

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
CÂMPUS EXPERIMENTAL DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA  
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES

THIAGO COQUIERI PANCRACIO

PROJETO DE UMA ANTENA YAGI-UDA

SÃO JOÃO DA BOA VISTA  
2019

THIAGO COQUIERI PANCRAÇIO

PROJETO DE UMA ANTENA YAGI-UDA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”  
como requisito para obtenção de título de Bacharel em  
Engenharia de Telecomunicações

Orientador: Prof. Dr. Rafael Abrantes Penchel

SÃO JOÃO DA BOA VISTA

2019

Pancraccio, Thiago Coquieri

Projeto de uma antena yagi-uda / Thiago Coquieri Pancraccio. -- São João da Boa Vista, 2019.  
50 p. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso – Câmpus Experimental de São João da Boa Vista – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Abrantes Penchel

Bibliografia

1. Antenas (Eletrônica) 2. Simulação (Computadores) 3. Telecomunicações

CDD 23. ed. – 621.382

Ficha catalográfica elaborada pela [Biblioteca-BJB](#)

Bibliotecário responsável: João Pedro Alves Cardoso – CRB-8/9717

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**  
**CÂMPUS EXPERIMENTAL DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA**  
**GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PROJETO DE UMA ANTENA YAGI-UDA**

Aluno: Thiago Coquieri Pancrácio

Orientador: Prof. Dr. Rafael Abrantes Penchel

Banca Examinadora:

- Rafael Abrantes Penchel (Orientador)
- André Alves Ferreira (Examinador)
- Ivan Aritz Aldaya Garde (Examinador)

|                                                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no prontuário do aluno (Expediente nº 47/2018) |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

São João da Boa Vista, 29 de janeiro de 2019

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a Deus pois ele é a razão de tudo.

Aos meus pais, Maria Clara Coquieri Pancrácio e Valdiro Pancrácio Junior por todo amor, apoio e ensinamentos que me guiaram até hoje.

A minha namorada Julia Danielli Duarte por todo amor, apoio e companheirismo que me proporcionaram motivação para estudar cada vez mais.

Ao meu orientador de trabalho de conclusão de curso Rafael Abrantes Penchel por todos ensinamentos, todas dúvidas tiradas e todo tempo dedicado no desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador de iniciação científica, André Alves Ferreira, que me introduziu no mundo da pesquisa científica, me instigou a desenvolver novos projetos, e foi responsável por me fazer iniciar uma busca incessante por conhecimento.

A todos os professores que lecionaram alguma disciplina durante minha graduação, sem dúvida todos foram importantes para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

E por fim, um agradecimento especial aos professores Marcelo Luís Francisco Abadde, Ivan Aritz Aldaya Garde e Edgar Eduardo Benítez Olivo que fizeram parte dos últimos anos de minha graduação, e conjuntamente com meus orientadores já citados, me inspiram com seu conhecimento.

## RESUMO

A antena Yagi-Uda é uma das antenas mais utilizadas em sistemas de telecomunicações em razão de sua alta diretividade e baixo custo. Pode ser projetada para operar em diferentes faixas espectrais, com maior aplicação em HF, VHF e UHF. As principais características de interesse em uma Yagi-Uda são os ganhos para frente e para trás, largura de banda, impedância de entrada, relação frente-costa e magnitude dos lóbulos laterais. Neste trabalho, a Yagi foi dimensionada para operar na faixa de UHF em 2,45 GHz. Após dimensionada, a antena foi analisada e otimizada no software ANSYS Eletronic Desktop (HFSS) obtendo-se um ganho de 15,89 dBi com dois canais de 20 MHz dentro da banda de operação.

**Palavras-chave:** antenas e propagação, antena Yagi-Uda, simulação eletromagnética, análise paramétrica, HFSS, 2,45 GHz.

## **ABSTRACT / RESUMEN**

The Yagi-Uda antenna is one of the most used antennas in a telecommunications system because of its high directivity and low cost. It can be designed to operate in different spectral ranges, with greater application in HF, VHF and UHF. The radiation characteristics that are usually of interest in a Yagi-Uda antenna are the forward and backward gains, bandwidth, input impedance, front-to-back ratio and the magnitude of minor lobes. In this work, Yagi was scaled to operate in the UHF band at 2,45 GHz. After being scaled, the antenna was analyzed and optimized in ANSYS Eletronic Desktop (HFSS) obtaining a gain of 15,89 dBi with two 20 MHz channels within the bandwidth.

**Keywords / Palabras clave:** antennas and propagation, Yagi-Uda antenna, electromagnetic simulation, parametric analysis, HFSS, 2,45 GHz.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

---

|                                                                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Propriedade agrícola com uma estação central e cinco antenas Yagi-Uda direcionadas para ela. ....                                                                  | 2  |
| Figura 2: Ilustração do arranjo de uma antena Yagi-Uda composto por um elemento refletor, um elemento radiante e sete elementos diretores. ....                              | 5  |
| Figura 3: Modelo mais simples de antena Yagi-Uda com apenas dois elementos, um elemento ativo e um elemento parasita. ....                                                   | 6  |
| Figura 4: Identificação do boom e do gap no arranjo de uma antena Yagi-Uda. ....                                                                                             | 7  |
| Figura 5: Diferença geométrica entre um dipolo dobrado e um dipolo simples. ....                                                                                             | 8  |
| Figura 6: Interligação de um circuito balanceado com um circuito desbalanceado e adaptação de impedância de 4:1 ou 1:4 utilizando um $\lambda/2$ coaxial balun. ....         | 9  |
| Figura 7: Interligação de um circuito balanceado com um circuito desbalanceado sem adaptação de impedância utilizando um $\lambda/4$ coaxial balun. ....                     | 10 |
| Figura 8: Ganho em função do número de elementos de uma antena Yagi-Uda configurada com características ótimas. ....                                                         | 11 |
| Figura 9: Parâmetros configurados na interface do software Yagi Calculator. ....                                                                                             | 14 |
| Figura 10: Balun 4:1 calculado pelo software Yagi Calculator utilizando um cabo coaxial RG-59. ....                                                                          | 19 |
| Figura 11: Primeiro modelo de antena Yagi-Uda criado no software ANSYS HFSS com dipolo simples. ....                                                                         | 23 |
| Figura 12: Vista da lumped port utilizada para alimentação do dipolo simples no arranjo da antena Yagi-Uda criada no software ANSYS HFSS. ....                               | 23 |
| Figura 13: Parâmetro $ S_{11} $ simulado no software ANSYS HFSS para o primeiro modelo da antena Yagi-Uda com dipolo simples e lumped port com 50 $\Omega$ . ....            | 24 |
| Figura 14: Parâmetro $\text{re}\{Z_{11}\}$ simulado no software ANSYS HFSS para o primeiro modelo da antena Yagi-Uda com dipolo simples e lumped port com 50 $\Omega$ . .... | 24 |
| Figura 15: Padrão de irradiação simulado no software ANSYS HFSS para o primeiro modelo da antena Yagi-Uda com dipolo simples e lumped port com 50 $\Omega$ . ....            | 25 |
| Figura 16: Ganho 3D simulado no software ANSYS HFSS para o primeiro modelo da antena Yagi-Uda com dipolo simples e lumped port com 50 $\Omega$ . ....                        | 26 |
| Figura 17: Parâmetro $ S_{11} $ simulado no software ANSYS HFSS para o modelo da antena Yagi-Uda com dipolo simples e lumped port com 21,14 $\Omega$ . ....                  | 27 |
| Figura 18: Dipolo simples com mesma dimensão e características do utilizado no primeiro modelo simulado no software ANSYS HFSS porém isolado do arranjo. ....                | 27 |
| Figura 19: Parâmetro $\text{re}\{Z_{11}\}$ simulado no software ANSYS HFSS para o dipolo simples isolado e lumped port com 50 $\Omega$ . ....                                | 28 |
| Figura 21: Segundo modelo de antena Yagi-Uda criado no software ANSYS HFSS com dipolo dobrado. ....                                                                          | 29 |
| Figura 22: Equação de uma superelipse utilizada para criar o dipolo dobrado no ANSYS HFSS. ....                                                                              | 29 |
| Figura 23: Parâmetro $ S_{11} $ simulado no software ANSYS HFSS para o segundo modelo da antena Yagi-Uda com dipolo dobrado e lumped port de 50 $\Omega$ . ....              | 30 |
| Figura 24: Parâmetro $\text{re}\{Z_{11}\}$ simulado no software ANSYS HFSS para o segundo modelo da antena Yagi-Uda com dipolo dobrado e lumped port de 50 $\Omega$ . ....   | 31 |
| Figura 25: Padrão de irradiação simulado no software ANSYS HFSS para o segundo modelo da antena Yagi-Uda com dipolo dobrado e lumped port de 50 $\Omega$ . ....              | 31 |
| Figura 26: Ganho 3D simulado no software ANSYS HFSS para o segundo modelo da antena Yagi-Uda com dipolo dobrado e lumped port de 50 $\Omega$ . ....                          | 32 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 27: Parâmetro $ S_{11} $ simulado no software ANSYS HFSS para o modelo da antena Yagi-Uda com dipolo dobrado e lumped port de 83,78 $\Omega$ .                                                                                                                           | 33 |
| Figura 28: Dipolo dobrado com mesma dimensão e características do utilizado no segundo modelo simulado no software ANSYS HFSS porém isolado do arranjo.                                                                                                                         | 33 |
| Figura 29: Parâmetro $\text{re}\{Z_{11}\}$ simulado no software ANSYS HFSS para o dipolo dobrado isolado e lumped port com 50 $\Omega$ .                                                                                                                                        | 34 |
| Figura 31: Parâmetro $ S_{11} $ simulado no software ANSYS HFSS para o modelo da antena Yagi-Uda com dipolo simples e lumped port com 21,14 $\Omega$ . O modelo conta com uma análise paramétrica no comprimento do dipolo, variando entre 49 e 55 mm com passo linear de 1 mm. | 35 |
| Figura 32: Parâmetro $ S_{11} $ simulado no software ANSYS HFSS para o modelo da antena Yagi-Uda com dipolo simples de comprimento igual a 52 mm e lumped port com 21,14 $\Omega$ .                                                                                             | 36 |
| Figura 33: Padrão de Irradiação simulado no software ANSYS HFSS para o modelo da antena Yagi-Uda com dipolo simples de comprimento igual a 52 mm e lumped port com 21,14 $\Omega$ .                                                                                             | 37 |
| Figura 34: Ganho 3D simulado no software ANSYS HFSS para o modelo da antena Yagi-Uda com dipolo simples de comprimento igual a 52 mm e lumped port com 21,14 $\Omega$ .                                                                                                         | 37 |

## LISTA DE TABELAS

---

|                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Espaçamento ótimo entre os elementos de uma antena Yagi-Uda em comprimento de onda.....                                      | 11 |
| Tabela 2: Comprimento dos diretores de uma antena Yagi-Uda em comprimento de onda....                                                  | 12 |
| Tabela 3: Ganho em função do número de elementos diretores da antena Yagi-Uda em 2,45 GHz calculado pelo Yagi calculator.....          | 17 |
| Tabela 4: Comprimento e posição no boom dos elementos calculados pelo Yagi Calculator.                                                 | 18 |
| Tabela 5: Comparação entre o comprimento dos elementos descritos por Balanis, Ribeiro e calculados pelo software Yagi Calculator. .... | 20 |
| Tabela 6: Comparação da distância entre os elementos descritos por Balanis, Ribeiro e calculados pelo software Yagi Calculator. ....   | 21 |
| Tabela 7: Variáveis utilizadas na equação do elipsoide para criar o modelo do dipolo dobrado no software ANSYS HFSS.....               | 30 |

