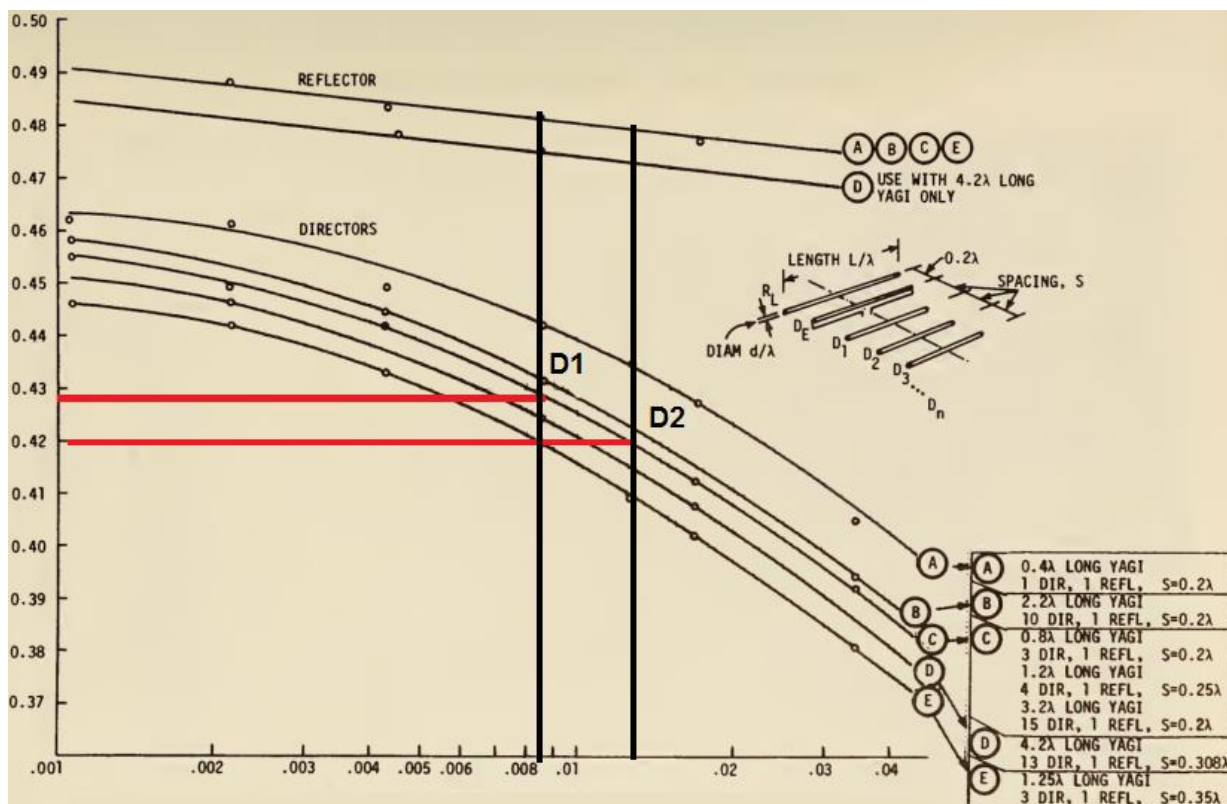
Essa relação é usada para ajustar os tamanhos dos elementos de acordo com diâmetro dos elementos.

5. Se uma barra de metal for usada como suporte (caso contrário, vá para o próximo passo), calcule D / λ . Se a relação não estiver dentro do intervalo $0,001 \leq D / \lambda \leq 0,04$ é necessário reconsiderar o tamanho do suporte.

Esse passo é desnecessário, pois nesse projeto é usado um tubo dielétrico. Contudo, no caso de um tubo metálico são necessários incrementos nos elementos para compensar os efeitos eletromagnéticos que surge no arranjo decorrente do uso desse suporte metálico.

6. Se $d/\lambda = 0,0085$, pode-se avançar diretamente para o passo 10 (sem correções dos comprimentos dos elementos). Se $d/\lambda \neq 0.0085$, os comprimentos dos elementos devem ser corrigidos. Para isso é necessário, primeiro traçar linhas ou pontos na Figura 21 que representam o comprimento original do refletor e do primeiro diretor referentes ao projeto de 4 diretores da Tabela 1 para relação $d/\lambda=0.0085$. Esses pontos foram marcados na Figura 21 com duas retas.

Figura 21 – Projeto relacionando o diâmetro dos elementos e a frequência.

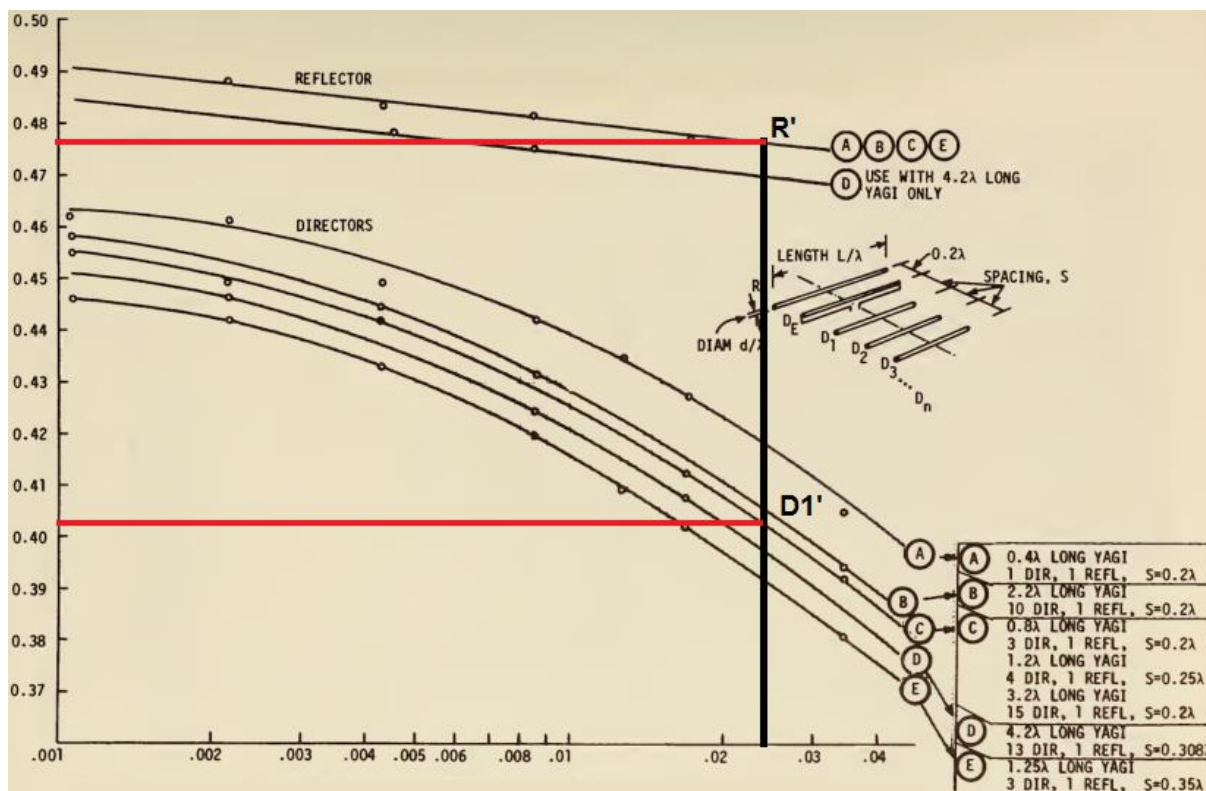


Fonte:(VIEZBICKE,1976).

Esses pontos são correspondentes ao comprimento dos diretores e refletores para a relação $d/\lambda = 0,0085$. Por exemplo, D1 representa o valor do diretor 1 com tamanho igual a $0,428\lambda$, e D2 representa o diretor 2 com tamanho igual a $0,42\lambda$. Porém, os valores da relação d/λ para o arranjo a ser projetado é diferente, então esse passo serve como base para marcação correta no próximo passo. A utilização das siglas R, D1, D2, D3, D4 se referem ao tamanho original dos diretores, já as siglas R', D1', D2', D3', D4' remete-se aos novos tamanhos dos elementos para frequência desejada.

7. Desenhar uma linha vertical do valor de d/λ que corte as linhas do refletor e diretores na Figura 21. Onde os pontos que as linhas cruzam as curvas define os comprimentos corrigidos do refletor(R') e o primeiro diretor(D1'). Para ler os valores, desenham-se linhas horizontais das interseções para o eixo esquerdo da Figura 22. O comprimento corrigido para o diretor 1 deve ser usado para qualquer outro diretor que tenha o mesmo comprimento original que ele na Tabela 1.

Figura 22 - Correção para os valores dos diretores e refletores



Fonte:(VIEZBICKE,1976)

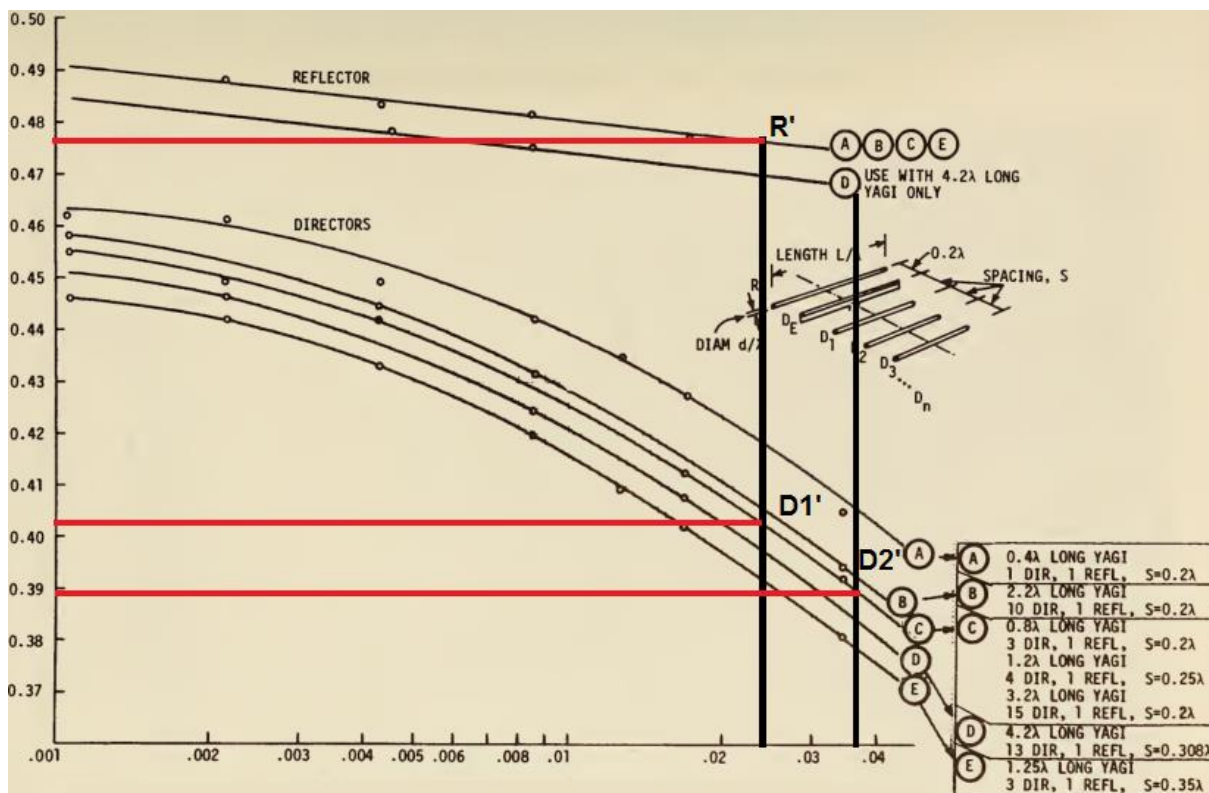
A curva C representa o arranjo de 4 diretores, desse modo, a linha vertical que a cruza no ponto $d/\lambda = 0.0243$ é responsável por definir o tamanho corrigido dos diretores.

Verificando a Tabela 1, os diretores D1 e D4 possuem os mesmos tamanhos, assim como também D2 e D3. Dessa forma, os diretores D1' e D4' com valores corrigidos possuem tamanhos iguais, o mesmo acontece com D2' e D3'. Portanto, com base na Figura 22, o refletor(R') e os diretores D1' e D4' medem, respectivamente: $0,477\lambda$ e $0,402\lambda$.

8. Medir a distância ao longo da curva (Figura 21) entre os pontos iniciais D1 e D2 determinados no Passo 6 e transpor essa mesma distância para o ponto D1' e definir a o comprimento corrigido para o restante dos diretores.

A marcação feita no passo 6 serve como base para definir o comprimento do segundo e terceiro diretor. Pois a distância entre o ponto D1 e D2 será transposta para o gráfico com os valores corrigidos. Dessa forma definindo os tamanhos dos diretores D2' e D3'.

Figura 23 - Correção do segundo refletor



Fonte: VIEZBICKE (1976)

Os valores finais dos comprimentos se ajustaram da seguinte forma: refletor com um comprimento igual a $0,477\lambda$, o diretor D1' e D4' igual a $0,402\lambda$, e o diretor D2' e D3' igual a $0,389\lambda$

10. O comprimento do elemento excitador, normalmente, ele tem um comprimento entre o do refletor e o primeiro diretor.

O dipolo de meia onda tem seu comprimento definido pela metade do comprimento de onda. Entretanto, em um arranjo, normalmente ele tem de $0,45$ a $0,49\lambda$, com um tamanho 5% menor que o refletor. Portanto, o seu comprimento será 55.737 mm, correspondente a 95% do tamanho do refletor. Os espaçamentos usados foram determinados de acordo com a Tabela 1 e a Figura 21, em que os valores finais de todos elementos ficaram definidos como:

Tabela 2 - Resultados da aplicação da norma NBS 688.

Elemento:	Comprimento:
Refletor	58.671 mm
Excitador	55.737 mm
Diretor 1	49,323 mm
Diretor 2	47,847 mm
Diretor 3	47,847 mm
Diretor 4	49,323 mm
Espaçamento entre dipolo e refletor	24,6 mm
Espaçamento entre diretores e dipolo	30,75 mm

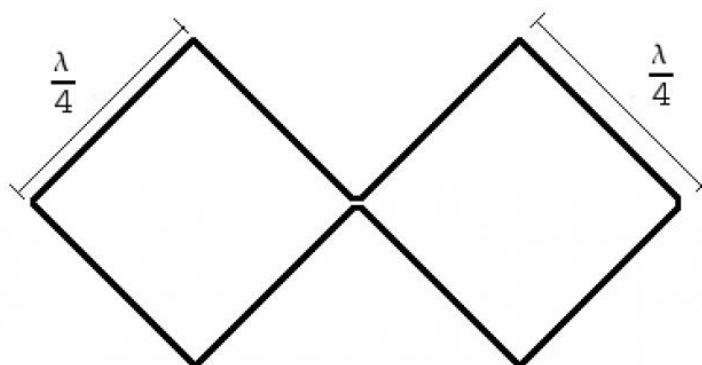
Fonte: Autoria própria (2017).

3.2 ANTENA BIQUAD

3.2.1 Introdução histórica

A combinação de duas antenas de loop de quadro alimentado na ponta tem encontrado grande interesse em fóruns de internet amadores devido ao seu design fácil. Essas antenas de fio são nomeadas Biquad.

Figura 24 - Antena Biquad.



Fonte: Autoria própria (2017).

A antena de loop de quadro é um desenvolvimento de várias invenções. Em 1951, Clarence C. Moore, W9LZX, missionária e engenheira cristã da HCJB (uma estação de rádio missionária de ondas curtas nas montanhas andinas) desenvolveu e patenteou uma antena de circuito duplo que chamou de "quad". Ela desenvolveu essa antena para combater os efeitos corona em altitudes elevadas. O problema no HCJB era que as grandes antenas Yagi estavam literalmente se destruindo, derretendo seu próprio elemento devido ao efeito corona. Moore argumentou corretamente que os elementos do circuito fechado gerariam menos tensão- e, portanto, menos corona - do que as altas impedâncias nas extremidades de um elemento dipolo de meia onda (ARRL, 2007).

As antenas de quadro simples, constituída somente de um loop com tamanho igual a um comprimento de onda, é base para diversos projetos, Balanis (2005) ressalta que a antena loop de quadro pode ser uma alternativa para antenas monopolos em sistemas de comunicações móveis. Porém, mesmo apresentando bom desempenho e menos ruídos, ela não está presente em muitas aplicações devido à alta impedância, cujo o casamento às linhas transmissão usuais se torna mais difícil. Dessa forma, ela é mais atrativa para sistemas em que seja necessária uma menor taxa de ruído e desvanecimento, como os sistemas de comunicação, por exemplo.

A junção de duas antenas de quadro simples (Biquad), mostrada na Figura 24, se tornou popular com o surgimento das redes sem fio, por ser pequena e simples. A matriz formada por duas antenas de quadro simples melhora a diretividade e a largura de banda. O funcionamento de uma Biquad é o mesmo que uma antena dipolo

dobrada, pois gera o mesmo padrão de radiação, com mais diretividade e largura de banda. Portanto, ela pode ser considerada como uma forma modificada de um dipolo dobrado.

A difusão desse modelo começou por volta do ano 2000, o artigo mais notável foi o de Marshall (2001), no qual ele utiliza uma Biquad com refletor juntamente com um prato de parabólica para aumentar sua diretividade.

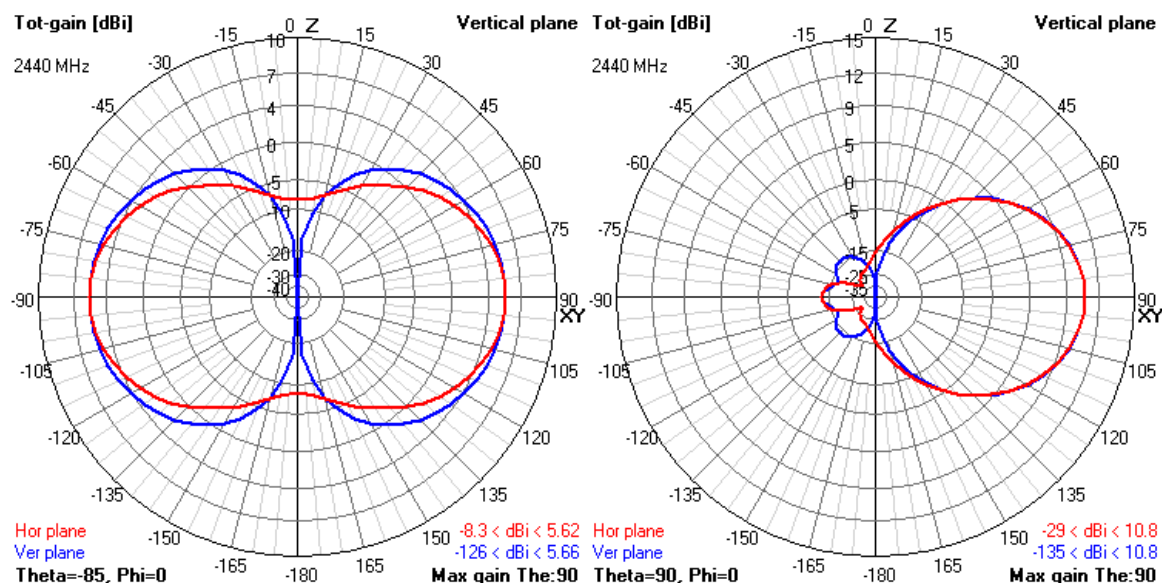
3.2.2 Análise estrutural

A antena Biquad apresenta uma estrutura simples, no qual, o comprimento de cada segmento pode ser encontrado por:

$$L = \frac{\lambda}{4} \quad (10)$$

Além dos dois loops de quadro, é possível ser acrescentado um refletor metálico para alterar o padrão de radiação e aumentar a diretividade. O refletor é colocado próximo a antena para que ele possa refletir o sinal. Os diagramas da radiação mostrados na Figura 25 representam, respectivamente, como se dar a propagação das ondas eletromagnéticas sem o refletor e com o refletor.

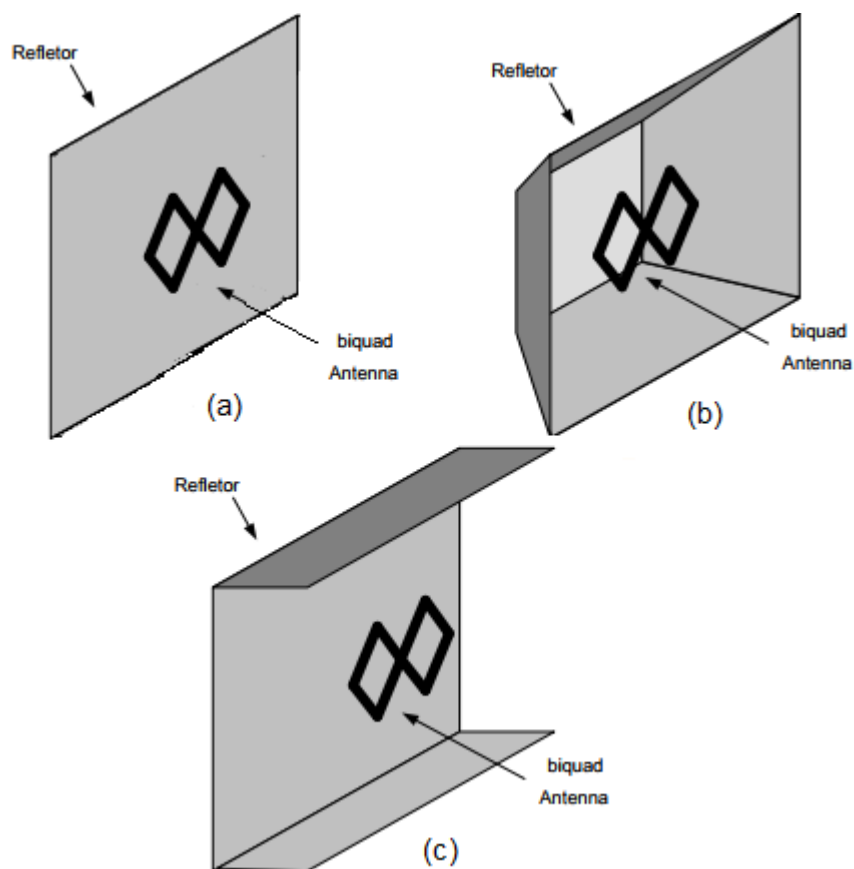
Figura 25 - Diagrama de radiação de uma antena Biquad.



Fonte: Autoria própria (2017).

Portanto, sem o refletor a antena Biquad apresenta uma diretividade ligeiramente maior que 5dBi, ela aumenta para 10-11dBi após a introdução do refletor. Esse ganho é semelhante à de uma antena Yagi-Uda com 4 diretores. A distância entre o refletor metálico e antena geralmente é $1/8$ do comprimento onda. Contudo, esse valor pode ser mudado visando melhorar o desempenho. Outro fator usado para aumentar a diretividade é a forma geométrica do refletor, a Figura 26 mostra diferentes tipos de refletores. Além do refletor, pode-se usar um prato de parabólica para aplicações que necessite um maior ganho, é possível também fazer uma double-Biquad, isto é, uma matriz constituída de 4 loops de quadro.

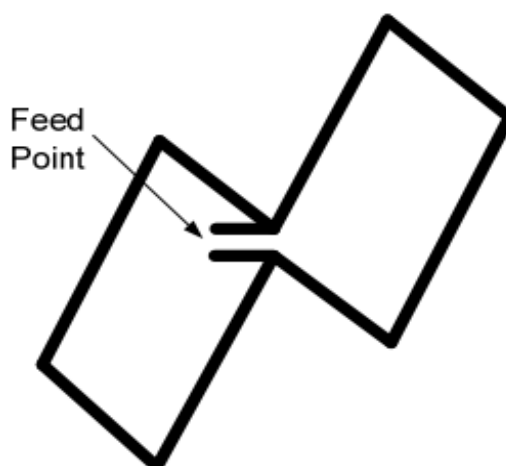
Figura 26 - Diferentes tipos de refletores.



Fonte: Wongpaibool (2009).

Além da diretividade, a relação entre o refletor e a antena Biquad influencia diretamente na impedância de entrada que pode variar de acordo com a distância entre os dois. A alimentação é feita no centro, como observado na Figura 27.

Figura 27 - Alimentação da antena Biquad.



Fonte: Wongpaibool (2009).

A impedância de uma antena de quadro é próxima dos 200Ω , contudo, quando duas antenas de quadro são postas em paralelo, acontece um efeito similar a antena Yagi-Uda, no qual a impedância total diminui.

Dessa forma, quando duas antenas de quadro são associadas em paralelo juntamente com um refletor, apresentam impedância próxima de 50Ω no ponto de alimentação. Portanto esse modelo torna-se apto a ser utilizado em uma linha de transmissão disponível comercialmente.

3.2.3 Projeto

O projeto de uma antena Biquad é relativamente fácil. O primeiro passo é escolher a frequência desejada, assim como no projeto da antena Yagi-uda, a frequência central é 2440 MHz, referente ao padrão IEEE 802.11g/n.

O comprimento de cada segmento é dado por:

$$L = \frac{\lambda}{4} \Rightarrow L = \frac{0,123}{4} = 30,75 \text{ mm}$$

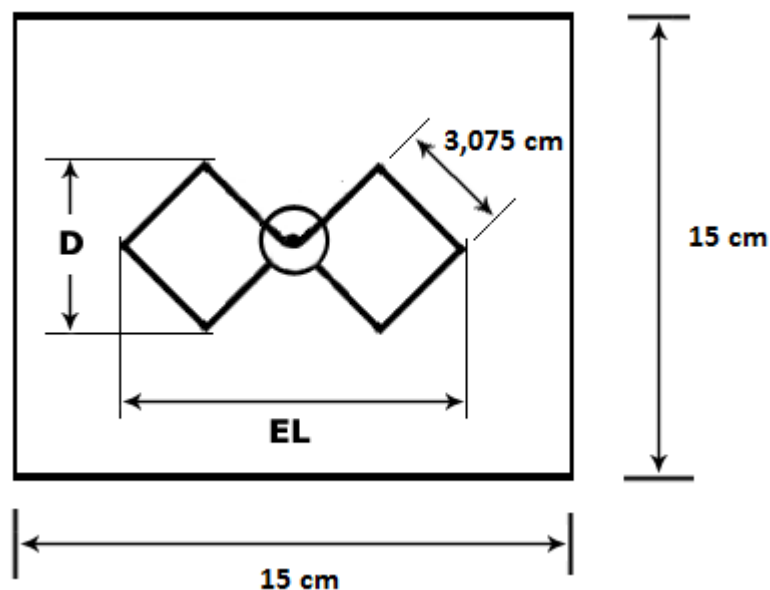
O comprimento de onda é definido a partir da equação (8), o espaçamento entre refletor e a antena é 15,375 mm definido por:

$$E = \frac{\lambda}{8} \tag{11}$$

O tamanho mínimo indicado para o tamanho do refletor é que tenha a largura e comprimento igual ou maior que o comprimento de onda. Para atender a esse tamanho, foi utilizado uma placa de fenolite com tamanho de 15 cm x 15 cm.

Por fim, o projeto a ser construído está representado na Figura 28.

Figura 28 - Projeto da antena Biquad.



Fonte: Autoria própria (2017).

As medidas de D e EL são usados como bases para auxílio na construção. Essas medidas podem ser encontradas por fórmulas de matemáticas simples. Utilizando a fórmula de Pitágoras e partindo do princípio que se trata de um quadrado perfeito, então, D é definido pela transversal desse quadrado e EL é o dobro desse valor. Os valores calculados foram $D = 4,34$ e $EL = 8,68$.

$$D^2 = 3,075^2 + 3,075^2 = D = 4,34 \text{ cm}$$

4. SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DOS PROJETOS

Os recursos de otimização computacional do software 4nec2 foram utilizados para a determinação da melhor resposta para o sistema de transmissão proposto, composto pela antena Yagi-Uda e Biquad e, posteriormente, o emprego de mais elementos diretores na primeira, com o objetivo de se obter um ganho maior. As análises preliminares foram realizadas para a obtenção de um modelo com um número reduzido de parâmetros a serem melhorados, buscando alcançar valores próximos ao valor ótimo. Estas análises tiveram como escopo identificar os parâmetros de projeto mais críticos e relevantes para a resposta da antena. Para tal, foram realizadas simulações verificando-se os parâmetros e determinando o que precisa ser melhorado.