## LISTA DE ACRÔNIMOS

---

|        |                                                     |
|--------|-----------------------------------------------------|
| ANATEL | Agência Nacional de Telecomunicações                |
| EIRP   | Potência Equivalente Isotropicamente Irradiada      |
| HF     | High Frequency                                      |
| HFSS   | High Frequency Structure Simulator                  |
| HPBW   | Half Power Beam Width                               |
| IEEE   | Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos |
| IoT    | Internet of Things                                  |
| ISM    | Industrial Sientific and Medical                    |
| PML    | Perfect Matched Layer                               |
| PVC    | Policloreto de Vinila                               |
| RBMGA  | Real Biased Multiobjective Genetic Algorithm        |
| RF     | Radiofrequência                                     |
| UHF    | Ultra High Frequency                                |
| VHF    | Very High Frequency                                 |

## SUMÁRIO

---

|                                         |           |
|-----------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO.....</b>               | <b>1</b>  |
| 1.1. MOTIVAÇÃO .....                    | 1         |
| 1.2. OBJETIVOS .....                    | 3         |
| 1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....      | 4         |
| <b>2. ANTENAS YAGI-UDA .....</b>        | <b>5</b>  |
| <b>3. METODOLOGIA .....</b>             | <b>14</b> |
| <b>4. ANÁLISE ELETROMAGNÉTICA .....</b> | <b>22</b> |
| <b>5. CONCLUSÃO.....</b>                | <b>39</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. MOTIVAÇÃO

Esse trabalho surgiu com o intuito de desenvolver uma antena para operar em sistemas baseados na Internet das Coisas (IoT - *Internet of Things*) em áreas agrícolas. A escolha da antena Yagi-Uda, assim como seus parâmetros de projeto foram determinados pelo alto ganho e diretividade, baixo custo, baixo peso, facilidade de construção e operação em 2,45 GHz.

A Internet é hoje a maior rede de computadores existente e interliga grande parte do planeta Terra. Para acessar objetos inteligentes de qualquer lugar do mundo basta então que eles estejam conectados a essa rede. A IoT é um conceito de Telecomunicações e considera a presença de diversos objetos/coisas inteligentes e interligados dentro de um determinado ambiente, e por meio de comunicação (guiadas e não guiadas) esses objetos se tornam capazes de interagir e trabalhar em conjunto, uns com os outros, a fim de realizar tarefas pré-determinadas. Expandindo estes ambientes inteligentes, cria-se um mundo inteligente com objetos conectados a toda hora e em todo lugar. Nos últimos anos a IoT vem crescendo e se popularizando exponencialmente. Diversos sistemas baseados na IoT surgiram, como casas inteligentes, carros autônomos e cidades inteligentes.

O Brasil possui uma forte atividade econômica relacionada a atividades agrícolas e, de maneira geral, grande parte das regiões utilizadas para essas atividades possuem um acesso limitado à Internet por falta de infraestrutura. Assim, a fim de implementar a IoT em áreas agrícolas surge a necessidade de criar uma infraestrutura capaz de conectar essas áreas remotas.

Neste contexto está o foco do trabalho. Sabe-se que um sinal pode ser transmitido por meio de meios guiados ou não guiados. Uma área agrícola possui grandes extensões territoriais e para conecta-las por meio de meios guiados seria necessário um gasto muito alto com infraestrutura. Os meios guiados precisam de um “caminho” para percorrer gerando altos custos. Dessa forma, o meio não guiado se apresenta como alternativa de menor custo, por meio de propagação de ondas eletromagnéticas que carregam os sinais de informação, e assim a comunicação é estabelecida.

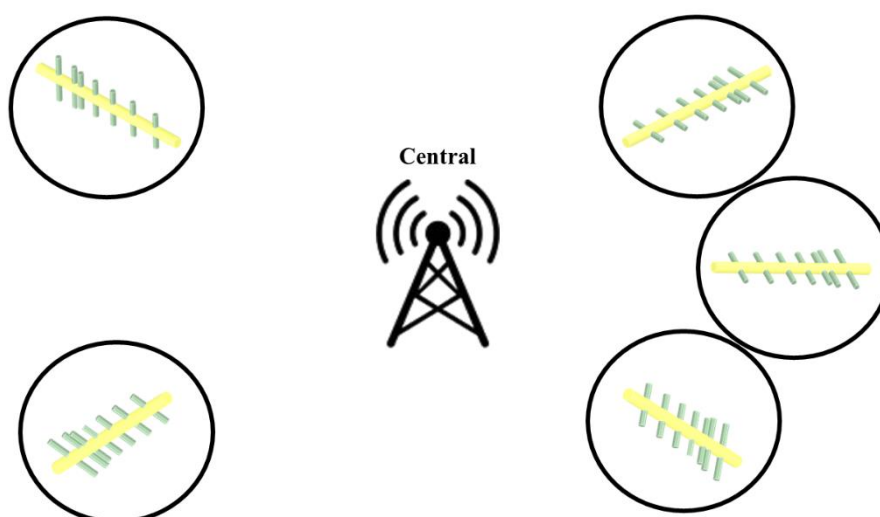
É importante lembrar que cada área possui uma peculiaridade (relevo, vegetação, clima, etc) e precisa-se desenvolver um sistema que atenda de maneira mais genérica possível todas elas. A propagação por meio não guiado novamente é a melhor opção para atender tais necessidades principalmente por possuir melhor relação custo/benefício em áreas agrícolas. Assim,

para uma comunicação em meio não guiado é necessário projetar o sistema de RF, em particular as antenas.

A principal aplicação da IoT nas áreas rurais está relacionada com o monitoramento das condições climáticas e do solo, ou seja, sensores capturam dados de umidade do ar e do solo, temperatura do ar e do solo e velocidade do vento e transmitem esses dados para alguma central que os monitore, mapeie e tome decisões rápidas em resposta a determinadas situações. Um bom exemplo é o controle de irrigação por meio do monitoramento da umidade do solo, quando a umidade do solo estiver muito baixa, automaticamente é acionado o sistema de irrigação em resposta. Além dessa aplicação, pode-se citar também o controle autônomo de veículos agrícolas e o monitoramento de propriedades por meio de *drones*.

Nessas condições, tem-se a necessidade de desenvolver uma antena de alto ganho e diretividade, permitindo posicionar várias dessas antenas em pontos específicos dentro de uma propriedade agrícola que possua objetos inteligentes. Sendo uma antena diretiva, é possível posicioná-la voltada para uma central dentro dessa propriedade, ou ainda, se houver distâncias muito grandes ou obstruções, pode-se utilizar estações retransmissoras. A figura 1 representa uma propriedade agrícola com cinco antenas Yagi-Uda posicionadas em diferentes áreas dentro da propriedade e direcionadas para uma central.

Figura 1: Propriedade agrícola com uma estação central e cinco antenas Yagi-Uda direcionadas para ela.



Fonte: do autor

Dentre os diversos modelos existentes de antenas direcionais destacam-se as antenas parabólica, helicoidal, piramidal e Yagi-Uda. A antena Yagi-Uda foi escolhida por conta de

algumas características importantes de projeto: baixo peso, baixo custo, simplicidade de construção e alto ganho. Por ser uma antena leve, a antena Yagi-Uda não necessita uma estrutura muito resistente para sua sustentação, facilitando o posicionamento de uma torre em qualquer ponto das áreas agrícolas.

A maioria das antenas Yagi-Uda são construídas com tubos de alumínio. Os tubos de alumínio representam praticamente toda a estrutura da antena. Outros materiais necessários para a construção variam de acordo com o modelo de Yagi-Uda, porém, são materiais baratos e que podem ser encontrados com facilidade no mercado além de possuírem baixo custo. Uma antena Yagi-Uda pode ser montada por qualquer pessoa e não exige nenhum tipo de ferramenta incomum. Uma pequena oficina ou até mesmo uma caixa de ferramentas garantem o necessário para sua construção.

A antena Yagi-Uda pode ser projetada para operar em diferentes faixas espectrais, com maior aplicação em HF (3-30 MHz), VHF (30-300 MHz) e UHF (0,3-3 GHz). Neste trabalho ela será projetada para operar na frequência central de 2,45 GHz. Essa frequência foi escolhida por estar incluída nas faixas de frequência da Industrial, Científica e Médica (ISM - Industrial, Scientific and Medical). Essas faixas não requerem licença para utilização e possuem um número reduzido de regras para operação. Em contrapartida, possuem limite para a potência máxima de transmissão e para a largura de banda. No Brasil, a legislação para sistemas de telecomunicações é definida pela ANATEL por meio da resolução 680 de Jun/2017. As bandas da ISM contemplam de 902 a 907,5 MHz, 915 a 928 MHz, 2400 a 2483,5 MHz e 5725 a 5875 MHz (ANATEL, 2017). Outro fator importante na escolha da frequência é a existência de diversos dispositivos de telecomunicações modernos que operam nessa banda, como WIFI e Bluetooth.

## **1.2. OBJETIVOS**

O objetivo deste trabalho é projetar e dimensionar uma antena Yagi-Uda que obtenha ganho superior a 12 dBd (14,14 dBi) na frequência central de 2,45 GHz e perda de retorno maior do que 10 dB na faixa de 2,429 a 2,471 GHz a fim de comportar dois canais de 20 MHz (comunicação *full duplex*) e uma banda de guarda de 2 MHz. Para tal, deverão ser otimizados diversos parâmetros de projeto, como a quantidade de elementos, o tamanho dos elementos e a posição dos elementos no arranjo da Yagi-Uda.

Além disso, criar um modelo paramétrico dessa antena no HFSS, simular as condições de propagação, analisar a perda de retorno, a impedância de entrada, a diretividade e o ganho. Ainda por meio de simulação, comparar o desempenho da antena sob diferentes configurações do arranjo e determinar a configuração que melhor se adeque nos objetivos.

Por fim, mas não menos importante, estudar os conceitos envolvidos no projeto e funcionamento de uma antena Yagi-Uda, deixando claro neste trabalho como projetá-la e construí-la na prática.

### **1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

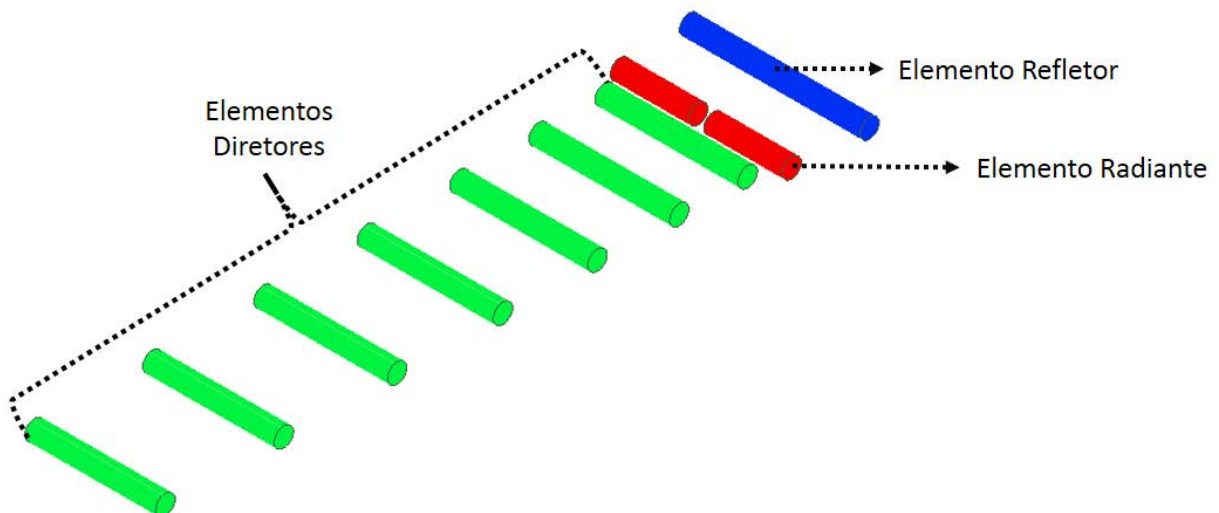
No capítulo 1 é apresentada uma introdução com a motivação, os objetivos e a organização do trabalho. Em seguida, no capítulo 2 está uma revisão bibliográfica apresentando os principais conceitos envolvidos no projeto e análise de uma antena Yagi-Uda. O capítulo 3 possui a metodologia utilizada para o desenvolvimento de um modelo inicial de antena Yagi-Uda a fim de analisa-la e otimiza-la com simulações no *software* ANSYS HFSS. Já no capítulo 4 estão os modelos, resultados e análises eletromagnéticas realizadas. Por fim, no capítulo 5 é apresentado a conclusão do trabalho.