4.1 4NEC2

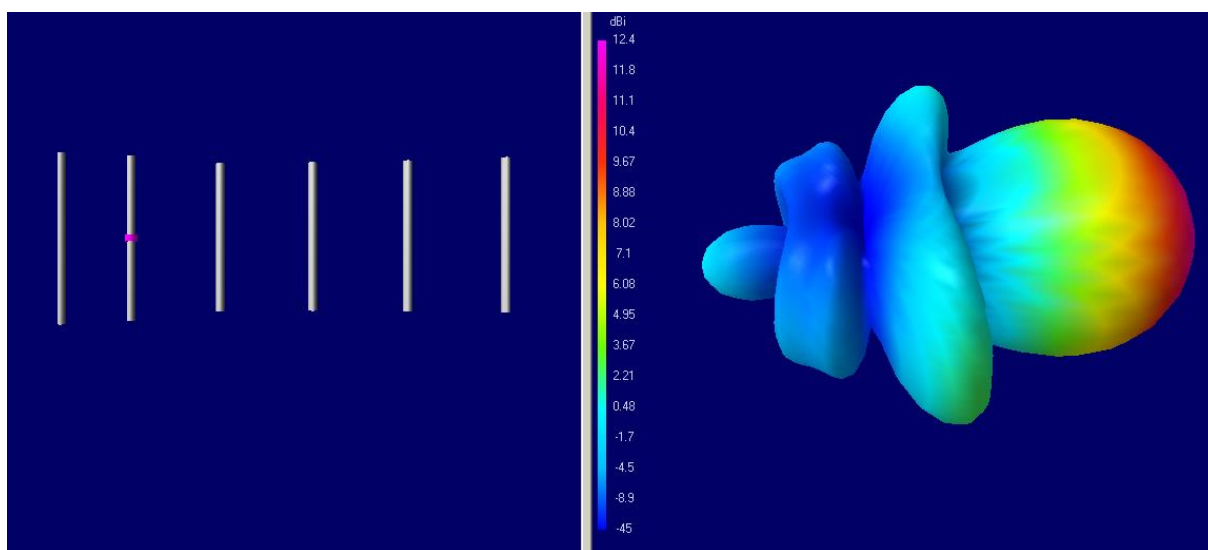
É uma ferramenta gratuita, baseada em janelas para criar, visualizar, otimizar e verificar os estilos da geometria da antena em 2D e 3D e gerar, apresentar e/ou comparar resultados. Ele permite, como a maioria dos programas destinados a simulação de antenas, reproduzir diagramas de radiação, acoplamento, impedância, ganho, relação frente e costa, eficiência, etc. Possui janelas independentes para geometria, visualização 3D, gráficos de eficiência, etc. Possui também uma interface interna especial para facilitar a construção de modelos de antenas. Esse software oferece a possibilidade de otimizar uma estrutura a partir da variação dos tamanhos e espaçamentos dos elementos que compõem o projeto.

4.2 SIMULAÇÃO DA ANTENA YAGI-UDA

O desenho da antena Yagi-Uda com 6 elementos definido na seção 3.1.4 foi transferido para o programa 4nec2, no qual foi possível observar os valores dos principais parâmetros da antena.

A Figura 29 mostra a estrutura simulada em um plano 3D no espaço livre e a radiação tridimensional para frequência central de 2440 MHz.

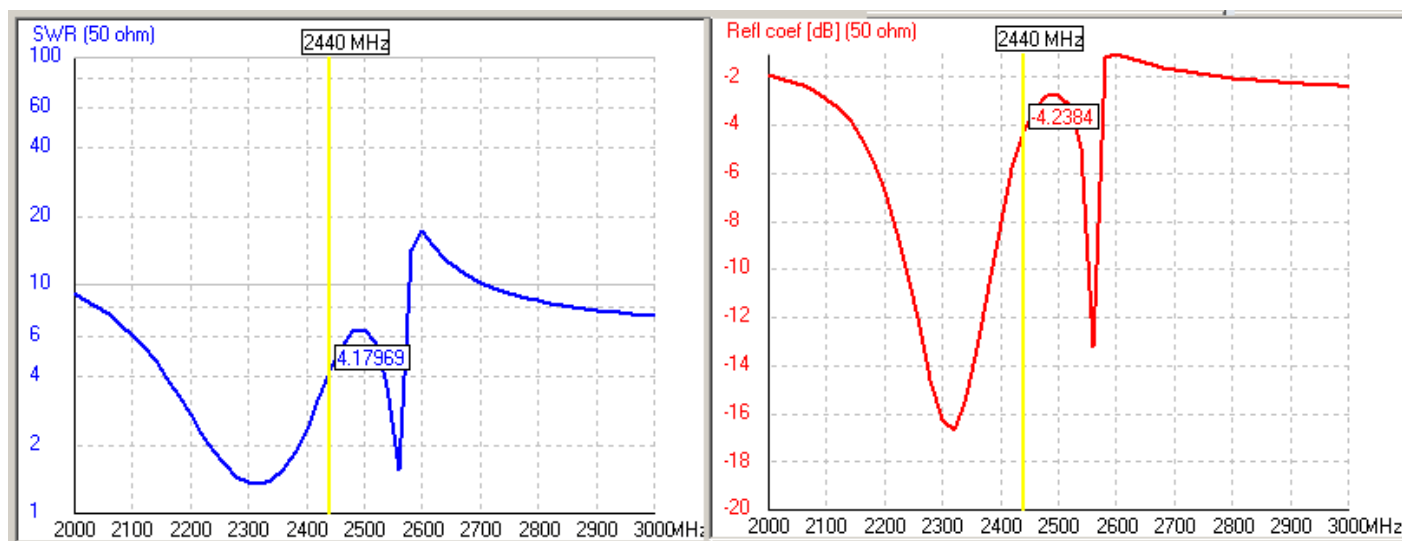
Figura 29 - Estrutura da antena Yagi-Uda projetada dentro da norma NBS.



Fonte: Autorial própria (2017).

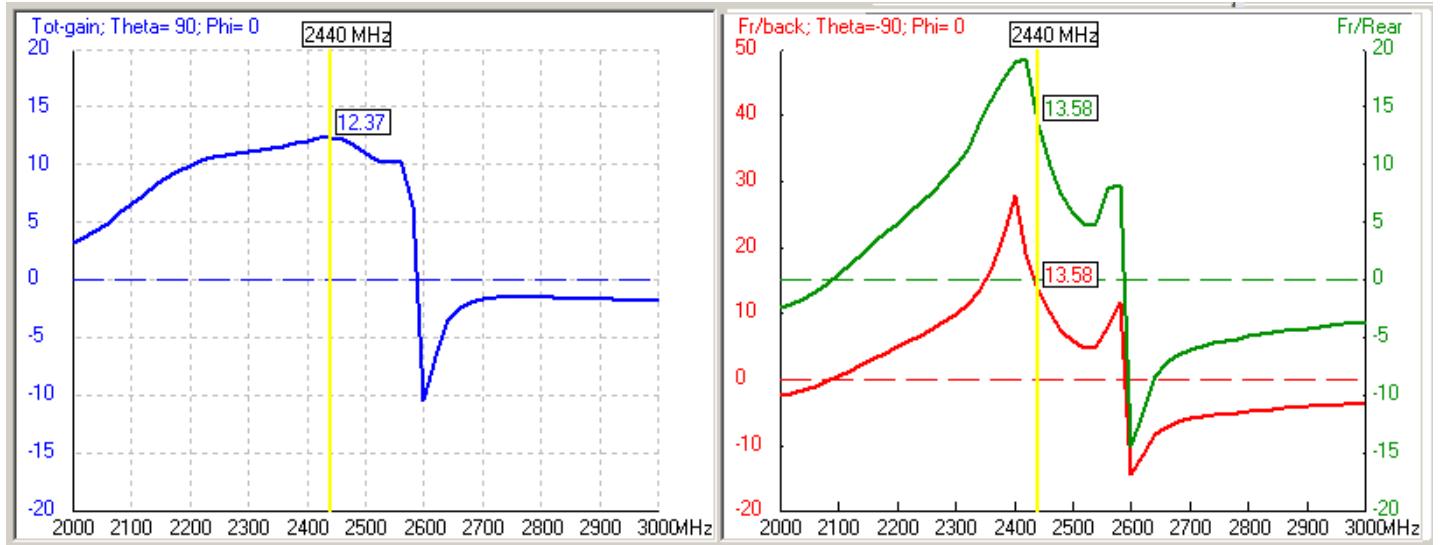
Com o objetivo de analisar as respostas de impedância, ROE e ganho foi estipulado uma faixa de frequência de 2000 a 3000 MHz, o raio usado para os elementos foi 1,5 mm, além disso, a linha de transmissão escolhida foi de 50Ω . Assim, foi possível analisar os resultados gerados por esse arranjo, conforme as Figuras 30,31, 32 e 33.

Figura 30 - Coeficiente de reflexão da antena.



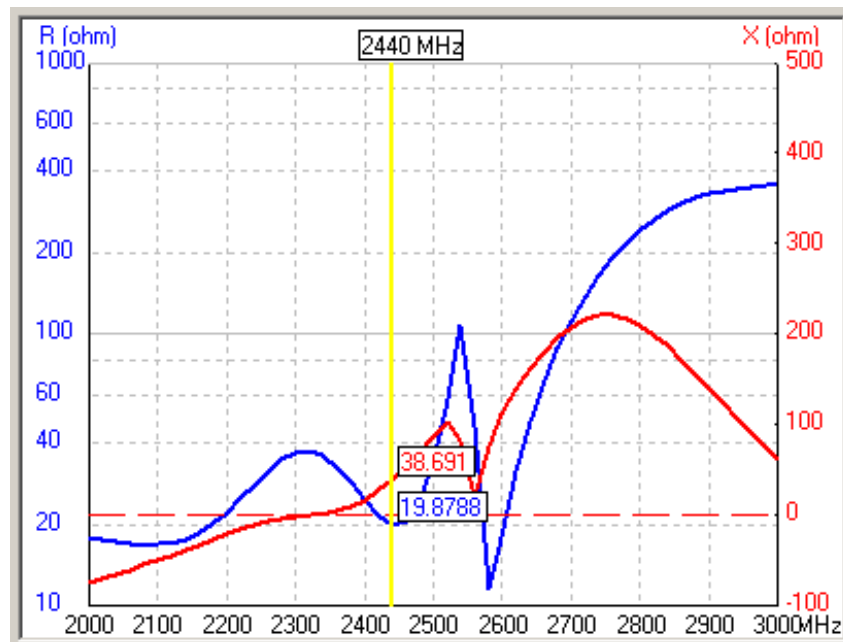
Fonte: Autorial Própria (2017).

Figura 31 - Ganho e relação frente/costa da antena Yagi-Uda.



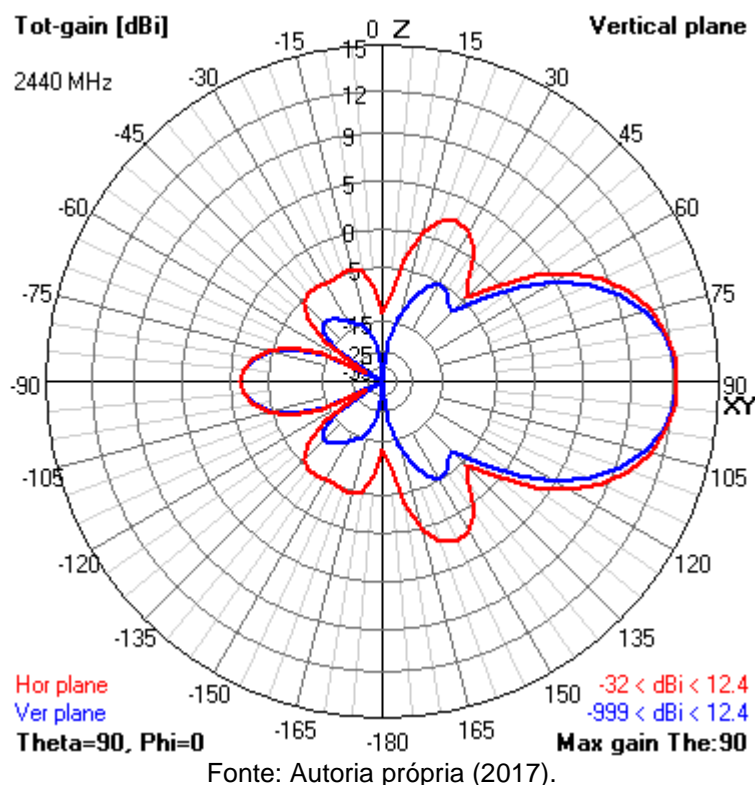
Fonte: Aatoria Própria (2017).

Figura 32 - Impedância da antena Yagi-Uda.



Fonte: Aatoria Própria (2017).

Figura 33 - Diagrama de radiação da antena Yagi-Uda.



O melhor resultado observado na simulação dessa estrutura foi o ganho, que ficou acima de 12,34dBi. A relação de onda estacionária(ROE) ficou acima de 4:1 para a frequência desejada, portanto, temos uma taxa de potência refletida de 37%, isto significa que apenas 63% da potência fornecida pela fonte é irradiada pela antena, tornando a comunicação inviável, isso ocorreu devido a impedância de entrada da antena que ficou $38+j19$. Diante disso, o próximo tópico detalha a otimização feita com o intuito de melhorar o casamento de impedância.