## 2. ANTENAS YAGI-UDA

A versão original da antena Yagi-Uda foi descrita pela primeira vez em artigos do periódico do IEEE do Japão em 1926 por Shintaro Uda da Universidade Imperial Tohoku, Japão. (Uda, 1926) Algum tempo depois, seu colega Hidetsugu Yagi descreveu em inglês o mesmo funcionamento, em um artigo muito mais circulado, constituindo assim o nome Yagi-Uda. (Yagi, 1927)

A antena Yagi-Uda é caracterizada por um arranjo de elementos composto por: um elemento refletor, um elemento radiante e um ou mais elementos diretores. A alimentação da antena é feita no elemento radiante, que por sua vez é o único elemento ativo do arranjo. Na literatura encontra-se o termo “*driven element*” para referenciar o elemento ativo e na maioria das antenas Yagi-Uda é utilizado um dipolo simples ou um *folded dipole* como elemento radiante. Em português, o *folded dipole* é chamado de dipolo dobrado. O elemento refletor e os elementos diretores agem como parasitas. Dessa forma, o elemento ativo é excitado diretamente pela fonte de sinal e os elementos parasitas são excitados indiretamente por meio de indução mútua. Os diretores são posicionados na direção máximo de irradiação, a fim de concentrar os campos eletromagnéticos nessa direção, e o refletor é posicionado na direção contrária a direção de propagação a fim de reduzir os campos da direção contrária a direção de propagação, aumentando a relação frente-costa. A figura 2 apresenta um modelo de antena Yagi-Uda e identifica os três grupos de elementos.

Figura 2: Ilustração do arranjo de uma antena Yagi-Uda composto por um elemento refletor, um elemento radiante e sete elementos diretores.



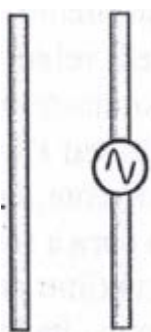
Fonte: do autor

Para entender melhor o comportamento de uma antena Yagi-Uda, será feita uma análise por meio de seu modelo mais simples, com apenas dois elementos, um elemento ativo e um elemento parasita, conforme ilustrado na figura 3.

Sabe-se que a parte real da impedância de um dipolo de meia onda isolado é de aproximadamente  $73 \Omega$ . Essa impedância só é medida quando o dipolo está isolado, no caso da figura 3, onde existem dois dipolos, mesmo que apenas um deles seja ativo, a impedância assume um novo valor referente ao arranjo. A impedância da antena Yagi-Uda não é simplesmente igual a impedância própria do dipolo de meia onda, uma nova impedância é gerada por conta do fluxo de corrente existente em todos os elementos do arranjo. Esse fluxo de corrente é gerado por meio da indução mútua, onde o elemento ativo que foi excitado diretamente pela fonte de sinal, irradia campos eletromagnéticos que excitam por sua vez os elementos passivos, e uma vez excitados, os elementos passivos também irradiam campos eletromagnéticos excitando outros elementos, por isso o nome indução mútua, todos os elementos do arranjo induzem corrente elétrica uns nos outros. Essa nova impedância do arranjo, que foi gerada com a indução mútua, recebe o nome de impedância mútua. Na antena Yagi-Uda a impedância mútua depende da separação entre os elementos. Assim, a relação entre a impedância própria e a impedância mútua, determina a amplitude e a fase da corrente induzida nos elementos parasitas. (Ribeiro, 2012)

Analisando ainda a figura 3, conforme a distância entre o elemento ativo e o elemento parasita aumenta, o comportamento da antena se aproxima do de um dipolo isolado. Conforme os elementos se aproximam, a antena adquire comportamento de maior diretividade e alteração na impedância de entrada. Além disso, quanto menor for o espaçamento entre os elementos, menor é a parte real da impedância. (Ribeiro, 2012)

Figura 3: Modelo mais simples de antena Yagi-Uda com apenas dois elementos, um elemento ativo e um elemento parasita.

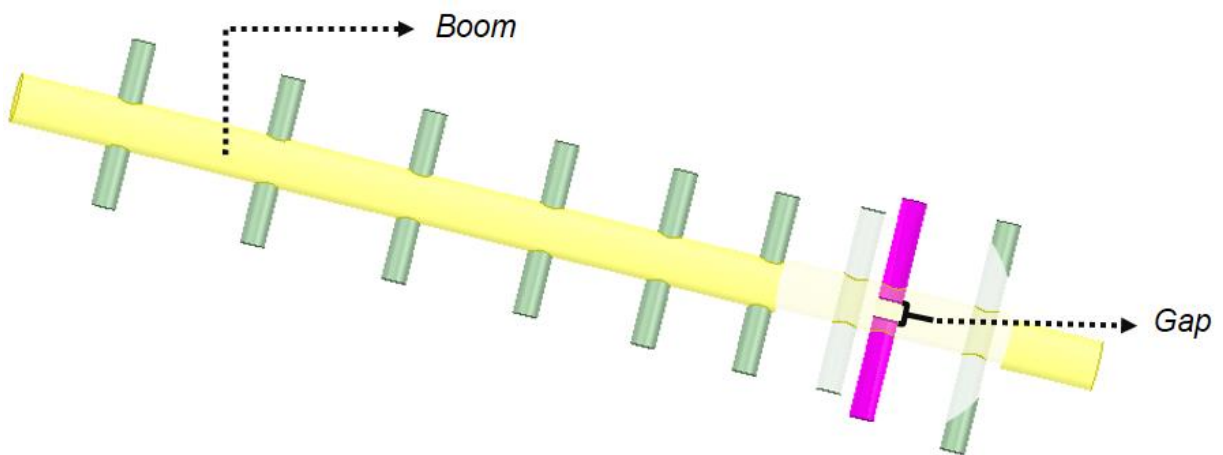


Fonte: Ribeiro, 2012.

Observa-se na figura 4 que o elemento radiante é dividido em dois. É muito comum encontrar esse elemento unido em literaturas, na prática, porém, é necessário que exista essa distância para fazer a alimentação da antena com o polo positivo da fonte de sinal em uma das divisões e o polo negativo na outra. O nome do espaçamento existente entre as duas partes do elemento radiante é *gap*. O tamanho do *gap* é um importante fator para o dimensionamento de uma Yagi-Uda. Com exceção do elemento ativo, os elementos parasitas não possuem um *gap*, e na região que ocorreria a excitação desses elementos parasitas é feito um curto-circuito.

Na prática, também é necessário adicionar uma estrutura que sustente todos os elementos em sua respectiva posição. O objeto em questão é chamado de *boom*. O *boom* pode ser projetado tanto com material isolante como com material condutor. Em português, algumas bibliografias utilizam o termo gôndola ao invés de *boom*. A figura 4 identifica o *boom* no arranjo de uma antena Yagi-Uda.

Figura 4: Identificação do *boom* e do *gap* no arranjo de uma antena Yagi-Uda.



Fonte: do autor

Na maioria dos projetos de antena Yagi-Uda são utilizados dipolos de meia em todos os elementos (refletor, radiante e diretores). Ou seja, a antena Yagi é composta por um arranjo de dipolos de meia onda. Para realizar a alimentação de uma antena existem diferentes tipos de linhas de transmissão, cada qual com uma impedância característica. O cabo coaxial é uma das linhas de transmissão mais utilizadas e possui impedância característica padronizada de 50 ou 75  $\Omega$ . Para obter o máximo desempenho de uma antena, é necessário que a linha de transmissão esteja casada com a antena e ao mesmo tempo a antena esteja casada com o espaço livre.

O comprimento de um dipolo simples pode variar entre  $\lambda/4 \leq l \leq \lambda$ . O dipolo simples mais utilizado possui comprimento  $l = \lambda/2$  e impedância  $Z = (73 + j42,5) \Omega$ . Dessa forma, ao

utilizar um dipolo de  $\lambda/2$  alimentado por um cabo coaxial, obtém-se um casamento de impedância entre o dipolo e a linha de transmissão, porém, não existe um casamento entre o dipolo e o espaço livre, visto que a impedância característica do espaço livre é aproximadamente  $377 \Omega$ . Uma das formas mais utilizadas para otimizar o casamento é a substituição do dipolo simples por um dipolo dobrado. A figura 5 mostra as diferenças geométricas desses dois dipolos.

Figura 5: Diferença geométrica entre um dipolo dobrado e um dipolo simples.



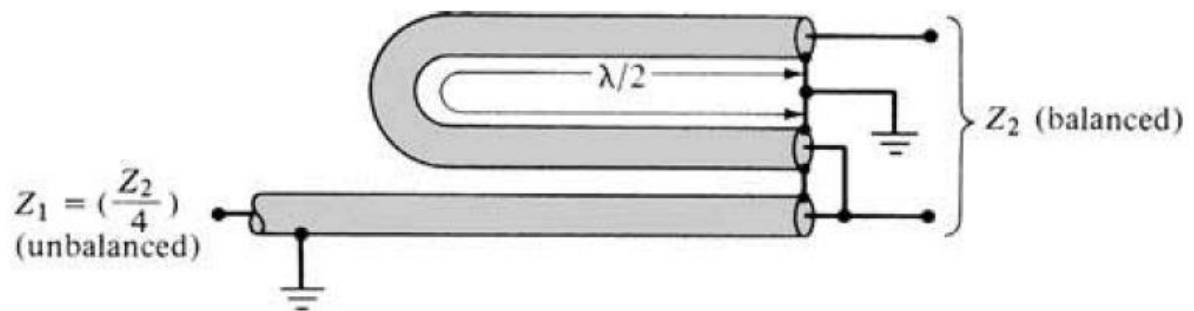
Fonte: do autor

Quando isolado, o dipolo dobrado possui impedância característica de  $300 \Omega$ , já em um arranjo de elementos como no caso de uma antena Yagi-Uda essa impedância pode variar. A impedância do dipolo dobrado se aproxima da impedância do espaço livre, dessa forma aproxima-se a um casamento de impedância entre eles. Porém, se for mantido como linha de transmissão um cabo coaxial haverá descasamento entre a antena e a linha de transmissão. Mas esse problema pode ser solucionado com a utilização de uma linha de transmissão com impedância de  $300 \Omega$ , como a *Twin-lead*, que é muito utilizada para aplicações de televisão, ou o cabo de par-trançado. Pode-se ainda continuar com a utilização de um cabo coaxial conjuntamente a um sistema adaptador de impedância, como um transformador de quarto de onda.

Para evitar perdas por reflexão na interface entre os meios (linha de transmissão/antena e antena/espaço livre) seria necessário que a linha de transmissão, a antena e o espaço livre possuísem a mesma impedância característica. Como não é possível utilizar um adaptador de impedância entre a antena e o espaço livre, o ideal é utilizar um elemento ativo com impedância característica o mais próximo possível da impedância do espaço livre. Assim, na interface entre a linha de transmissão e a antena pode ser utilizado um adaptador de impedância. Vale ressaltar que essa adaptação entre a antena e o espaço livre não é possível no caso de uma antena Yagi-Uda. Já em uma antena corneta por exemplo, é possível adaptar a impedância de acordo com a abertura da corneta.

Nos projetos de antena Yagi-Uda, o adaptador de impedância mais utilizado é o *balun* (*balanced to unbalanced*), isso porque além de servir como interligação entre circuitos balanceados e circuitos desbalanceados ele também pode ser projetado para fornecer adaptações de impedância. Uma linha de transmissão balanceada consiste de dois condutores de um mesmo tipo, com impedância constante ao longo do comprimento e mesma impedância com o terra ou outros circuitos. *Twin-lead* e Par-trançado são exemplos de linha de transmissão balanceadas, cabo coaxial é exemplo de linha de transmissão desbalanceada. Isso é necessário quando uma antena balanceada (dipolo) é alimentada com um cabo coaxial, por exemplo. A figura 6 apresenta o  $\lambda/2$  coaxial *balun* (4:1 ou 1:4), muito utilizado nos projetos de antenas Yagi-Uda por interligar o cabo coaxial que é desbalanceado e possui  $Z_1 = 75 \Omega$  a um dipolo dobrado que é balanceado e possui  $Z_2 = 300 \Omega$ .

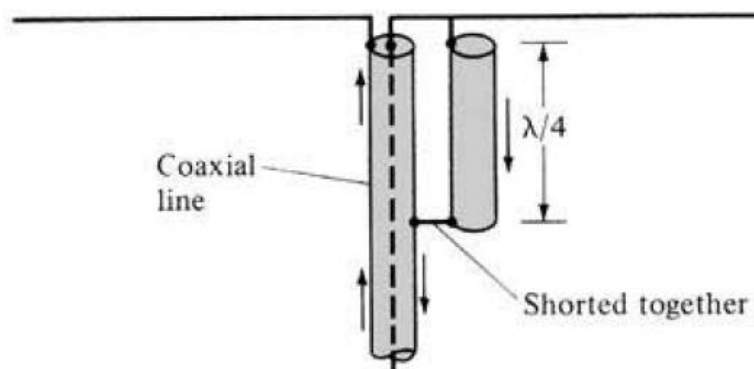
Figura 6: Interligação de um circuito balanceado com um circuito desbalanceado e adaptação de impedância de 4:1 ou 1:4 utilizando um  $\lambda/2$  coaxial balun.



Fonte: Balanis, 2005.

O *balun* pode ser utilizado apenas como interface entre circuitos balanceados e desbalanceados caso exista casamento de impedância. Esse é o caso da interligação de um cabo coaxial (desbalanceado), que possui impedância aproximada de  $75 \Omega$ , com um dipolo simples (balanceado), que possui impedância aproximada de  $75 \Omega$ . A impedância está casada, porém ainda é necessário unir um circuito balanceado a outro desbalanceado. O  $\lambda/4$  coaxial *balun* (1:1) pode ser utilizado nessa situação conforme a figura 7.

Figura 7: Interligação de um circuito balanceado com um circuito desbalanceado sem adaptação de impedância utilizando um  $\lambda/4$  coaxial balun.

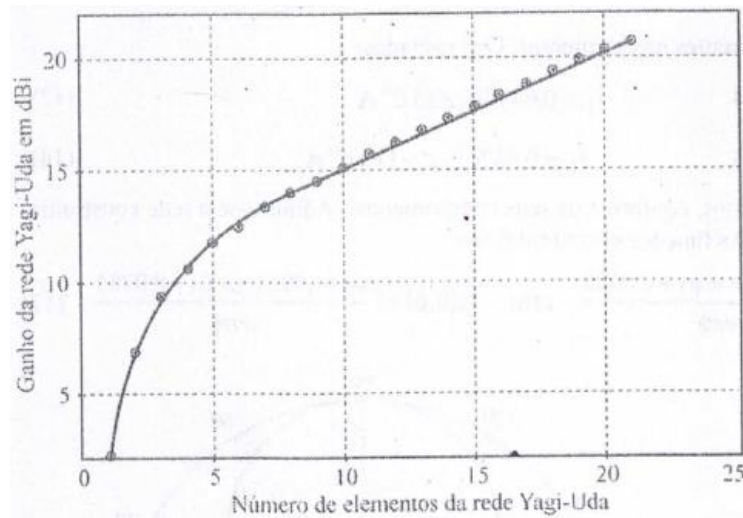


Fonte: Balanis, 2005.

O dipolo possui diferentes comprimentos de ressonância, próximos de  $\lambda/2$ ,  $\lambda$ ,  $3\lambda/2$  e assim por diante. A primeira ressonância é a mais utilizada e pode ser alcançada com um comprimento ligeiramente menor que  $\lambda/2$ . Geralmente a distância entre os diretores está entre  $0,3\lambda$  e  $0,4\lambda$  e não precisa ser uniforme para projetos ótimos. Projetos ótimos são descritos na literatura como projetos que buscam obter o máximo ganho de uma antena Yagi-Uda. O raio dos diretores deve ser inferior a  $0,024\lambda$ . O comprimento do refletor é um pouco maior do que o comprimento do elemento ativo. Por fim, a separação entre o elemento ativo e o elemento refletor é de aproximadamente  $0,25\lambda$ . O elemento parasita com comprimento maior que o comprimento de ressonância e espaçamento adequado em relação aos elementos adjacentes no arranjo, adquire impedância indutiva, dessa forma as fases da corrente criada atrasam as fases do campo eletromagnético, e assim o elemento parasita age com um refletor. Já o elemento parasita com comprimento menor que o comprimento de ressonância e espaçamento adequado em relação aos elementos adjacentes no arranjo, adquire impedância capacitiva e as correntes se tornam aproximadamente iguais em magnitude e com deslocamentos de fase uniformemente progressivos, dessa forma a corrente criada nesse elemento conduz o campo eletromagnético e ele age como um diretor. (Balanis, 2005)

Experimentos demonstram que quando uma antena Yagi-Uda é configurada com características ótimas, o ganho se torna proporcional ao comprimento total do arranjo. Porém, a medida que o comprimento aumenta, existe um menor crescimento do ganho. A figura 8 mostra um gráfico do ganho da antena Yagi-Uda em função do número de elementos.

Figura 8: Ganho em função do número de elementos de uma antena Yagi-Uda configurada com características ótimas.



Fonte: Ribeiro, 2012.

A seguir são apresentadas duas equações que regem o gráfico do ganho:

$$G_0 = 0,0279N^2 + 3,2021N - 1,5890 \quad (1 \leq N \leq 7) \quad (2.1)$$

$$G_0 = (9,603 + 0,0103N) \exp(0,1186N) \quad (7 \leq N \leq 21) \quad (2.2)$$

Onde N é o número de elementos no arranjo da antena Yagi-Uda.

As tabelas 1 e 2 apresentam as características ótimas de projeto adquiridas a partir de fórmulas empíricas e experimentos. O comprimento ótimo de uma antena Yagi-Uda é medido entre o elemento refletor e o último elemento diretor. Esse comprimento total deve ser distribuído entre todos os elementos do arranjo. A seguir é apresentada uma equação para o cálculo do comprimento ótimo de uma antena Yagi-Uda a partir do número de elementos.

$$L_{Yagi-Uda} = (0,0066N^2 + 0,2094N - 0,3353) \lambda \quad (2.3)$$

O espaçamento ótimo entre os elementos é apresentado na tabela 1.

Tabela 1: Espaçamento ótimo entre os elementos de uma antena Yagi-Uda em comprimento de onda.

| N | $d_{re}$ | $d_{ed}$ | $d_{12}$ | $d_{23}$ | $d_{34}$ | $d_{45}$ | $d_{56}$ | $d_{67}$ |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 2 | 0,15     |          |          |          |          |          |          |          |
| 2 |          | 0,15     |          |          |          |          |          |          |
| 3 | 0,18     | 0,17     |          |          |          |          |          |          |
| 4 | 0,2      | 0,15     | 0,15     |          |          |          |          |          |
| 5 | 0,22     | 0,17     | 0,2      | 0,23     |          |          |          |          |
| 6 | 0,18     | 0,15     | 0,23     | 0,28     | 0,3      |          |          |          |

|            |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 7          | 0,17 | 0,14 | 0,22 | 0,31 | 0,28 | 0,28 |      |
| 8          | 0,16 | 0,15 | 0,18 | 0,25 | 0,17 | 0,27 | 0,32 |
| $N \geq 9$ | 0,18 | 0,15 | 0,2  | 0,27 | 0,29 | 0,29 | 0,36 |

Fonte: Adaptado de Ribeiro, 2012.

Após determinar a separação entre os elementos deve-se calcular o comprimento dos elementos diretores. O comprimento dos diretores leva em consideração a ordem do diretor e o diâmetro dos condutores. Existem também projetos que procuram simplificar a montagem mantendo o comprimento e o espaçamento dos diretores iguais. A tabela 2 apresenta o comprimento ótimo dos diretores.

Tabela 2: Comprimento dos diretores de uma antena Yagi-Uda em comprimento de onda.