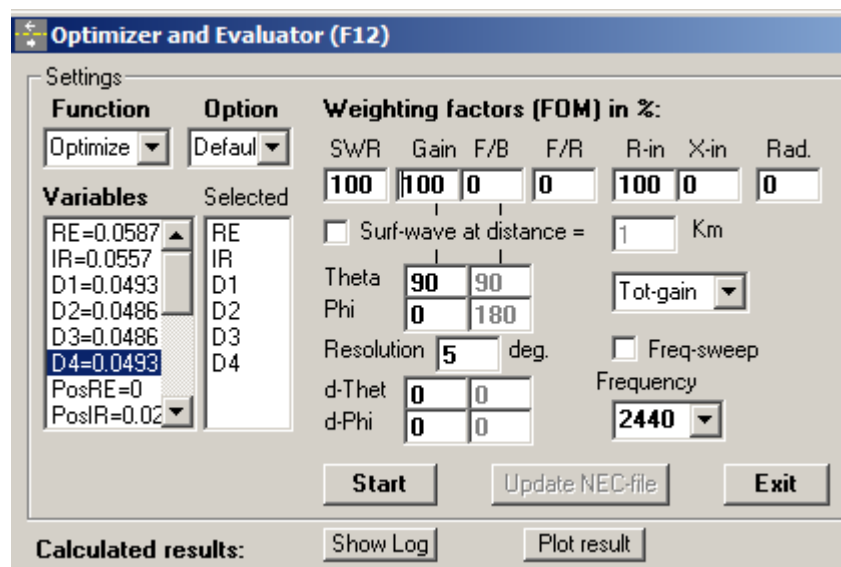
4.2.1 Otimização da antena Yagi-Uda

A otimização da antena Yagi-Uda foi focada no casamento de impedância para uma linha de transmissão de 50Ω . O 4nec2 oferece a opção de otimizar os comprimentos dos elementos, espaçamentos entre eles e/ou diâmetro.

Foi escolhido manter o raio e os espaçamento originais e alterar apenas o comprimento dos elementos, após a escolha dos parâmetros desejados otimizar, o programa altera os comprimentos até encontrar o melhor resultado que atenda as especificações escolhidas.

A Figura 34 demonstra a interface da janela do 4nec2 destinada a otimização do projeto. Foi escolhido uma melhora de 100% nos fatores de SWR, ganho e a parte resistiva da impedância, para frequência central de 2440 MHz.

Figura 34 - Janela da otimização do software 4nec2.



Fonte: Autoria própria (2017).

A Tabela 3 mostra os novos comprimentos dos elemento e os comprimentos originais.

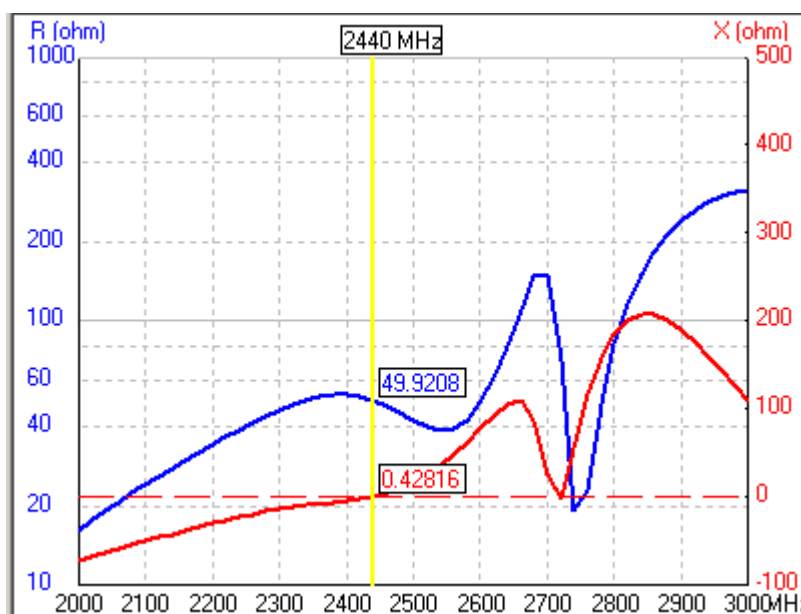
Tabela 3 - comprimentos gerados pela otimização.

Elemento:	Comprimento otimizados:	Comprimentos originais:
Refletor	68,507 mm	58.671 mm
Excitador	53,43 mm	55.737 mm
Diretor 1	45,412 mm	49,323 mm
Diretor 2	44,378 mm	47,847 mm
Diretor 3	45,199 mm	47,847 mm
Diretor 4	46,639 mm	49,323 mm

Fonte: Autoria própria (2017).

A impedância, como mostrada na Figura 35, ficou com a parte resistiva próxima de 50Ω e a reatância baixa, resultando em uma relação de onda estacionária com valor de 1.01:1, uma ótima eficiência, haja vista que o melhor possível para esse fator é 1:1, isso significa que quase toda energia que o gerador está fornecendo está sendo irradiada pela antena, desprezando perda do cabo. Portanto, temos um casamento de impedância. Além disso, o casamento de impedância permitiu uma boa largura de banda, ficou entre 2400 e 2500 MHz.

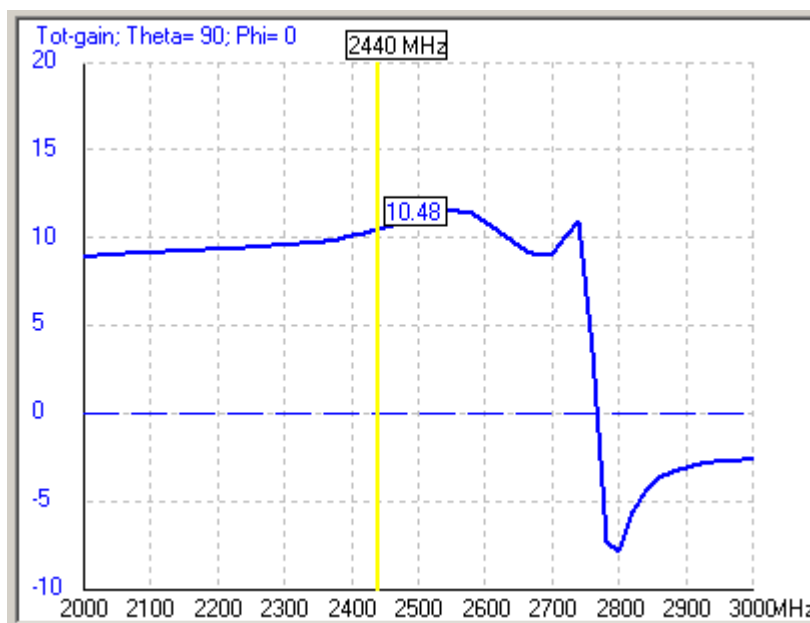
Figura 35 - Impedância após a otimização.



Fonte: Autoria própria (2017).

Já, o ganho diretivo apresentou conforme a Figura 36 uma diminuição de cerca de 2 dBi para a frequência de 2440 MHz. Entretanto, esse valor pode ser aumentado com o acréscimo de diretores.

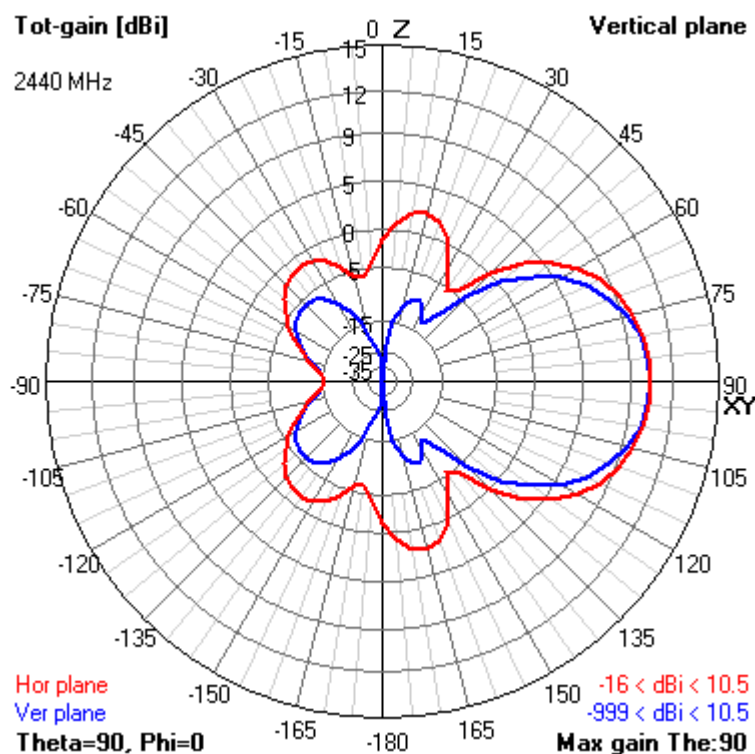
Figura 36 - Ganho da antena Yagi-Uda otimizada.



Fonte: Autoria própria (2017).

O diagrama de radiação da Figura 37 mostra porque o ganho diminuiu, a formação de lóbulos traseiros maiores significa que existe uma maior parte da potência sendo desperdiçada, pois a antena está irradiando uma parte para o lado contrário dos diretores. Além disso, a largura de feixe do lóbulo principal apresentou um aumento, ou seja, a irradiação consegue abranger uma maior área, em consequência, sua diretividade diminui.

Figura 37 - Diagrama de radiação após otimização.



Fonte: Autoria própria (2017).

4.2.2 Acréscimo de diretores

Devido à atenuação acontecida no ganho direto, surgiu a ideia de acrescentar mais diretores e observar os resultados. Eles foram acrescentados com o mesmo espaçamento do projeto original: 30,75 mm entre cada diretor. O comprimento foi definido com base nos comprimentos anteriores, e depois de uma otimização foi demonstrado que um bom desempenho era alcançado com um comprimento de 44mm. A tabela 4 mostra os resultados obtidos com os acréscimos de diretores.

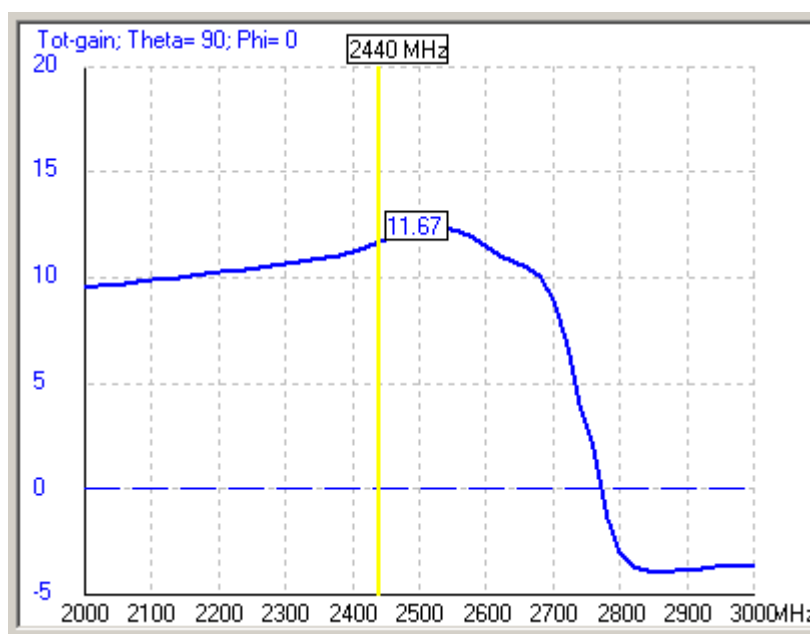
Tabela 4 - Relação do ganho com o acréscimo de diretores.

Quantidade de diretores	Ganho:
5	11,5 dBd
6	11,7 dBd

Fonte: Autoria própria (2017).

O acréscimo de diretores resultou em uma pequena mudança da impedância que diminuiu para 47,7 e apresentou um ROE de 1.07. Como observado na Figura 38, o ganho ficou próximo de 11,7 para frequência de 2440 MHz.

Figura 38 - Ganho após o acréscimo de 2 diretores.



Fonte: Autoria própria (2017).

A otimização apresentou um bom desempenho em relação ao casamento de impedância, porém, a diretividade da antena com 4 diretores diminuiu para 10,48 dBi. Dessa forma, foram adicionados mais dois diretores e o ganho aumentou para 11,7 dBi.

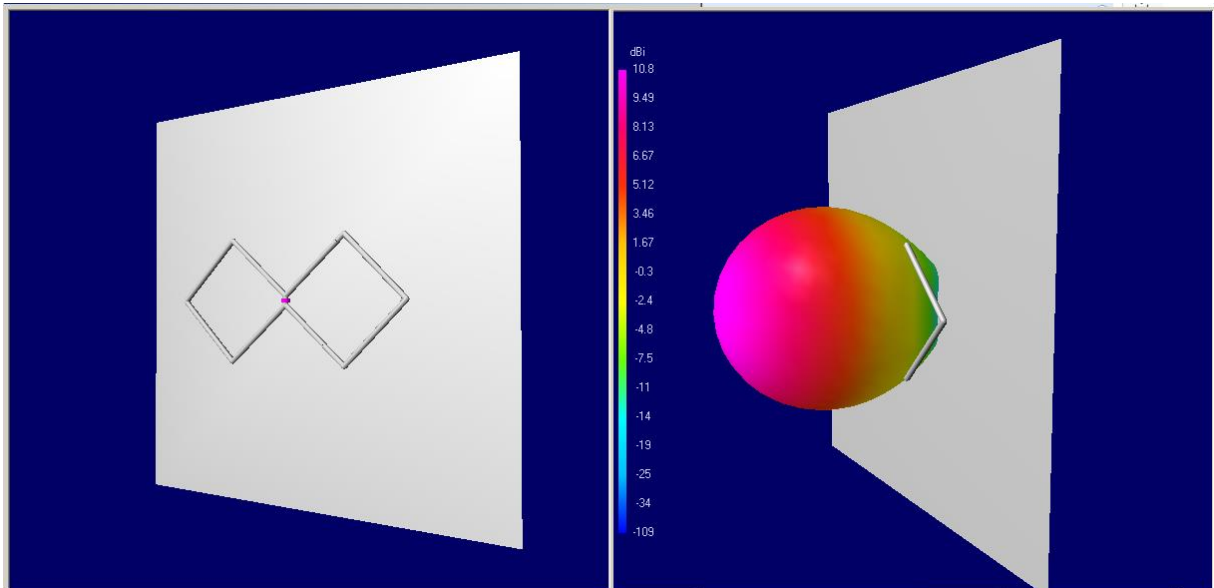
De forma geral os dois arranjos apresentaram resultados bons e podem ser implementados para compor o objetivo desse trabalho. Em vista disso, os modelos serão utilizados para construção real de duas antenas Yagi-Uda.

4.3 SIMULAÇÃO DA ANTENA BIQUAD

A dimensão de cada segmento e refletor foram desenhadas no 4nec2. Acrescendo a criação de um espaço no centro para colocar a alimentação, tamanho da ordem de 1,3 mm de comprimento. Comparada a antena Yagi-Uda, a Biquad apresenta um design simples, ademais, não apresenta tantos parâmetros físicos que podem ser alterados para conseguir um melhor desempenho.

Sua estrutura e padrão de radiação gerados na simulação são mostrados na Figura 39.

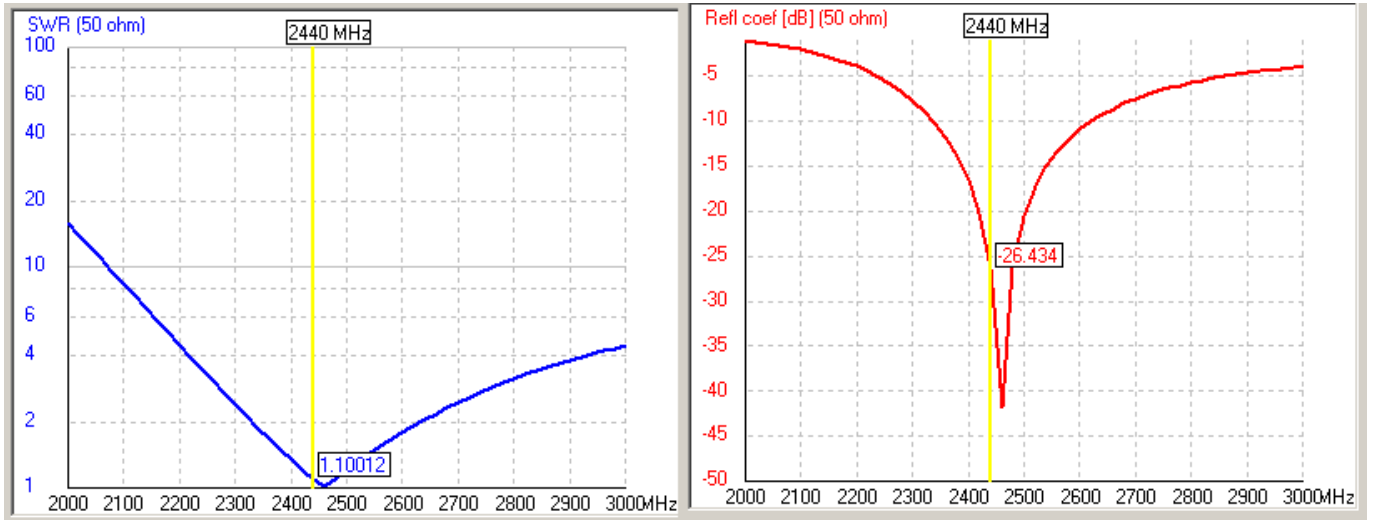
Figura 39 - Estrutura da antena Biquad e padrão de radiação tridimensional.



Fonte: Autoria própria (2017).

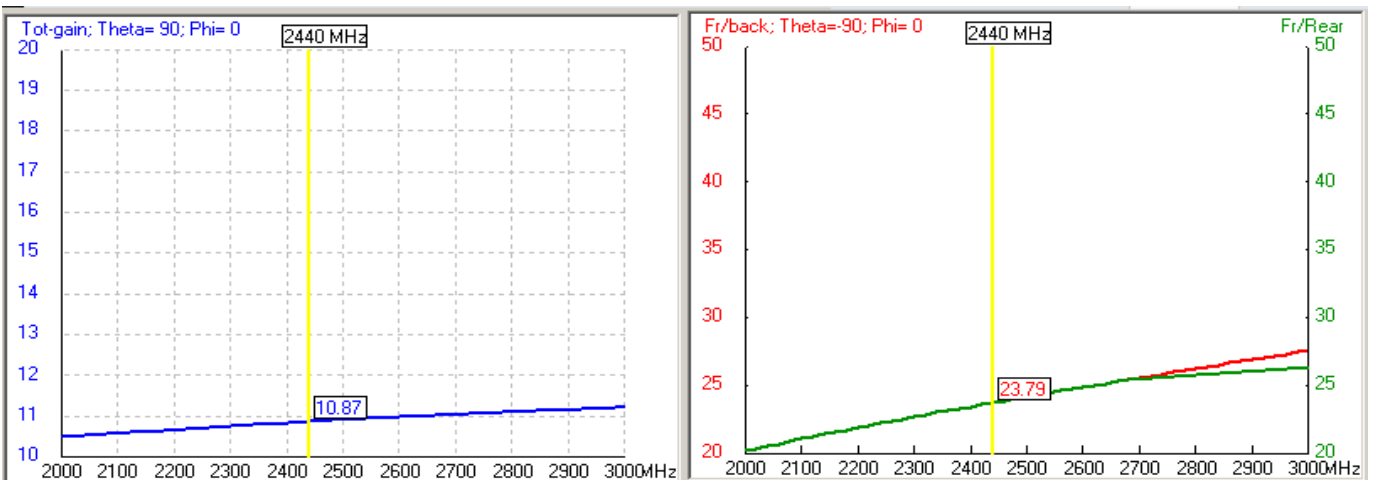
Com o objetivo de analisar as respostas de impedância, ROE e ganho foi estipulado uma banda de frequência de 2000 a 3000 MHz, o raio usado para os elementos foi 1 mm, além disso, a linha de transmissão escolhida tem uma impedância de 50Ω . Assim, foi possível analisar os resultados gerados por esse modelo de antena.

Figura 40- Relação de onda estacionária e coeficiente de reflexão.



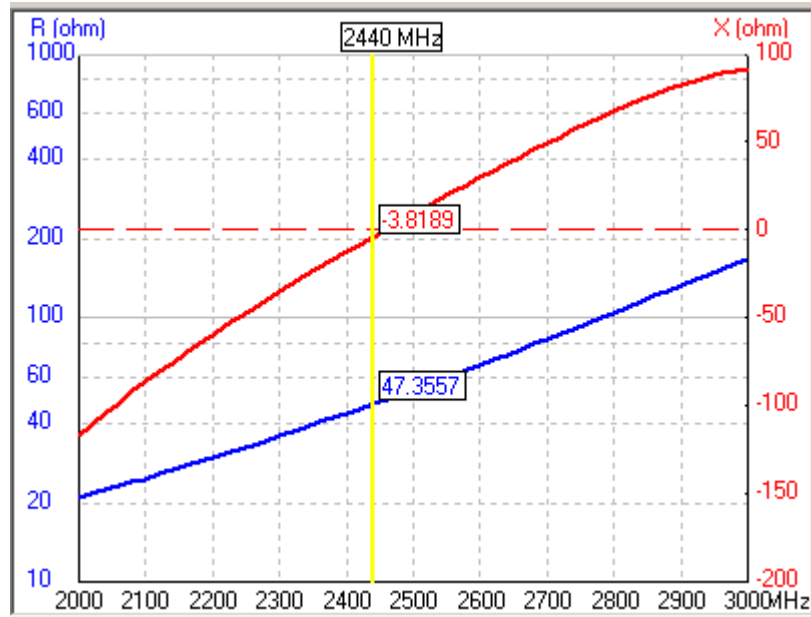
Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 41 - Ganho e relação frente/costa da Biquad.



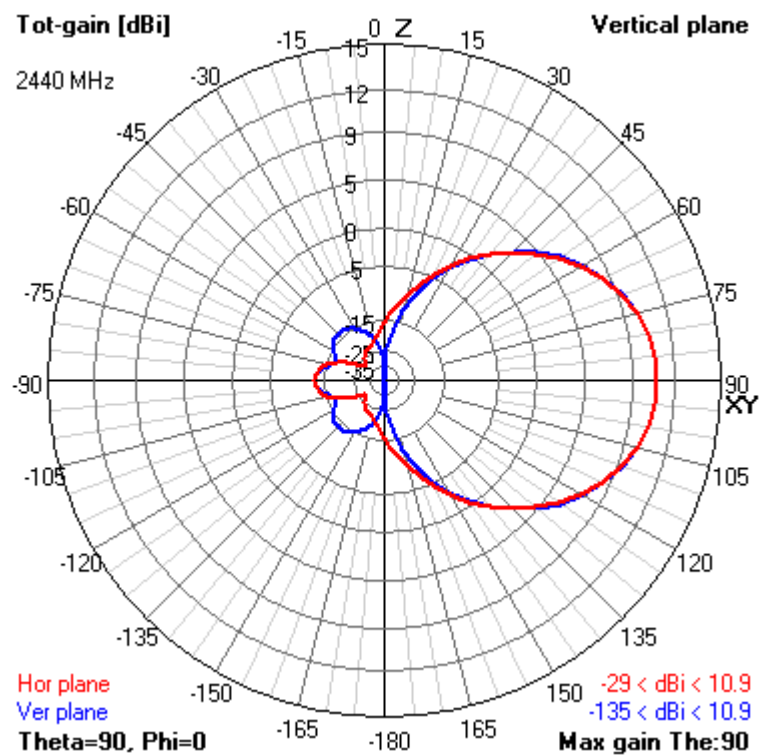
Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 42 - Impedância da antena Biquad.



Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 43 - Diagrama de radiação da antena Biquad.



Fonte: Autoria própria (2017).

Os resultados apresentados ficaram dentro do esperado, a ROE simulado para uma linha de transmissão de 50Ω ficou próximo de 1:1, consequência da impedância de entrada antena que ficou próxima de 48Ω . O ganho obtido foi 10.87 dBi, é um valor

que está no intervalo de 10-12 dBi proposto pela teoria. Tendo em vista que uma antena Biquad apresenta um ganho bidirecional de aproximadamente 6 dBi. No momento que essa antena é colocada próxima a um refletor, a radiação direcionada ao refletor será refletida na direção oposta. Dessa forma toda radiação fica concentrada em apenas uma direção, resultando em uma irradiação de 10-12 dBi. Contudo, isso também depende do tipo e formato do refletor escolhido. Ademais, a relação frente/costa ficou melhor que a antena Yagi.

Diferente da antena anterior, não foi necessário otimizar para conseguir um melhor desempenho, deste modo, o modelo está apto para construção.

5. CONSTRUÇÃO E MEDIÇÕES

Neste capítulo dar-se-á sequência ao estudo através dos procedimentos práticos do projeto (construção e medição) anteriormente apresentado. Procurou-se manter nessa etapa o maior número de peças comuns, viabilizando o processo de fabricação dos protótipos. A fabricação das antenas foi realizada através de processo artesanal desenvolvido em laboratório, assim sendo, tentou-se manter as medidas simuladas com o máximo de precisão.

O processo de confecção foi dividido em dois grupos: fabricação das antenas Yagi-Uda, apresentadas na seção 4.1.1 e 4.1.2, e a Biquad apresentada na seção 3.2.3.

5.1 CONSTRUÇÃO DA ANTENA YAGI-UDA

O objetivo na confecção foi conseguir montar o protótipo com materiais que possam ser encontrados na maioria das lojas de construções e com preços acessíveis.

5.1.1 Materiais

Os materiais utilizados para confecção da antena foram:

- Dois conectores SMA
- 1 metro de cabo coaxial RG-58
- 2 metros de fio de cobre com 3 mm de diâmetro
- 20 cm de canaleta com 20mm de diâmetro
- 30 cm de eletroduto de PVC com 20mm de diâmetro

O fio de cobre foi usado para fazer os elementos da antena. Já o cabo coaxial juntamente com o conector é usado para a alimentação da antena.

Figura 44 - Fio de cobre(a) com 3 mm e cabo coaxial(b)



(a)

(b)

Fonte: Autoria própria (2017).

O cano eletroduto feito de PVC com diâmetro de 20 mm é empregado como suporte da antena de 6 diretores e a canaleta foi aplicada como suporte da antena de 4 diretores.

Figura 45 - Cano eletroduto (a) de 20 mm e canaleta (b) de 20 mm



(a)

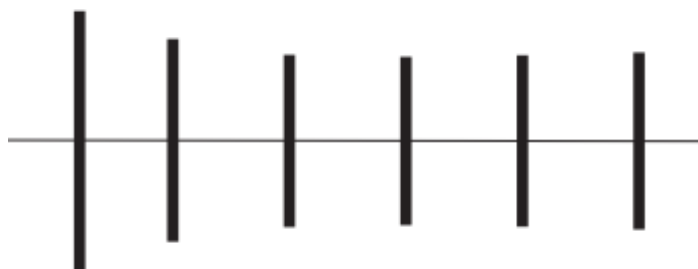
(b)

Fonte: Autoria própria (2017).

5.1.2 Antena Yagi-Uda com 4 diretores.

A montagem dessa antena consiste no corte do fio de cobre de acordo com o comprimento de cada elemento e na distribuição correta deles dentro do suporte. Diante disso, foi criado o desenho da estrutura no software Corel-Draw e foi impresso em uma folha A4 com as dimensões do projeto definido na seção 4.1.1. Isso facilitou o corte dos elementos. As medições dos comprimentos foram realizadas utilizando um paquímetro com precisão de 0,05 mm.

Figura 46 - Design construído no Corel-Draw.

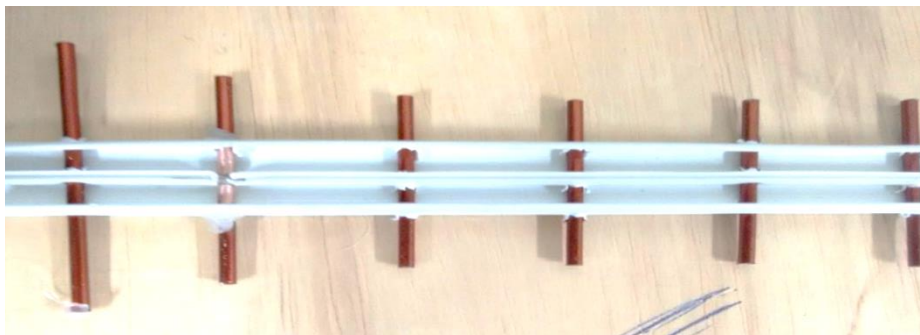


Fonte: Autoria própria (2017).