| $\lambda/2a$ | $D_1$ | $D_2$ | $D_3$ | $D_4$ | $D_5$ | $D_6$  | $D_7$ | $D_8$ | $D_9$ | $D_{10}$ | $D_{11-20}$ |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|----------|-------------|
| 25           | 0,414 | 0,407 | 0,41  | 0,414 | 0,41  | 0,405  | 0,403 | 0,402 | 0,4   | 0,4      | 0,4         |
| 30           | 0,418 | 0,411 | 0,414 | 0,418 | 0,414 | 0,41   | 0,407 | 0,406 | 0,404 | 0,404    | 0,404       |
| 35           | 0,422 | 0,415 | 0,417 | 0,421 | 0,417 | 0,414  | 0,41  | 0,409 | 0,407 | 0,407    | 0,407       |
| 40           | 0,426 | 0,418 | 0,42  | 0,423 | 0,42  | 0,418  | 0,413 | 0,412 | 0,41  | 0,41     | 0,41        |
| 45           | 0,428 | 0,421 | 0,423 | 0,426 | 0,423 | 0,421  | 0,416 | 0,415 | 0,413 | 0,413    | 0,413       |
| 50           | 0,431 | 0,423 | 0,425 | 0,428 | 0,425 | 0,424  | 0,418 | 0,417 | 0,415 | 0,415    | 0,415       |
| 55           | 0,433 | 0,425 | 0,427 | 0,43  | 0,427 | 0,425  | 0,42  | 0,419 | 0,417 | 0,417    | 0,417       |
| 60           | 0,434 | 0,426 | 0,428 | 0,432 | 0,428 | 0,426  | 0,421 | 0,42  | 0,418 | 0,418    | 0,418       |
| 65           | 0,436 | 0,428 | 0,43  | 0,433 | 0,43  | 0,427  | 0,423 | 0,422 | 0,42  | 0,42     | 0,42        |
| 70           | 0,437 | 0,429 | 0,431 | 0,435 | 0,431 | 0,428  | 0,424 | 0,423 | 0,421 | 0,421    | 0,421       |
| 75           | 0,438 | 0,43  | 0,432 | 0,436 | 0,432 | 0,429  | 0,425 | 0,424 | 0,423 | 0,423    | 0,423       |
| 80           | 0,439 | 0,431 | 0,433 | 0,437 | 0,433 | 0,43   | 0,426 | 0,425 | 0,424 | 0,424    | 0,424       |
| 85           | 0,44  | 0,432 | 0,434 | 0,439 | 0,434 | 0,431  | 0,427 | 0,426 | 0,425 | 0,425    | 0,425       |
| 90           | 0,441 | 0,433 | 0,435 | 0,44  | 0,435 | 0,432  | 0,428 | 0,427 | 0,426 | 0,426    | 0,426       |
| 95           | 0,442 | 0,434 | 0,436 | 0,441 | 0,436 | 0,4432 | 0,429 | 0,428 | 0,427 | 0,427    | 0,427       |
| 100          | 0,443 | 0,435 | 0,437 | 0,442 | 0,437 | 0,433  | 0,43  | 0,429 | 0,428 | 0,427    | 0,427       |
| 150          | 0,45  | 0,44  | 0,443 | 0,447 | 0,442 | 0,437  | 0,435 | 0,435 | 0,433 | 0,432    | 0,431       |
| 200          | 0,453 | 0,443 | 0,446 | 0,45  | 0,445 | 0,44   | 0,438 | 0,438 | 0,436 | 0,431    | 0,435       |
| 250          | 0,455 | 0,446 | 0,448 | 0,452 | 0,447 | 0,443  | 0,441 | 0,441 | 0,439 | 0,438    | 0,438       |
| 300          | 0,457 | 0,448 | 0,45  | 0,454 | 0,449 | 0,445  | 0,443 | 0,443 | 0,441 | 0,44     | 0,44        |
| 350          | 0,459 | 0,45  | 0,451 | 0,455 | 0,451 | 0,447  | 0,444 | 0,444 | 0,442 | 0,442    | 0,442       |
| 375          | 0,46  | 0,451 | 0,452 | 0,456 | 0,452 | 0,448  | 0,445 | 0,445 | 0,443 | 0,443    | 0,443       |
| 400          | 0,462 | 0,452 | 0,453 | 0,457 | 0,453 | 0,449  | 0,446 | 0,446 | 0,444 | 0,444    | 0,444       |
| 450          | 0,463 | 0,453 | 0,454 | 0,459 | 0,454 | 0,45   | 0,447 | 0,447 | 0,446 | 0,445    | 0,445       |
| 500          | 0,465 | 0,454 | 0,455 | 0,46  | 0,455 | 0,451  | 0,448 | 0,448 | 0,447 | 0,446    | 0,446       |

Fonte: Adaptado de Ribeiro, 2012.

A primeira ressonância do dipolo aparece quando o comprimento é ligeiramente menor que  $\lambda/2$ , a equação a seguir pode ser utilizada para encontrar o comprimento do elemento radiador em função do comprimento de onda e do diâmetro do condutor:

$$l = \frac{\lambda}{2} \left\{ 1 + \frac{0,3138}{0,7904 \ln\left(\frac{\lambda}{d}\right) + [0,2133 \ln\left(\frac{\lambda}{d}\right)]^2} \right\}^{-1} \quad (2.4)$$

Onde  $d$  é o diâmetro do condutor, e  $\lambda$  o comprimento de onda.

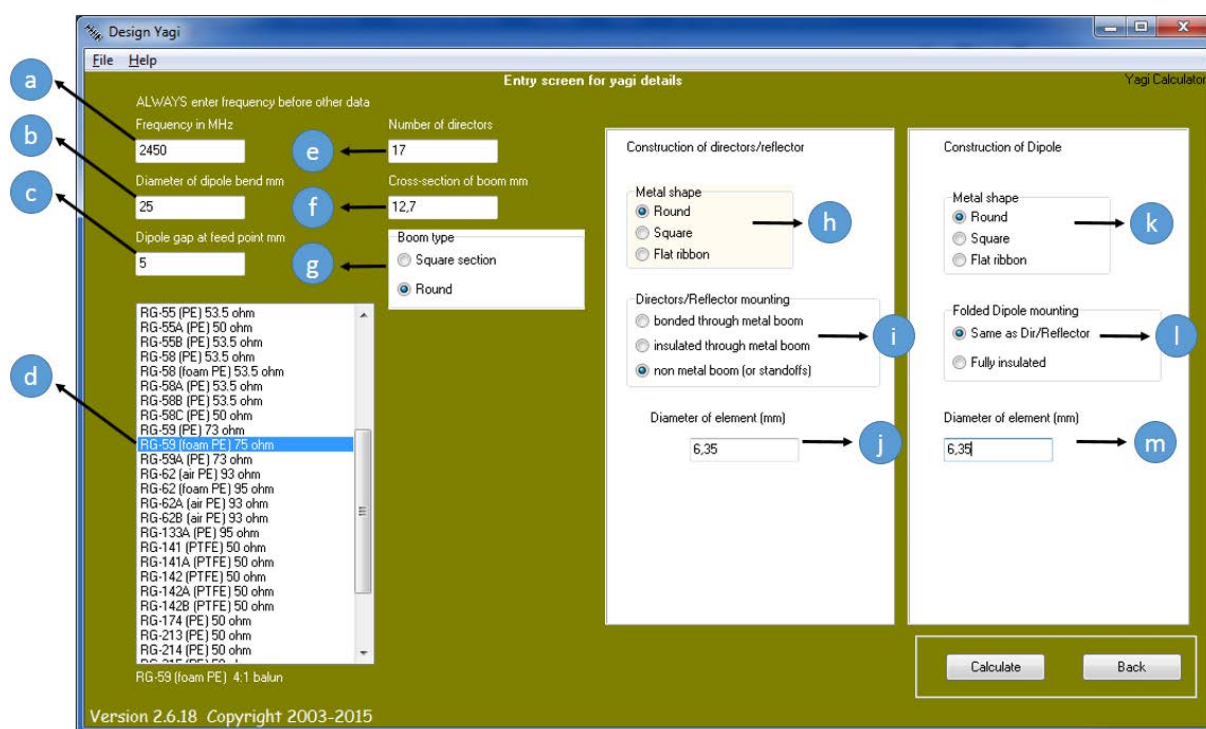
Como visto, a antena Yagi-Uda possui uma complexa relação entre seus elementos e na maioria dos projetos é buscada uma configuração ótima para o arranjo. O projeto de uma Yagi-Uda deve ser iniciado pela escolha da frequência de operação e do ganho requerido. A partir do ganho é possível encontrar o número de elementos necessários para o arranjo. Em seguida, por meio do número de elementos e do comprimento de onda, encontra-se o comprimento total da Yagi-Uda, ou seja, a distância entre o elemento refletor e o último elemento diretor. Esse comprimento deve então ser distribuído entre todos os elementos do arranjo. Por fim, o comprimento dos diretores deve ser calculado em função do diâmetro do condutor e do comprimento de onda. É muito importante também, realizar o casamento de impedância entre a antena e a linha de transmissão.

### 3. METODOLOGIA

Não existem expressões fechadas para o projeto de uma antena Yagi-Uda por conta da complexa relação entre seus elementos: comprimento e diâmetro dos elementos, espaçamento entre os elementos, ganho e impedância desejados.

Dessa forma, foi utilizado o *software* Yagi Calculator para desenvolver um primeiro modelo. O Yagi Calculator é um programa que auxilia no projeto de antenas Yagi-Uda longas (mais de 10 elementos) por meio de uma interface, onde a partir de alguns parâmetros básicos, o *software* retorna o dimensionamento da antena e algumas características de irradiação. A figura 9 mostra a interface para entrada de parâmetros e os parâmetros configurados estão enumerados de a–m.

Figura 9: Parâmetros configurados na interface do *software* Yagi Calculator.



Fonte: Yagi Calculator

A seguir é detalhado cada um dos campos:

- Frequência de operação – A frequência de operação desejada é 2,45 GHz. Como a entrada de valores para este campo está dada em MHz, foi inserido o valor “2450”.
- Diâmetro da curva do dipolo – Este campo é preenchido automaticamente ao inserir a frequência de operação no campo “a”. O diâmetro da curva do dipolo é necessário apenas quando um dipolo dobrado for utilizado como elemento radiante. Note que

o dipolo dobrado possui duas barras paralelas na horizontal, interligadas nas extremidades, essa interligação pode ser reta ou arredondada. Neste caso foi utilizado um elemento arredondado para interligação, justamente a curva do dipolo, com diâmetro calculado em 25 mm.

- c. *Gap* do dipolo – Este campo é preenchido automaticamente ao inserir a frequência de operação no campo “a”, 2,45 GHz retornou um *gap* equivalente a 5 mm.
- d. Linha de transmissão utilizada para confecção do *balun* – Neste campo existe uma caixa de seleção com diferentes tipos de cabos coaxiais para serem utilizados na confecção do *Balun*. Existe ainda a possibilidade de utilizar um cabo coaxial que não exista na caixa, neste caso adicionando o fator de propagação do referido cabo. Será utilizado o cabo RG-59 (*foam* PE) 75  $\Omega$  por ser um cabo frequentemente utilizado e de fácil aquisição, visando assim tornar prática a construção da antena. O termo “*foam* PE” significa espuma de polietileno.
- e. Número de elementos diretores – O número de elementos diretores deve ser definido principalmente com base no ganho desejado para a antena. Como o objetivo é atingir um ganho superior a 12 dBd, e as equações utilizadas para o cálculo do ganho são equações ideais, foi definido trabalhar com uma margem de 3 dB, como uma margem para eventuais perdas nos materiais, problemas de construção, descasamento de impedância ou algum outro problema inerente ao projeto físico, sendo assim utilizados 17 elementos diretores referentes a um ganho de 15 dBd. Para chegar ao número de elementos necessários foi utilizada a tabela 3 gerada pelo próprio Yagi Calculator.
- f. Seção cruzada ou corte transversal do *boom* – A informação do campo “f” se complementa com a informação do campo “g” que é o tipo de *boom* utilizado. A fim de manter prática a construção da antena, foi escolhido utilizar um *boom* cilíndrico, imaginando a utilização de um cano PVC de ½” facilmente encontrado no mercado. Portanto, expresso em milímetros, o campo foi preenchido com o valor “12,7”.
- g. Tipo de *boom* – Neste campo existem duas opções de seleção, seção reta retangular ou seção circular, conforme explicado no item anterior, foi utilizado um boom com seção transversal circular (cano PVC).
- h. Forma do metal – O campo “h” indica a forma do metal utilizado para confecção dos diretores e do refletor. Foi selecionada a opção “*Round*” visando novamente

tornar prática a construção da antena utilizando tubos de alumínio, visto que eles possuem um baixo custo e podem ser facilmente encontrados no mercado.

- i. Montagem dos diretores e refletores – Esse campo diz respeito a forma como os elementos diretores e o refletor serão posicionados no boom. Foi selecionada a opção “*non metal boom*”, visto que será utilizado um boom de cano PVC (não metálico).
- j. Diâmetro do elemento – Representa o diâmetro dos elementos diretores e do elemento refletor. Complementando a informação do item “h”, o projeto foi pensado na utilização de tubos de alumínio de  $\frac{1}{4}$ ” por simplicidade. O campo é dado em milímetros, portanto o preenchimento foi “6,35”.
- k. Forma do metal – O campo “k” indica a forma do metal utilizado para confecção do dipolo. Assim como no campo “h”, foi selecionada a opção *Round* visando utilizar os mesmos tubos de alumínio.
- l. Montagem do dipolo dobrado – Da mesma forma que os elementos diretores e o elemento refletor, o dipolo estará isolado do *boom* pois é utilizado um *boom* não metálico. O preenchimento do campo se dá pela opção “*same as dir/reflector*”, o que significa utilizar o mesmo do item “i”.
- m. Diâmetro do elemento – Indica o diâmetro do dipolo, igualmente ao item “j” será utilizado um tubo de alumínio com diâmetro de 6,35 mm.

Tabela 3: Ganho em função do número de elementos diretores da antena Yagi-Uda em 2,45 GHz calculado pelo Yagi calculator.

| Nº de<br>Diretores | Ganho<br>(dBd) | Ganho<br>(dBi) | Nº de<br>diretores | Ganho<br>(dBd) | Ganho<br>(dBi) |
|--------------------|----------------|----------------|--------------------|----------------|----------------|
| 1                  | 4,8            | 6,9            | 14                 | 14,2           | 16,3           |
| 2                  | 6,5            | 8,6            | 15                 | 14,5           | 16,6           |
| 3                  | 7,8            | 9,9            | 16                 | 14,7           | 16,9           |
| 4                  | 8,9            | 11             | 17                 | 15             | 17,1           |
| 5                  | 9,8            | 11,9           | 18                 | 15,2           | 17,4           |
| 6                  | 10,5           | 12,7           | 19                 | 15,4           | 17,6           |
| 7                  | 11,2           | 13,3           | 20                 | 15,6           | 17,8           |
| 8                  | 11,7           | 13,9           | 21                 | 15,8           | 18             |
| 9                  | 12,2           | 14,4           | 22                 | 16             | 18,2           |
| 10                 | 12,7           | 14,9           | 23                 | 16,2           | 18,3           |
| 11                 | 13,1           | 15,3           | 24                 | 16,4           | 18,5           |
| 12                 | 13,5           | 15,7           | 25                 | 16,5           | 18,7           |
| 13                 | 13,8           | 16             |                    |                |                |

Fonte: Adaptado do Yagi Calculator

A fim de comparar o ganho calculado pelo Yagi-Calculator e o ganho descrito em teoria, foi utilizada a equação (2.2) com o número de elementos da Yagi-Uda como segue:

$$G_0 = (9,603 + 0,0103N) \exp(0,1186N)$$

$$G_0 = (9,603 + (0,0103 \times 19)) \exp(0,1186 \times 19)$$

$$G_0 = 93,28$$

Convertendo para decibéis,

$$G_{dBi} = 10 \log(93,28)$$

$$G_{dBi} = 19,7 \text{ dBi}$$

Convertendo para dBd,

$$G_{dBd} = G_{dBi} - 2,14$$

$$G_{dBd} = 19,7 - 2,14$$

$$G_{dBd} = 17,56 \text{ dBd}$$

Dessa forma, o ganho de 17,56 dBd previsto em teoria, é 2,56 dB superior ao ganho calculado pelo *software* Yagi-Calculator.

Depois que todos os campos são preenchidos, o Yagi Calculator calcula o dimensionamento da Yagi-Uda e apresenta as informações necessárias para o projeto: comprimento e posição no *boom* dos elementos, tamanho do *boom*, tamanho do *gap*, comprimento do *balun*, HPBW estimado e ganho estimado. Na tabela 4 está apresentado o tamanho de cada elemento e sua respectiva posição no *boom* de acordo com os cálculos do *software*.

Tabela 4: Comprimento e posição no *boom* dos elementos calculados pelo Yagi Calculator.

| Elemento        | Comprimento (mm) | Posição no boom (mm) |
|-----------------|------------------|----------------------|
| Refletor        | 57,8             | 30                   |
| dipolo simples* | 53,6             | 54                   |
| dipolo dobrado* | 54,7             | 54                   |
| Dir1            | 46,8             | 63,7                 |
| Dir2            | 46               | 85,7                 |
| Dir3            | 45,1             | 112                  |
| Dir4            | 44,4             | 142,6                |
| Dir5            | 43,7             | 176,8                |
| Dir6            | 43               | 213,5                |
| Dir7            | 42,45            | 252,1                |
| Dir8            | 41,9             | 292,5                |
| Dir9            | 41,3             | 334,7                |
| Dir10           | 40,9             | 378,7                |
| Dir11           | 40,4             | 424,6                |
| Dir12           | 40               | 471,7                |
| Dir13           | 39,6             | 519,5                |
| Dir14           | 39,3             | 567,8                |
| Dir15           | 38,9             | 616,7                |
| Dir16           | 38,6             | 665,7                |
| Dir17           | 38,3             | 714,6                |

Fonte: Adaptado do Yagi Calculator

Note na tabela 4 que o dipolo simples e o dipolo dobrado estão marcados com um asterisco pois apenas um deles deve ser utilizado no projeto.

O Yagi Calculator calculou um comprimento total de 745 mm para o *boom*. Nas duas extremidades existe um espaçamento de 30 mm, entre o início do *boom* e o elemento refletor, e entre o final do *boom* e o último elemento diretor. Portanto, o comprimento do elemento refletor ao último elemento diretor é de 685 mm. A fim de compara-lo ao comprimento ótimo descrito em teoria, foi utilizada a equação (2.3) substituindo o número de elementos da antena e o comprimento de onda, como segue:

$$L_{Yagi-Uda} = (0,0066N^2 + 0,2094N - 0,3353) \lambda$$

$$L_{Yagi-Uda} = (0,0066 \times 19^2 + 0,2094 \times 19 - 0,3353) \times 0,1224$$

$$L_{Yagi-Uda} = (0,0066 \times 19^2 + 0,2094 \times 19 - 0,3353) \times 0,1224$$

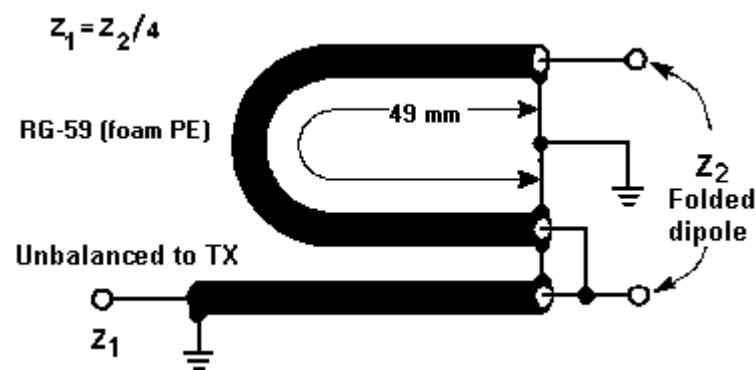
$$L_{Yagi-Uda} = 0,7375m$$

$$L_{Yagi-Uda} = 737,5 \text{ mm}$$

Portanto, o comprimento ótimo teórico para esse projeto de antena Yagi-Uda é de 737,5 mm, já o comprimento ótimo calculado pelo *software* Yagi Calculator foi de 685 mm, dessa forma tem-se uma diferença de 52,5 mm.

O cabo RG-59 (foam PE) possui fator de propagação de 0,79, assim, para um *balun* de meia onda 4:1, o comprimento do *balun* deve ser 49 mm. Lembre-se que o *balun* é construído com um cabo coaxial, e o cabo coaxial possui uma malha externa que recebe a alimentação negativa, e um fio de cobre interno que recebe a alimentação positiva. Para realizar a interligação do *balun* (cabo coaxial) com o dipolo dobrado e a linha de transmissão, é necessário interligar ambas as extremidades da malha do *balun* na malha da linha de transmissão (cabo coaxial), dessa forma as malhas dos cabos coaxiais ficam conectadas. Onde ocorre a alimentação positiva da linha de transmissão no dipolo, deve ser adicionada uma das extremidades do fio de cobre do *balun* e onde ocorre a alimentação negativa da linha de transmissão no dipolo, deve ser adicionada a outra extremidade do fio de cobre do *balun*. A figura 10 demonstra como deve ser feita essa interligação.

Figura 10: *Balun* 4:1 calculado pelo *software* Yagi Calculator utilizando um cabo coaxial RG-59.



Fonte: Yagi Calculator

Uma importante observação na escolha do condutor utilizado para os elementos da antena é em relação ao preenchimento destes metais, o campo eletromagnético propagante é um campo de superfície, portanto os condutores (tubos de alumínio) não necessitam ser preenchidos.

Por fim, o dimensionado gerado no *software* Yagi Calculator será utilizado como configuração de partida na análise dos resultados. O *software* estima ainda que o HPBW da Yagi-Uda será de 28°.

Para simplificar uma comparação entre o dimensionamento calculado pelo Yagi Calculator e as faixas teóricas descritas por Balanis, 2005 e Ribeiro, 2012 está apresentado na tabela 5 o comprimento dos elementos do arranjo e na tabela 6 o espaçamento entre os elementos do arranjo, ambos em função de  $\lambda$ .

Tabela 5: Comparação entre o comprimento dos elementos descritos por Balanis, Ribeiro e calculados pelo *software* Yagi Calculator.

| Elemento | Comprimento<br>Balanis | Comprimento<br>Ribeiro | Comprimento<br>Yagi Calculator |
|----------|------------------------|------------------------|--------------------------------|
| Refletor | $>0,5\lambda$          | $0,5-0,53\lambda$      | $0,472\lambda$                 |
| Dipolo   | $0,45-0,49\lambda$     | $0,45\lambda$          | $0,438\lambda$                 |
| Dir1     | $0,4-0,45\lambda$      | $0,414\lambda$         | $0,382\lambda$                 |
| Dir2     | $0,4-0,45\lambda$      | $0,407\lambda$         | $0,376\lambda$                 |
| Dir3     | $0,4-0,45\lambda$      | $0,41\lambda$          | $0,368\lambda$                 |
| Dir4     | $0,4-0,45\lambda$      | $0,414\lambda$         | $0,363\lambda$                 |
| Dir5     | $0,4-0,45\lambda$      | $0,41\lambda$          | $0,357\lambda$                 |
| Dir6     | $0,4-0,45\lambda$      | $0,405\lambda$         | $0,351\lambda$                 |
| Dir7     | $0,4-0,45\lambda$      | $0,403\lambda$         | $0,346\lambda$                 |
| Dir8     | $0,4-0,45\lambda$      | $0,402\lambda$         | $0,342\lambda$                 |
| Dir9     | $0,4-0,45\lambda$      | $0,4\lambda$           | $0,337\lambda$                 |
| Dir10    | $0,4-0,45\lambda$      | $0,4\lambda$           | $0,334\lambda$                 |
| Dir11    | $0,4-0,45\lambda$      | $0,4\lambda$           | $0,330\lambda$                 |
| Dir12    | $0,4-0,45\lambda$      | $0,4\lambda$           | $0,327\lambda$                 |
| Dir13    | $0,4-0,45\lambda$      | $0,4\lambda$           | $0,323\lambda$                 |
| Dir14    | $0,4-0,45\lambda$      | $0,4\lambda$           | $0,321\lambda$                 |
| Dir15    | $0,4-0,45\lambda$      | $0,4\lambda$           | $0,318\lambda$                 |
| Dir16    | $0,4-0,45\lambda$      | $0,4\lambda$           | $0,315\lambda$                 |
| Dir17    | $0,4-0,45\lambda$      | $0,4\lambda$           | $0,313\lambda$                 |

Fonte: do autor

Tabela 6: Comparação da distância entre os elementos descritos por Balanis, Ribeiro e calculados pelo *software* Yagi Calculator.