O suporte utilizado foi uma canaleta devido a facilidade de manuseio para fixar os elementos e marcar os espaços corretamente.

A Figura 47 mostra os elementos cortados e fixados na canaleta, faltando apenas a soldagem do cabo coaxial no segundo elemento: o dipolo de meia onda. Para facilitar esse processo, as pontas do elemento foram lixadas com o intuito de haver uma melhor fixação do estanho utilizado para unir o cabo coaxial ao excitador.

Figura 47 - Elementos da Yagi-Uda fixados na canaleta.



Fonte: Autoria própria (2017).

A maior dificuldade na confecção desse protótipo foi a alimentação do dipolo, pois esse processo consiste em soldar o condutor central do cabo coaxial em uma haste do dipolo e a malha na outra haste, se torna mais difícil ainda, pois os fios não podem se tocar e devem estar o mais próximo possível. A soldagem finalizada é apresentada na Figura 48. Foi usado cola quente para que os elementos ficassem mais fixos em suas posições e o cabo não se movesse facilmente, ocasionando a ruptura da solda.

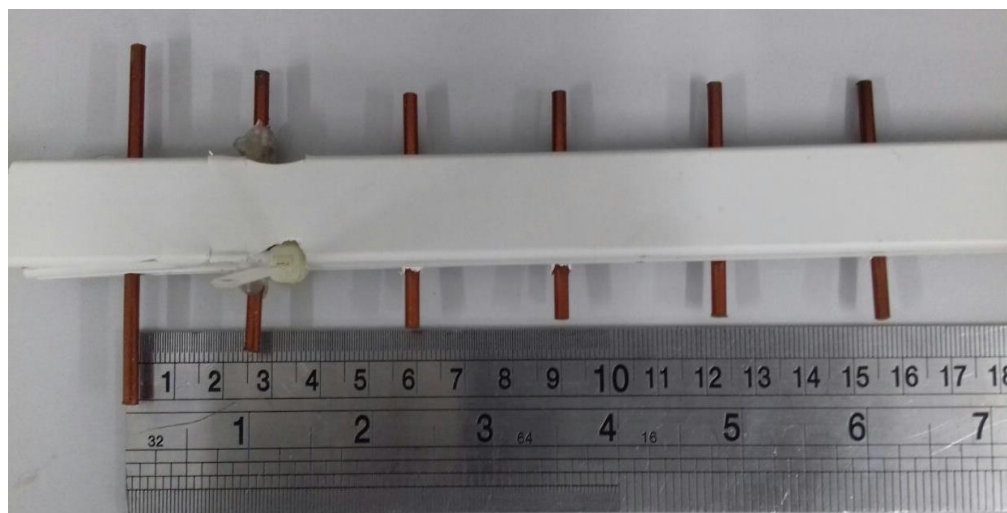
Figura 48 - Dipolo soldado ao cabo coaxial.



Fonte: Autoria própria (2017).

O conector SMA fêmea foi acoplado ao outro extremo do cabo coaxial, a escolha desse tipo de conector é baseada na entrada dos dispositivos usados para fazer medições. O protótipo final é apresentado na Figura 49.

Figura 49 - Protótipo finalizado.

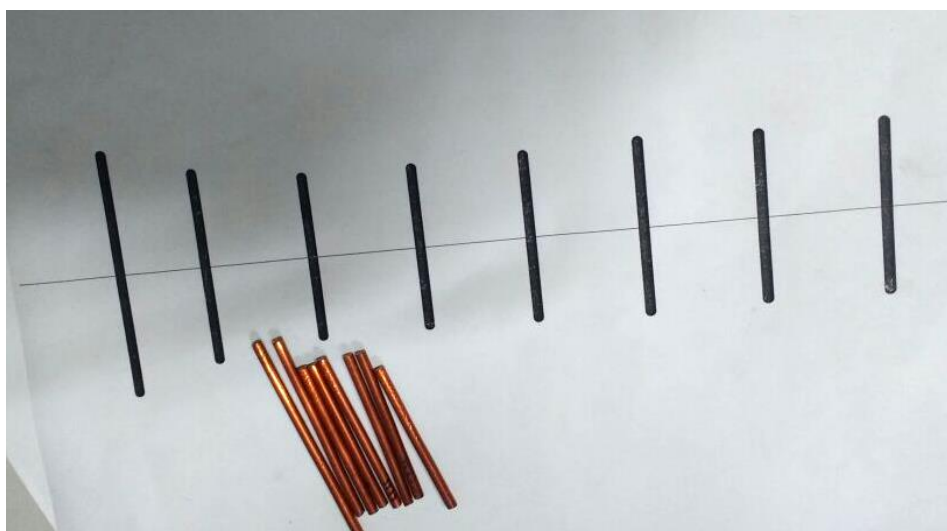


Fonte: A autoria própria (2017).

5.1.3 Antena Yagi-Uda com 6 diretores.

A montagem da segunda antena Yagi, seguiu os mesmo passos da primeira, a diferença está no suporte usado, que foi um cano eletroduto com diâmetro de 20mm. A Figura 50 mostra os elementos cortados para o arranjo com 6 diretores.

Figura 50 - Design do protótipo impresso.



Fonte: A autoria própria (2017).

O dipolo foi fixado em uma base de plástico, isso foi feito para viabilizar a soldagem e impedir o rompimento da mesma. Esse processo é apresentado na Figura 51 e 52.

Figura 51 - Elementos lixados para soldagem do cabo coaxial.



Fonte: Autoria própria (2017).

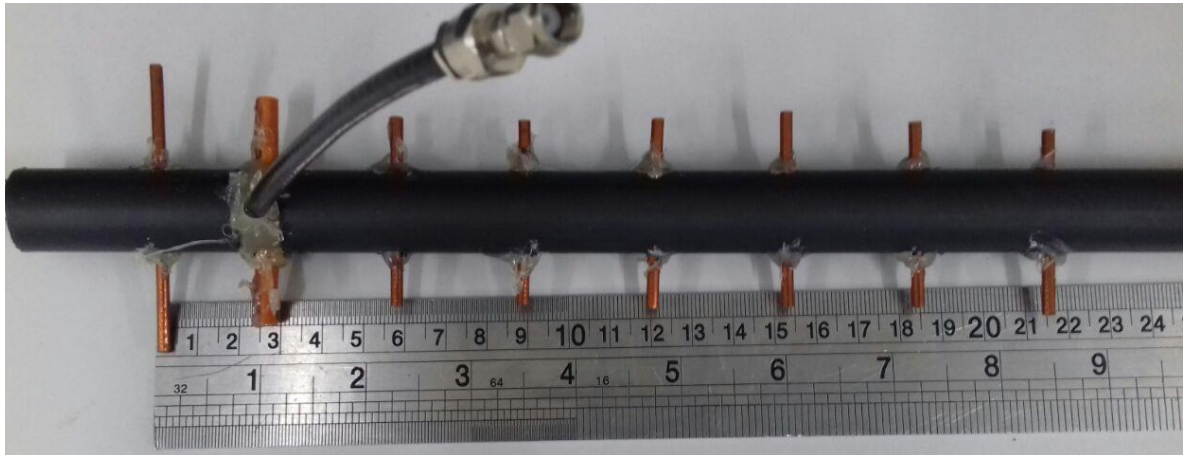
Figura 52 - Antena dipolo soldada ao cabo coaxial.



Fonte: Autoria própria (2017).

Após a finalização do elemento excitador, o cano de suporte foi furado com base na estrutura definida na seção 4.1.1. Os elementos foram presos com cola quente para que não houvesse possíveis movimentos. Diferente da antena anterior, no cabo coaxial foi acoplado um conector SMA macho que tem como objetivo a conexão com dispositivos Wi-Fi. O protótipo final é apresentado na Figura 53.

Figura 53 - Protótipo finalizado.



Fonte: Autoria própria (2017).

5.2 CONFECÇÃO DA ANTENA BIQUAD

O objetivo na confecção foi conseguir montar o protótipo com materiais que possam ser encontrados na maioria das lojas de construções e com preços acessíveis.

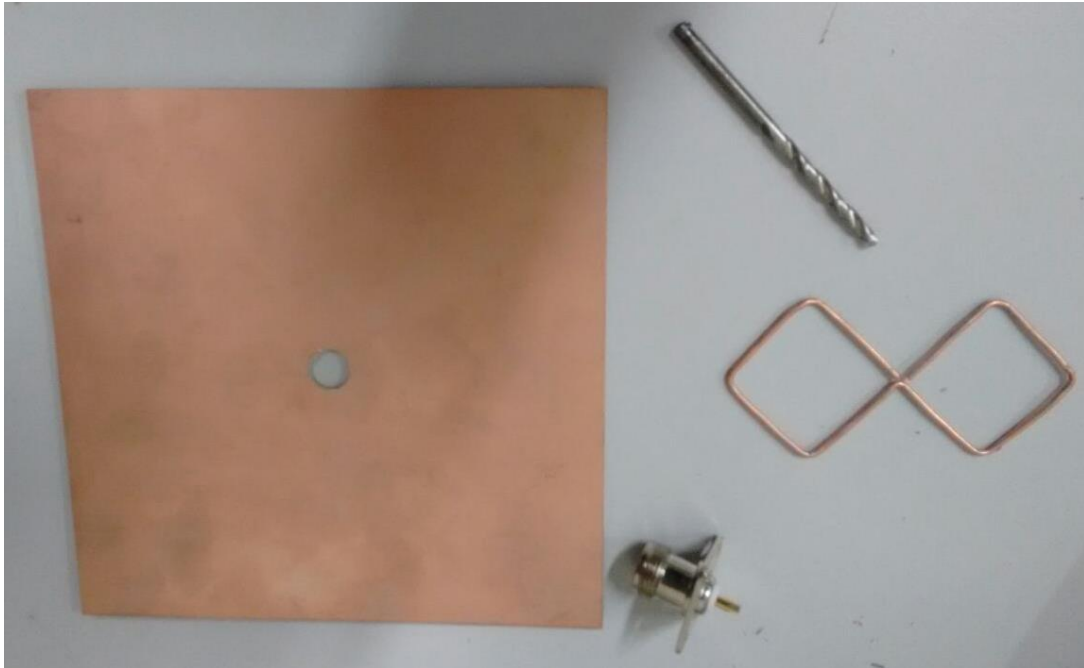
5.2.1 Materiais

Os componentes usados para construir a antena foram:

- Placa de fenolite face simples 15 x 15 cm
- Fio de cobre (aproximadamente 1 mm de diâmetro)
- Conector N fêmea
- 4 parafusos

Os materiais utilizados são mostrados na Figura 54.

Figura 54 - Materiais utilizados na construção da antena Biquad.



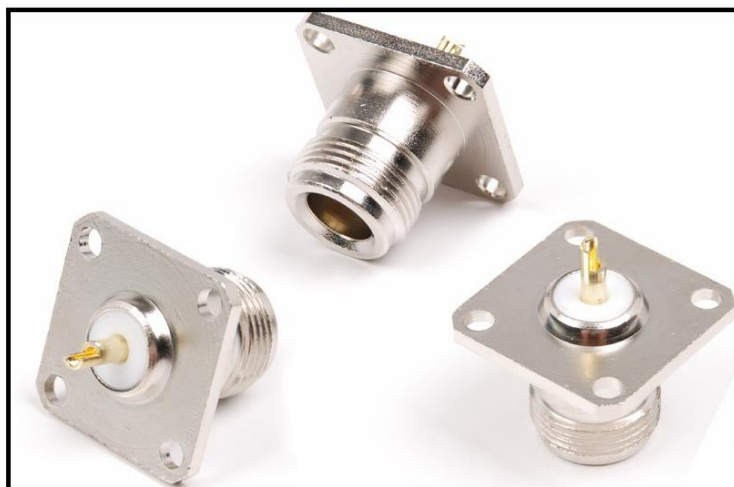
Fonte: Autoria própria (2017).

A broca foi utilizada para perfurar a placa de fenolite no centro e, posteriormente, encaixar o conector N.

5.2.2 Construção da antena Biquad

A Figura 54 mostra a antena quase pronta, a perfuração no centro é preenchida pelo conector que pode ser melhor observado na Figura 55. O pino sobressalente é soldado em um fio de cobre para alcançar a altura mínima de 15 mm definido na seção 3.2.3, ademais, outro fio é soldado na carcaça do conector que estará em contato com a malha do cabo coaxial.

Figura 55 - Conector N fêmea.



Fonte: Autoria própria (2017).

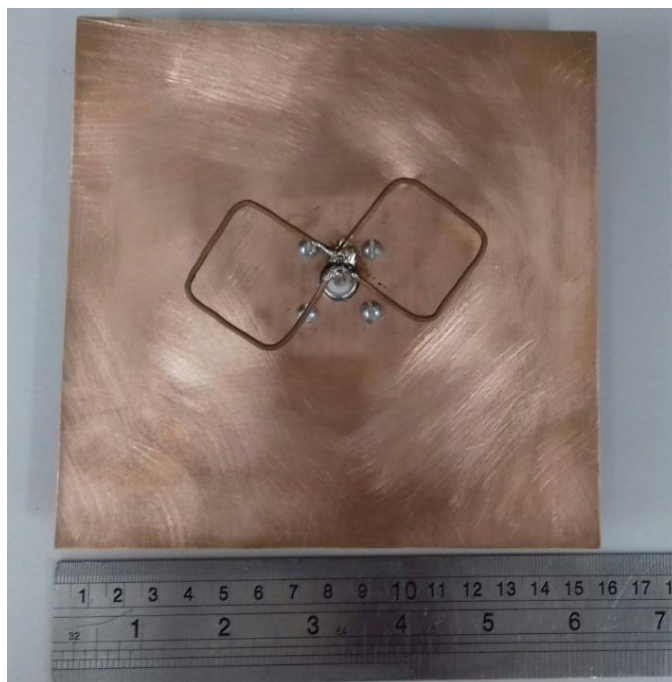
Figura 56 - Conector N fêmea com fios soldados



Fonte: Autoria própria (2017).