| Elementos       | Distância<br>Balanis | Distância<br>Ribeiro | Distância<br>Yagi Calculator |
|-----------------|----------------------|----------------------|------------------------------|
| Refletor/Dipolo | $0,25\lambda$        | $0,18\lambda$        | $0,196\lambda$               |
| Dipolo/Dir1     | -                    | $0,15\lambda$        | $0,079\lambda$               |
| Dir1/Dir2       | $0,3-0,4\lambda$     | $0,2\lambda$         | $0,180\lambda$               |
| Dir2/Dir3       | $0,3-0,4\lambda$     | $0,27\lambda$        | $0,215\lambda$               |
| Dir3/Dir4       | $0,3-0,4\lambda$     | $0,29\lambda$        | $0,250\lambda$               |
| Dir4/Dir5       | $0,3-0,4\lambda$     | $0,29\lambda$        | $0,279\lambda$               |
| Dir5/Dir6       | $0,3-0,4\lambda$     | $0,36\lambda$        | $0,300\lambda$               |
| Dir6/Dir7       | $0,3-0,4\lambda$     | $0,36\lambda$        | $0,315\lambda$               |
| Dir7/Dir8       | $0,3-0,4\lambda$     | $0,36\lambda$        | $0,330\lambda$               |
| Dir8/Dir9       | $0,3-0,4\lambda$     | $0,36\lambda$        | $0,345\lambda$               |
| Dir9/Dir10      | $0,3-0,4\lambda$     | $0,36\lambda$        | $0,359\lambda$               |
| Dir10/Dir11     | $0,3-0,4\lambda$     | $0,36\lambda$        | $0,375\lambda$               |
| Dir11/Dir12     | $0,3-0,4\lambda$     | $0,36\lambda$        | $0,385\lambda$               |
| Dir12/Dir13     | $0,3-0,4\lambda$     | $0,36\lambda$        | $0,390\lambda$               |
| Dir13/Dir14     | $0,3-0,4\lambda$     | $0,36\lambda$        | $0,394\lambda$               |
| Dir14/Dir15     | $0,3-0,4\lambda$     | $0,36\lambda$        | $0,399\lambda$               |
| Dir15/Dir16     | $0,3-0,4\lambda$     | $0,36\lambda$        | $0,400\lambda$               |
| Dir16/Dir17     | $0,3-0,4\lambda$     | $0,36\lambda$        | $0,399\lambda$               |

Fonte: do autor

Nota-se nas tabelas acima que a maioria dos valores calculados pelo Yagi Calculator não coincidem nem com os descritos por Balanis nem com os descritos por Ribeiro. Balanis descreve essas faixas de valores como faixas geralmente utilizadas e não como condição ótima para a propagação de uma Yagi-Uda. Já Ribeiro, apresenta estes valores como ótimos.

Nota-se também que o comprimento do refletor calculado pelo Yagi Calculator é inferior a  $0,5\lambda$ , dessa forma a impedância não se torna indutiva e as fases da corrente criada não atrasam as fases do campo eletromagnético. Essa condição, porém, é dependente do espaçamento entre os elementos, e apenas por meio do comprimento não é possível concluir se o elemento assume a função de refletor.

Por fim, o *software* Yagi Calculator não apresenta o critério de projeto utilizado. A utilização deste *software* ocorreu, pois por meio de pesquisas bibliográficas, constatou-se que muitos projetistas obtiveram bons resultados utilizando essa ferramenta para o desenvolvimento de antenas Yagi-Uda longas. Todos os resultados gerados no Yagi Calculator foram confrontados com os resultados simulados no software HFSS.

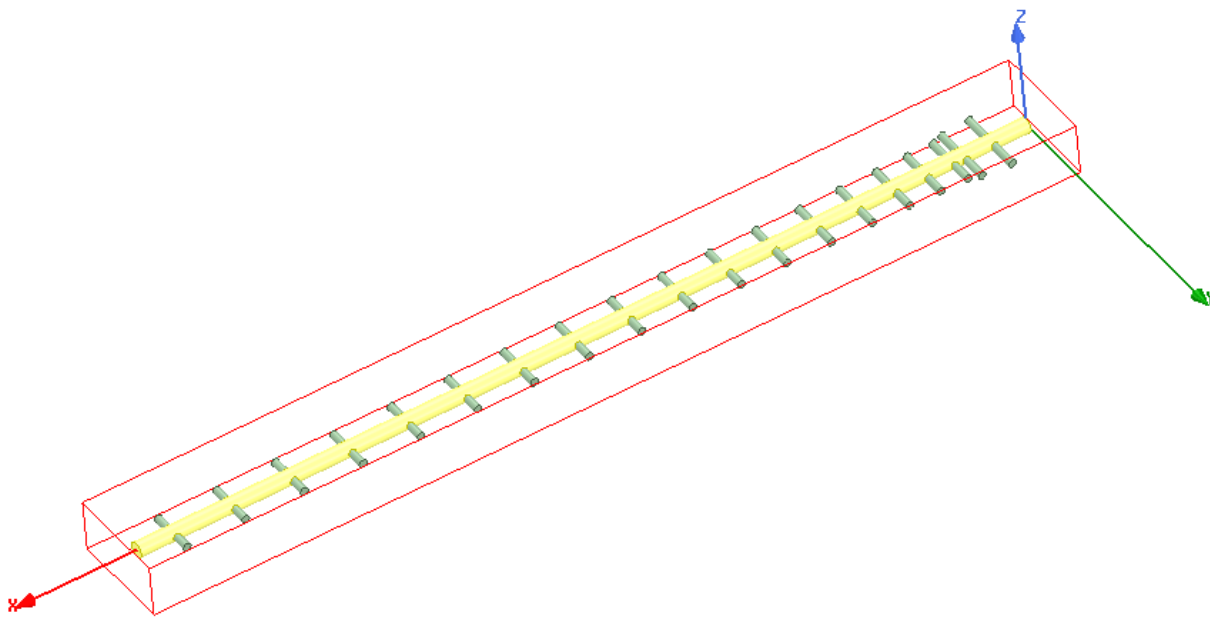
#### 4. ANÁLISE ELETROMAGNÉTICA

Foi utilizado o *software* de análises eletromagnéticas ANYS HFSS para o desenvolvimento de modelos que permitam simular as características de irradiação da antena. Nos modelos criados, foram realizadas análises do parâmetro  $|S_{11}|$  e  $\text{re}\{Z_{11}\}$ , padrão de irradiação e ganho 3D. O HFSS é um *software* de simulação eletromagnética 3D utilizado para o projeto e simulação de produtos eletrônicos de alta frequência por meio da utilização de métodos de elementos finitos. (ANSYS HFSS, 2018)

A figura 11 mostra o modelo inicial criado seguindo o dimensionamento calculado pelo *software* Yagi Calculator e descrito no capítulo 3 deste trabalho. Neste primeiro modelo foi utilizado um dipolo simples como elemento ativo. Para criar o modelo foi necessário definir no HFSS as dimensões de cada elemento, o material de que ele é feito e suas características elétricas, de forma que o *software* adquira as informações necessárias para simulação. Também foi necessário definir o material utilizado em cada elemento: alumínio para os elementos diretores, refletor e radiante, e PVC para o *boom*.

Ainda na figura 11 é possível verificar uma caixa ao redor da antena. Essa caixa é chamada de *Radiation Box* e serve para modelar a irradiação no espaço livre. A caixa é necessária para a definição de um domínio computacional finito, ela simula a propagação no espaço livre. Um limite de irradiação é usado para emular o espaço livre, truncando o espaço livre infinito para o domínio de cálculo finito. Isso minimiza os reflexos das superfícies externas e garante a máxima absorção. Nas bordas da caixa é utilizada uma camada perfeitamente casada (PML - *Perfect Matched Layer*), que absorve totalmente a energia eletromagnética incidente, permitindo emular radiação livre de reflexão.

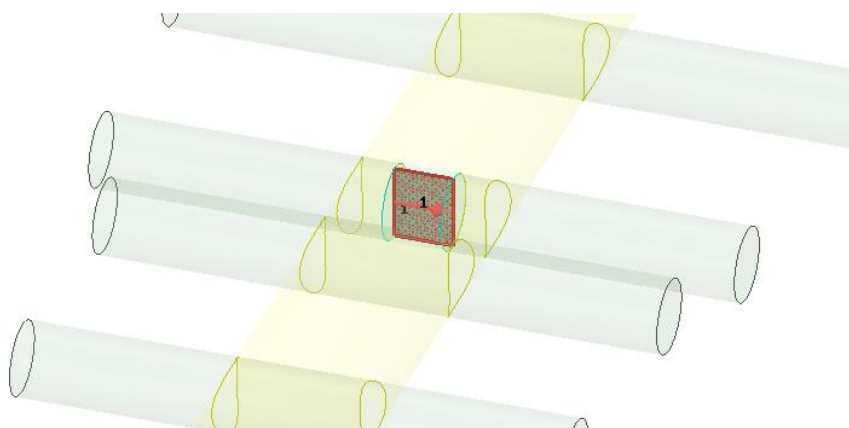
Figura 11: Primeiro modelo de antena Yagi-Uda criado no *software* ANSYS HFSS com dipolo simples.



Fonte: do autor

Uma outra configuração muito importante para a simulação é alimentação do elemento radiante. Foi definida uma superfície interligando os dois elementos que compõe o dipolo e atribui-se a essa superfície uma *lumped port*. A lumped Port serve de interface para a entrada ou saída de sinais do dispositivo, funcionando como elemento casado para excitar o dispositivo e medir os parâmetros-S. (HFSS Online Help, 20117) Inicialmente a *lumped port* foi configurada com impedância característica de  $50\ \Omega$ . A figura 12 mostra a *lumped port* utilizada no primeiro modelo. Nota-se que a superfície utilizada entre os dois elementos possui o mesmo comprimento do *gap*.

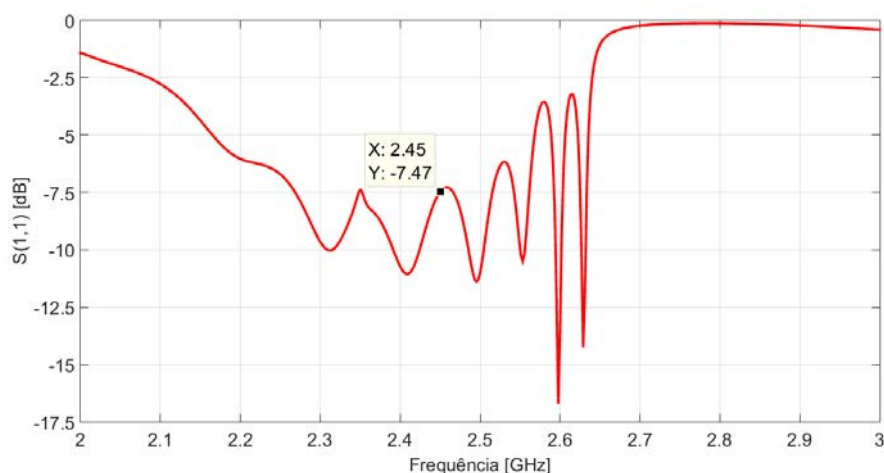
Figura 12: Vista da *lumped port* utilizada para alimentação do dipolo simples no arranjo da antena Yagi-Uda criada no *software* ANSYS HFSS.



Fonte: do autor

A figura 13 apresenta o parâmetro  $|S_{11}|$  do primeiro modelo. Verifica-se um coeficiente de reflexão  $|S_{11}| = -7,47$  dB em 2,45 GHz. Esse valor não representa um parâmetro aceitável visto que o desejável para uma antena é  $|S_{11}| \leq -10$  dB na banda de operação (2,429 a 2,471 GHz).