A fixação do conector a placa de fenolite foi feita por meio de parafusos, após isso, a antena Biquad foi soldada aos fios ligados no conector, finalizando a montagem do protótipo. O resultado final é mostrado na Figura 57.

Figura 57 - Construção da antena Biquad finalizada.



Fonte: Autoria própria (2017).

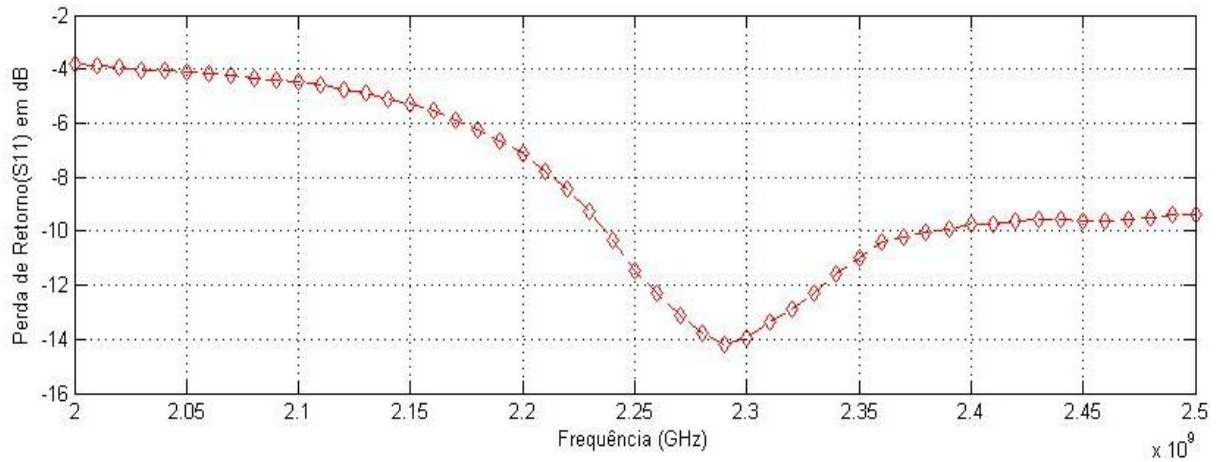
5.3 MEDIÇÕES E COMPARAÇÕES

As antenas construídas tiveram a perda de retorno e a relação de onda estacionária medida em laboratório, para os demais parâmetros somente as simulações foram utilizadas. Os procedimentos de caracterização da perda de retorno (S_{11}) se desenvolveu no Laboratório de Telecomunicações localizado na Universidade Federal do Rio Grande do Norte(UFRN). Para medição da perda de retorno foram utilizados os seguintes equipamentos: Analisador de espectro, conector tipo N macho, SMA tipo fêmea e macho, cabos e acessórios diversos.

5.3.1 Perda de retorno(S_{11}) e relação de onda estacionária

A antena a ser medida foi posicionada em uma bancada reservada no interior do laboratório, o analisador de espectro foi ajustado para analisar o S_{11} na faixa de frequência de 2 a 2.5 GHz. Além da perda de retorno, foi também analisado os valores para relação de onda estacionária. Um desempenho aceitável é apresentado quando esse valor fica abaixo ou próximo de 2, dessa forma, é possível determinar a largura de banda.

Figura 58 - Perda de retorno da antena Yagi-Uda com 4 diretores.



0

Figura 59 - Relação de onda estacionária da antena Yagi-Uda

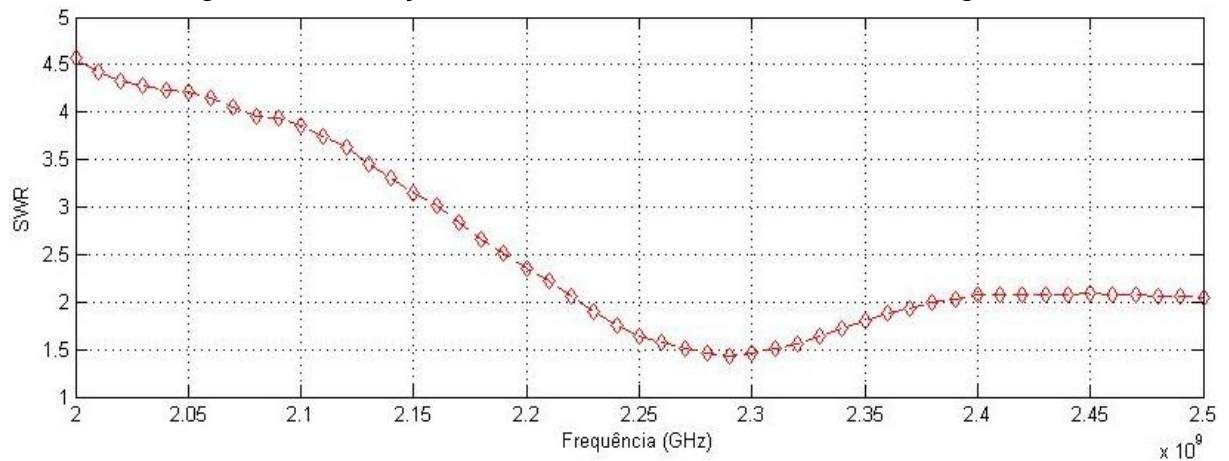


Tabela 5 - Comparação de valores medidos e simulados da antena Yagi-Uda com 4 diretores

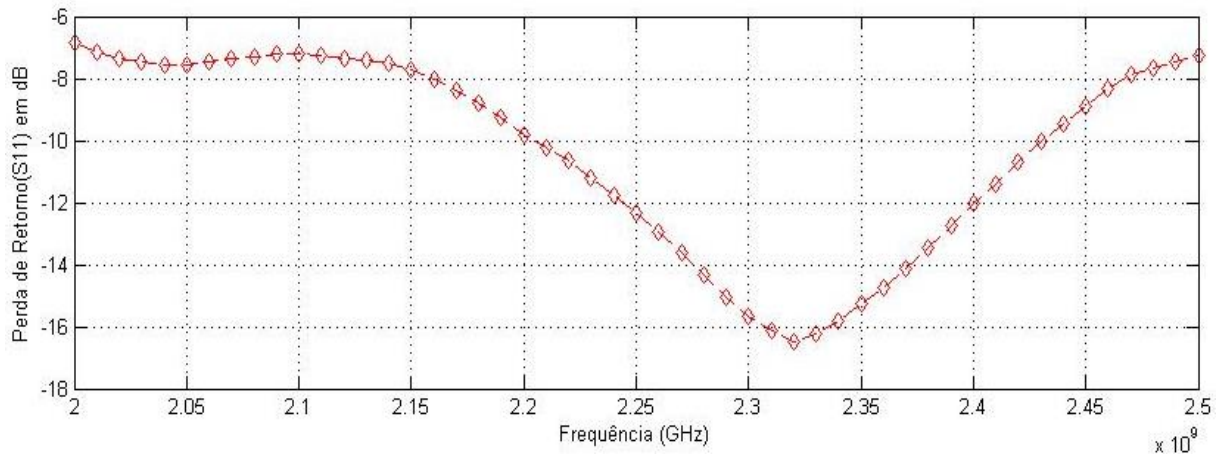
1° Antena Yagi-Uda.	Frequência mínima (GHz)	Frequência máxima (GHz)	Ressonância(GHz)	Largura de banda(MHz)	S_{11} em dB	Potência radiada
Simulado	2.3	2.5	2.44	200	-47,2	100%
Medido	2.22	2.4	2.29	200	-14	96%

Fonte: Autoria própria (2017).

A frequência de ressonância medida ficou próxima de 2.29 GHz, com uma perda de retorno de -14 dB, a partir de cálculos é possível verificar que cerca de 96% da potência fornecida por um gerador é radiada pela antena, tornando esse arranjo

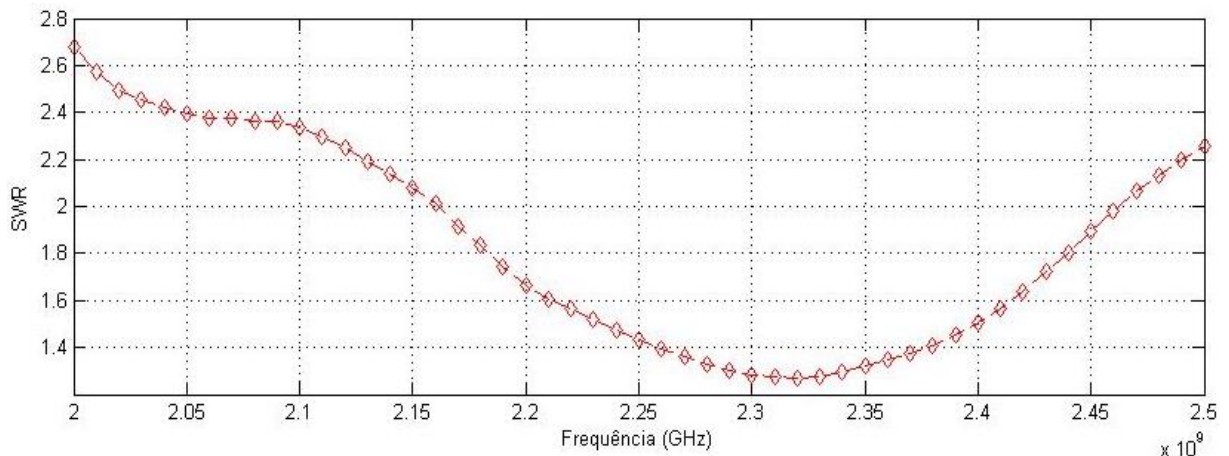
operável. Além disso, foi medido uma largura de banda próxima de 200 MHz, na qual a antena apresentou um bom desempenho entre 2.2 GHz e 2.4 GHz.

Figura 60 - Perda de retorno da Antena Yagi-Uda com 6 diretores.



Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 61 - Relação de onda estacionária da antena Yagi-Uda



Fonte: Autoria própria (2017).

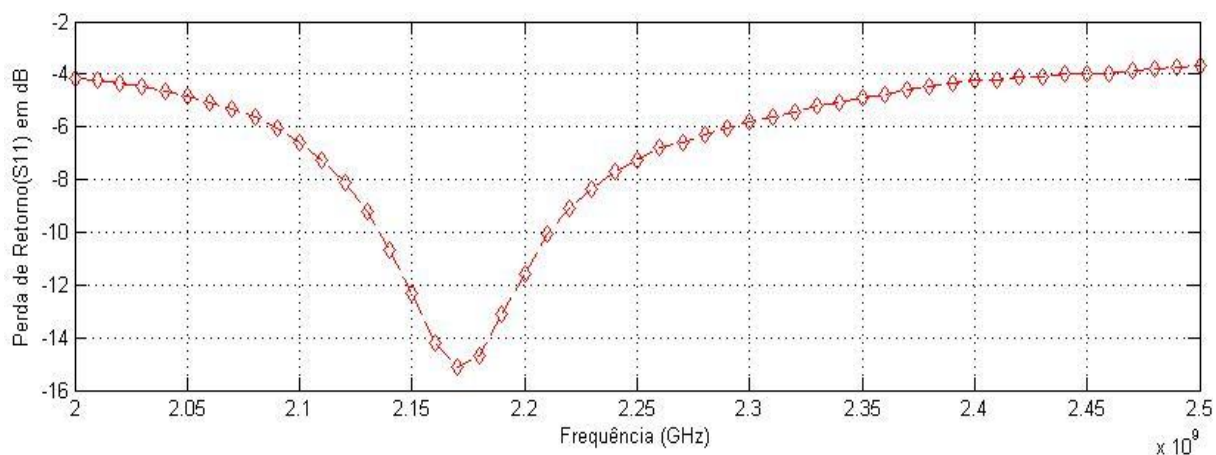
Tabela 6 - Comparação de valores medidos e simulados da antena Yagi-Uda com 6 diretores

2ª Antena Yagi-Uda.	Frequência mínima(GHz)	Frequência máxima(GHz)	Ressonância(GHz)	Largura de banda(MHz)	S ₁₁ em dB	Potência radiada
Simulado	2.3	2.5	2.46	200	-43,1	100%
Medido	2.2	2.44	2.32	240	-16,2	97,8%

Fonte: Autoria própria (2017).

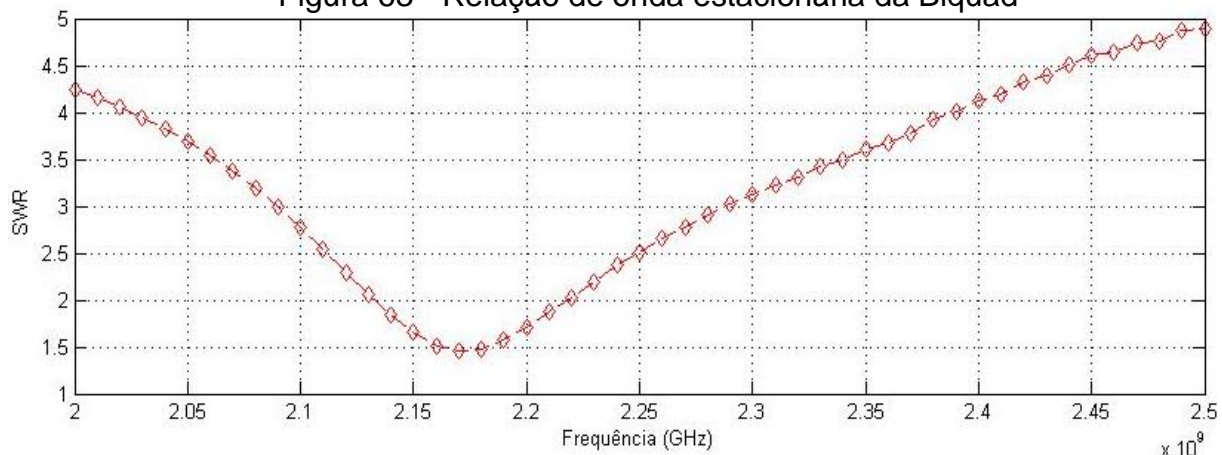
A segunda antena apresentou um bom desempenho na frequência central de 2.32GHz com perda de retorno de -16,2 dB, além disso, foi medido uma largura de banda acima de 200 MHz, operando desde de 2.2 GHz até 2.44 GHz (parte da frequência Wi-Fi).

Figura 62 - Perda de retorno da antena Biquad.



Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 63 - Relação de onda estacionária da Biquad



Fonte: Autoria própria (2017).

Tabela 7 - Comparação de valores medidos e simulados da antena Biquad.

Antena Biquad	Frequência mínima(GHz)	Frequência máxima(GHz)	Ressonância (GHz)	Largura de banda(MHz)	S ₁₁ em dB	Potência radiada
Simulado	2.335	2.6	2.46	265	-37,1	99.98%
Medido (1)	2.13	2.21	2.17	80	-15	96.60%

Fonte: Autoria própria (2017).

A antena Biquad demonstrou bons resultados para a frequência de 2.17 GHz apresentando uma perda de retorno de -15 dB, isso significa que 96.60% da potência do gerador será radiada por esse arranjo. A largura de banda foi 80 MHz, de 2.13 a 2.21 GHz. Porém, esses valores podem melhorar com um correto ajuste no tamanho da antena. Diminuindo o tamanho dos segmentos é possível verificar melhores resultados em frequências mais elevadas que 2.2 GHz.

Em comparação com a antena Yagi-Uda, a Biquad com refletor se mostrou mais fácil de ser confeccionada devido a sua fácil e compacta estrutura. Ademais, apresenta resultados similares nos parâmetros de ganho e impedância. A Yagi-Uda tem a vantagem de aumento de diretores para que haja um ganho maior, por sua vez, a Biquad com refletor pode ser acoplada a um prato de parabólica aumentando sua diretividade.

Um ponto positivo da antena Biquad com refletor é a facilidade de ajustes, por exemplo, nesse trabalho, o arranjo apresentou uma frequência de ressonância de 2.17 GHz, caso seja almejado uma frequência maior, apenas basta diminuir o tamanho dos quadros da antena, caso for desejado uma frequência menor, deve-se aumentar o tamanho. Por sua vez, os ajustes da frequência da antena Yagi-Uda estão ligados ao tamanho do dipolo, contudo, os elementos diretores e refletores também influenciam nos diversos parâmetros que compõem a antena e devem ser reajustados.

É plausível salientar que os resultados finais estão sujeitos a divergências dos resultados simulados, pois a implementação da antena na prática discorre sob inúmeras variáveis que podem comprometer o bom funcionamento, como: soldagem, o cabo coaxial, conectores e cabo de péssima qualidade, imprecisões no processo de construção da antena. Além disso, as simulações apresentam números com muitas casas decimais, que dificilmente podem ser implementados na prática.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PROPOSTAS PARA O FUTURO.

Foi desenvolvido nesse trabalho um estudo das antenas Yagi-Uda e Biquad possibilitando sua aplicação na recepção de sinal de Wi-Fi. Foram analisadas suas características e desenvolvimento do projeto. As etapas do projeto se desenvolveram no cálculo teórico e simulações utilizando o software computacional 4nec2.

O método utilizado para projetar as antenas Yagi-Uda foi o NBS 688, largamente utilizada por autores, pode servir como base para diversos projetos, diminuindo o tempo demandado por extensos cálculos e simulações. A técnica utilizada no projeto da antena Biquad é simples, isso é comprovado pelos resultados simulados, que não precisaram de qualquer otimização para apresentar um bom desempenho na simulação.

O projeto usando a técnica criada por Viezbicke (1976) foi simulado, analisado e otimizado, depois foi acrescentado dois diretores para aumentar o ganho. Os modelos de antes e depois do acréscimo de diretores foram confeccionados. O mesmo aconteceu com a antena Biquad, na qual foi adicionado um refletor para incrementar sua diretividade. As antenas construídas foram medidas, em um analisador vetorial de redes, e verificou-se uma boa concordância entre os resultados experimentais e os simulados.

Mediante aos resultados aqui apresentados, é proposto para trabalhos futuros à adequação dessas antenas, Yagi-Uda e Biquad, para estruturas em microfita.

REFERÊNCIAS

Azevedo, Paulo. **Manual de FTL: Antenas, Propagação e Linhas de Transmissão**. 2011. Disponível em: <<https://drive.google.com/open?id=0B4yxxj-Zd1GKRm1tM0o0eW5FVUU>>. Acesso em: 12 jun. 2017.

ALECRIM, Emerson (Org.). **O que é Wi-Fi (IEEE 802.11)?** 2008. Disponível em: <<https://www.infowester.com/wifi.php>>. Acesso em: 11 nov. 2017.

ANTENAS de onda completa. 2010. Disponível em: <<http://www.radioaficion.com/HamNews/articles/1521-antenas-de-onda-completa.html>>. Acesso em: 31 dez. 2017.

BALANIS, C. A. *Antenna Theory*. 3a ed. New York: John Wiley & Sons, 2005.

BULGARONI, Renan Guimarães. **PROJETO DE ANTENAS PLANARES DE BAIXO CUSTO PARA SISTEMAS MULTIBANDA**. 2016. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Abc, Santo André, 2016.

BRAGA, Newton C.. **Conversão ROE x Watts**. 1981. Disponível em: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/telecomunicacoes/13013-conversao-roe-x-watts-tel177>>. Acesso em: 1 set. 2017.

BUILDING a Biquad antenna. 2008. Disponível em: <<http://www.ziva-vatra.com/index.php?aid=16&id=SGFyZHdhcmU>>. Acesso em: 2 out. 2017.

CLYMER, Jim. **Wire Antenna Calculator**. Disponível em: <http://www.ws6x.com/ant_calc.htm>. Acesso em: 11 nov. 2017.

CARVALHO, Álvaro Gomes de; BADINHAN, Luiz Fernando da Costa. **Eletrônica: telecomunicação**. São Paulo: Fundação Padre Anchieta, 2011.

CARR, Joseph J.. **Antenna Toolkit**. 2. ed. Boston: Newnes, 2001. 253 p. Disponível em: <[http://py5sg.crafi.qsl.br/manuais_e_esquemas/Hand-Books/Antenna Toolkit 2Nd Ed - J Carr \(Newnes, 2001\) Ww.pdf](http://py5sg.crafi.qsl.br/manuais_e_esquemas/Hand-Books/Antenna Toolkit 2Nd Ed - J Carr (Newnes, 2001) Ww.pdf)>. Acesso em: 2 ago. 2017.

DUARTE, Martinez; ALFONSO, Victor; VELÁSQUEZ, Vargas. **DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ANTENA YAGI-UDA**. 2015. 8 f. Monografia (Especialização) - Curso de Telecomunicaciones, Universidad Distrital Francisco José de Caldas., Bogotá, 2015. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/331904676/Antena-Yagi-UdaV2>>. Acesso em: 20 out. 2017.

FERNANDES, Antônio Simão de Carvalho. EVOLUÇÃO E INSERÇÃO HISTÓRICA DA ANTENA. In: FERNANDES, Antônio Simão de Carvalho. **ANTENAS DE ONDA ESTACIONÁRIA: Métodos e Modelos de Análise**. [s. L.]: Fundação Calouste Gulbenkian, 1980. p. 1-8. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/358281228/ANTENAS-2>>. Acesso em: 21 set. 2017.

FARTARIA, Kléber Fortunato. **Parâmetros fundamentais das antenas**. [s. L.]: Vídeo, 2015. 28 slides, color. Disponível em:
<<http://slideplayer.com.br/slide/6098372/>>. Acesso em: 20 set. 2017.

FUSCO, Vincent F.. **Teoria e Técnicas de Antenas: Princípios e Prática**. Porto Alegre: Bookman, 2006. 248 p. José Lucimar do Nascimento.

HOFFMANN, Leandro Toss; GÓMEZ, Arthur Tórgo. Desenvolvimento de um protótipo de um sistema de informação geográfica para abordagem do problema de localização de antenas. **Pesquisa Operacional**, [s.l.], v. 26, n. 3, p.437-458, dez. 2006. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0101-74382006000300001>

IEEE ANTENNAS AND PROPAGATION SOCIETY. **IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas. Standard 145-1993**, 1993.

KRAUS, John D; MARHEFKA, Ronald J; KHAN, Ahmad S. **ANTENNAS AND WAVE PROPAGATION**. 4. ed. Nova Delhi: Mcgraw-hill Education, 2006. 868 p.

LEITHOLD, Angelo Antonio (Org.). **Antenas Linhas de Transmissão - Casamento de Impedância**. Disponível em:
<<https://sites.google.com/site/antenapy5aal/home/antenas-linhas-de-transmissao---casamento-de-impedancia>>. Acesso em: 31 dez. 2017.

MARSHALL, Trevor. **BiQuad 802.11b Antenna**. 2001. Disponível em:
<<http://www.trevormarshall.com/biquad.htm>>. Acesso em: 3 jun. 2017

MELLO, Luiz A. R da Silva; COLCHER, Sérgio. **Redes sem Fio em Banda Larga**. Rio de Janeiro: Puc, 2005. 41 p. Disponível em:
<http://silvamello.org/Luiz_da_Silva_Mello/Apostilas_files/Apost_4_WLAN.pdf>. Acesso em: 2 out. 2017.

MARTÍNEZ, Rubí Inés Salgado. **CARACTERIZACION DE UNA ANTENA YAGI – UDA EN LA BANDA UHF**. 2012. 120 f. TCC (Graduação) - Curso de Ingeniero En Comunicaciones y Electronica, Instituto Politecnico Nacional, México, 2012.

SERRES, Claudio. **Manual general de antenas dipolo**. [s. L.]: S.e.s. Telecoms., 2012. 38 p.

OLIVEIRA, Carla et al. **ABC das Ondas ElectroMagnéticas**. 2004. Disponível em:
<http://monit.it.pt/downloads/file127_pt.pdf>. Acesso em: 24 ago. 2017.

ONDAS e Antenas. [20--]. Disponível em:
<http://doradioamad.dominiotemporario.com/doc/ondas_e_antenas.pdf>. Acesso em: 20 set. 2017.

RAMOS, Robert Eufrazio; GUARNIERI, Fernando Luís. ANTENA LOG-PERIÓDICA ATIVA PARA RECEPÇÃO DE SINAL DE TV ANALÓGICA E DIGITAL (HDTV). In: XII ENCONTRO LATINO AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E VIII ENCONTRO

LATINO AMERICANO DE PÓS-GRADUAÇÃO, 12., 2008, São José dos Campos, Brasil. **Anais...** . São José dos Campos: Univasp, 2008. p. 1 - 4.

RODRIGUES, Josemar S. **ANTENAS PARA RADIOAMADORISMO, RADIOESCUTA E FAIXA DO CIDADÃO**. São José dos Campos, 2009. p.1-182. <Disponível em: http://www.poraodotitanic.com.br/apostila_fazendo_antenas.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2017.

SHIMIZU, Shizue Ideriha. **Relação entre onda eletromagnética e campo**. 20--. Disponível em: <http://fap.if.usp.br/~lumini/g_reflex/conteudo/01eletoptica_shi.htm>. Acesso em: 24 out. 2017.

VASCONCELLOS, Ronaldo. **Segurança em rede sem fio**. Rio de Janeiro: Escola Superior de Redes, 2013. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/doc/157215890/Seguranca-em-Redes-sem-Fio>>. Acesso em: 24 ago. 2017.

RAMACHANDRAN, Prasanna; MINZ, Laxmikant; PARUPALLI, Vamsikrishna. **ANTENNA DESIGN, SIMULATION AND FABRICATION**. 2006. 98 f. TCC (Graduação) - Curso de Technology In Electronics And Communication, Visvesvaraya National Institute Of Technology, Nagpur, 2007. Disponível em: <http://its-wiki.no/images/8/80/Antenna_Design.pdf>. Acesso em: 25 set. 2017.

WONGPAIBOOL, Virach. Review of Amateur-Built 2.4-GHz Wireless-LAN Directional Wire Antennas. **Au Journal Of Technology**. Bangkok, p. 1-11. jun. 2009. Disponível em: <http://www.journal.au.edu/au techno/2009/jul09/journal131_article01.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2017.

APÊNDICE A
VALORES PARA PERDA DE RETORNO (S₁₁)

Na tabela a seguir são listados os valores da perda de retorno (S₁₁) para diversos parâmetros de análise: ROE – relação de onda estacionária; porcentagem de potência transferida pela antena e porcentagem de potência refletida pela antena:

Tabela A - Valores para perda de retorno:

Perda de Retorno	ROE	Potência Radiada	Potência Refletida
dB		%	%
-1	17,39	20,6	79,4
-2	8,72	36,9	63,1
-3	5,85	49,9	50,1
-4	4,42	60,2	39,8
-5	3,57	68,4	31,6
-6	3,01	74,9	25,1
-7	2,61	80	20
-8	2,32	84,2	15,8
-9	2,1	87,4	12,6
-10	1,92	90	10
-11	1,78	92,1	7,9
-12	1,67	93,7	6,3
-13	1,58	95	5
-14	1,5	96	4
-15	1,43	96,8	3,2
-16	1,38	97,5	2,5
-17	1,33	98	2
-18	1,29	98,4	1,6
-19	1,25	98,7	1,3
-20	1,22	99	1
-21	1,2	99,2	0,8
-22	1,17	99,4	0,6
-23	1,15	99,5	0,5
-24	1,13	99,6	0,4
-25	1,12	99,7	0,3
-26	1,11	99,7	0,3
-27	1,09	99,8	0,2
-28	1,08	99,8	0,2
-29	1,07	99,9	0,1
-30	1,07	99,9	0,1
-31	1,06	99,9	0,1

-32	1,05	99,9	0,1
-33	1,05	99,9	0,1
-34	1,04	100	0
-35	1,04	100	0
-36	1,03	100	0
-37	1,03	100	0
-38	1,03	100	0
-39	1,02	100	0
-40	1,02	100	0