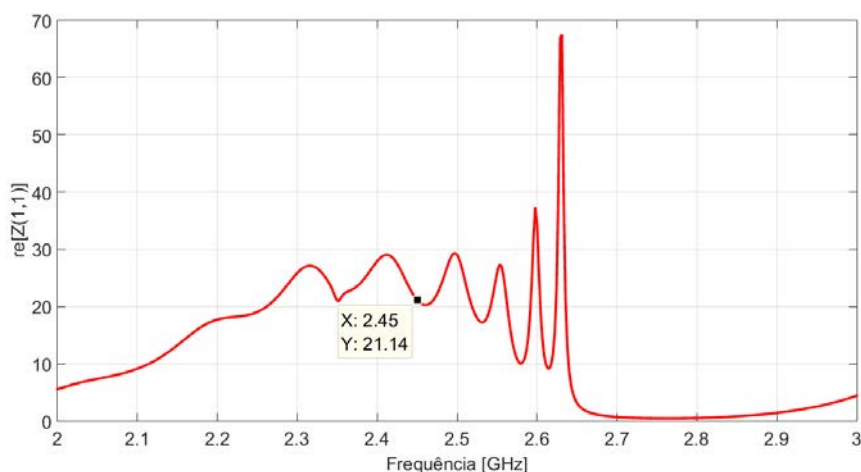
Figura 13: Parâmetro  $|S_{11}|$  simulado no *software* ANSYS HFSS para o primeiro modelo da antena Yagi-Uda com dipolo simples e *lumped port* com 50  $\Omega$ .



Fonte: do autor

A figura 14 mostra que a parte real da impedância de entrada da antena é 21,14  $\Omega$  em 2,45 GHz, e varia entre 20 e 30  $\Omega$  dentro da banda de operação. Dessa forma, como a *lumped port* foi configurada com 50  $\Omega$ , tem-se um descasamento entre as impedâncias da antena e da *lumped port*.

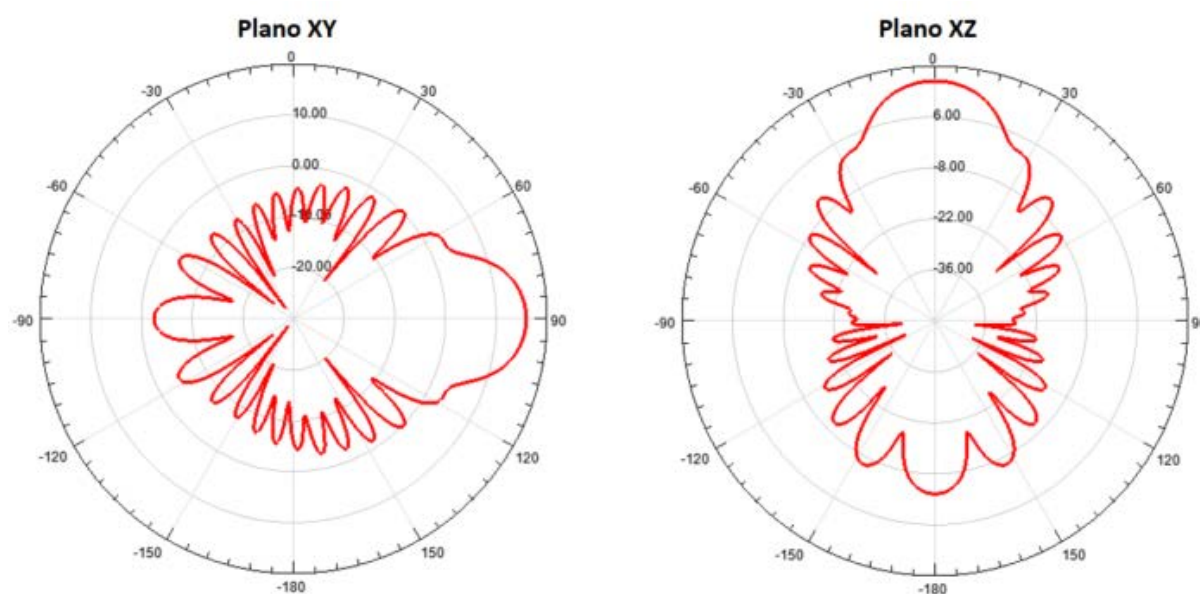
Figura 14: Parâmetro  $\text{re}\{Z_{11}\}$  simulado no *software* ANSYS HFSS para o primeiro modelo da antena Yagi-Uda com dipolo simples e *lumped port* com 50  $\Omega$ .



Fonte: do autor

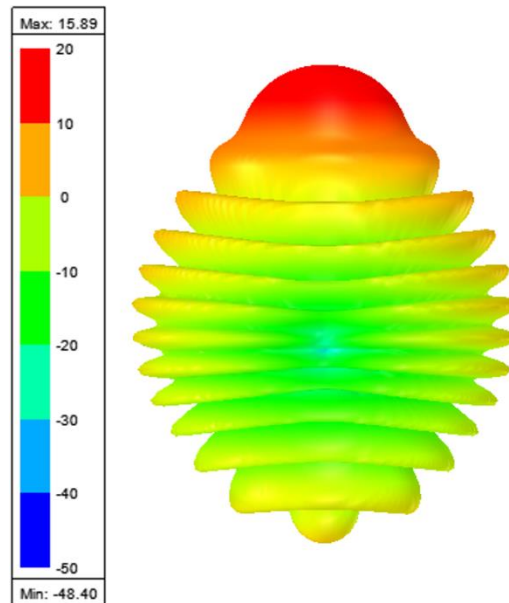
Na figura 15 é apresentado o padrão de irradiação da antena e nele pode ser observado algumas das principais características da antena Yagi-Uda, que são: alta diretividade, alta relação frente-costa e pequena magnitude dos lóbulos laterais. No plano XY foi obtido  $\text{HPBW} = 24,19^\circ$  e no plano XZ,  $\text{HPBW} = 23,36^\circ$ , valores próximos dos  $28^\circ$  calculado pelo Yagi Calculator. A relação frente-costa desse modelo foi de 18,39 dB e os lóbulos laterais ficaram abaixo de 0 dB. A figura 16 apresenta o ganho 3D da antena e complementa as análises do padrão de irradiação. Destacando o ganho máximo de 15,89 dBi.

Figura 15: Padrão de irradiação simulado no *software* ANSYS HFSS para o primeiro modelo da antena Yagi-Uda com dipolo simples e *lumped port* com  $50\ \Omega$ .



Fonte: do autor

Figura 16: Ganho 3D simulado no *software* ANSYS HFSS para o primeiro modelo da antena Yagi-Uda com dipolo simples e *lumped port* com 50  $\Omega$ .

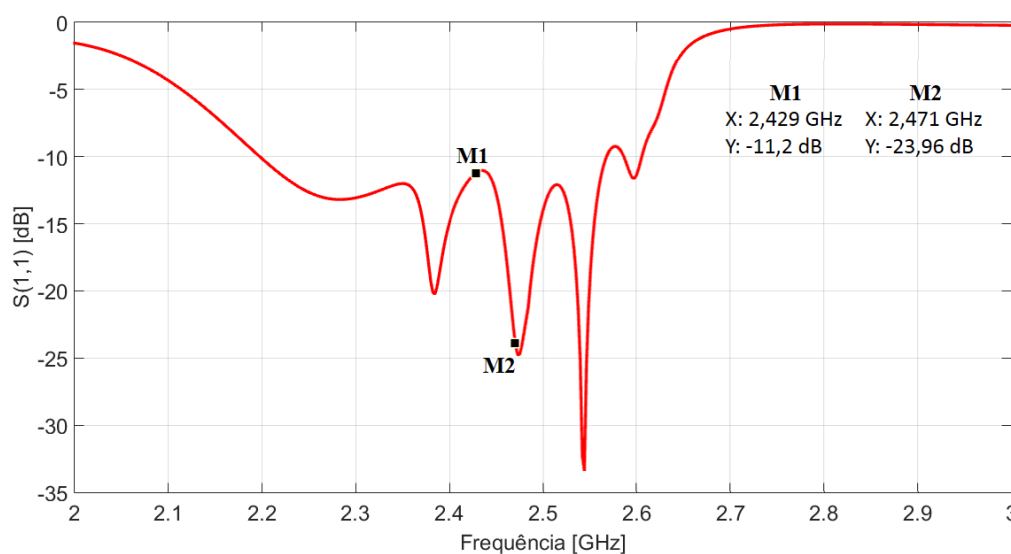


Fonte: do autor

O principal problema do modelo apresentado foi o fato de não possuir  $|S_{11}| \leq -10$  dB na banda de operação. As principais características da antena Yagi-Uda ficaram evidentes nesse primeiro modelo e o ganho ficou dentro do valor desejado. Dessa forma, a fim de melhorar o parâmetro  $|S_{11}|$  e analisar o desempenho da antena sob uma alimentação casada, a impedância da *lumped port* foi alterada para 21,14  $\Omega$ , ficando igual a parte real da impedância simulada no modelo. Na prática seria necessário utilizar um adaptador de impedância para realizar o casamento da linha de transmissão com a antena. Porém, como no HFSS é possível variar a impedância da *lumped port*, alterando-a para 21,14  $\Omega$  será possível fazer uma análise com o casamento de impedância entre a linha de transmissão (nesse caso a *lumped port*) e a antena. O resultado dessas simulações casadas se aproxima do ideal, porém na prática um adaptador de impedância não irá criar o mesmo resultado. O parâmetro  $\text{re}\{Z_{11}\}$ , o padrão de irradiação e o ganho 3D não sofreram alterações, já o parâmetro  $|S_{11}|$  apresentou variações significativas.

A figura 17 mostra que utilizando uma *lumped port* com 21,14  $\Omega$  foi obtido  $|S_{11}| = -12,69$  dB em 2,45 GHz, e o coeficiente de reflexão dentro da banda de operação ficou dentro do esperado com  $|S_{11}| \leq -10$  dB. Além disso, a largura de banda da antena foi maior do que a banda de operação, com aproximadamente 0,4 GHz, de 2,2 a 2,6 GHz. O coeficiente de reflexão nos limites da banda de operação são:  $|S_{11}| = -11,2$  dB em 2,429 GHz e  $|S_{11}| = -23,96$  dB em 2,471 GHz.

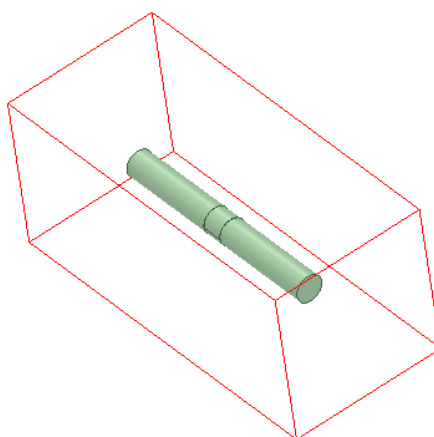
Figura 17: Parâmetro  $|S_{11}|$  simulado no *software* ANSYS HFSS para o modelo da antena Yagi-Uda com dipolo simples e lumped port com  $21,14 \Omega$ .



Fonte: do autor

Sabe-se que a parte real da impedância de entrada de um dipolo simples isolado é aproximadamente  $73 \Omega$ , portanto o valor de  $21,14 \Omega$  encontrado para a parte real da impedância de entrada no primeiro modelo é inferior ao do dipolo isolado. Conforme descrito em teoria, isso ocorre por conta da indução mútua. A fim de comparar a impedância da antena Yagi-Uda, com a impedância de um dipolo simples, o mesmo dipolo simples utilizado como elemento radiante no arranjo da antena Yagi-Uda foi isolado e simulado no HFSS conforme a figura a seguir:

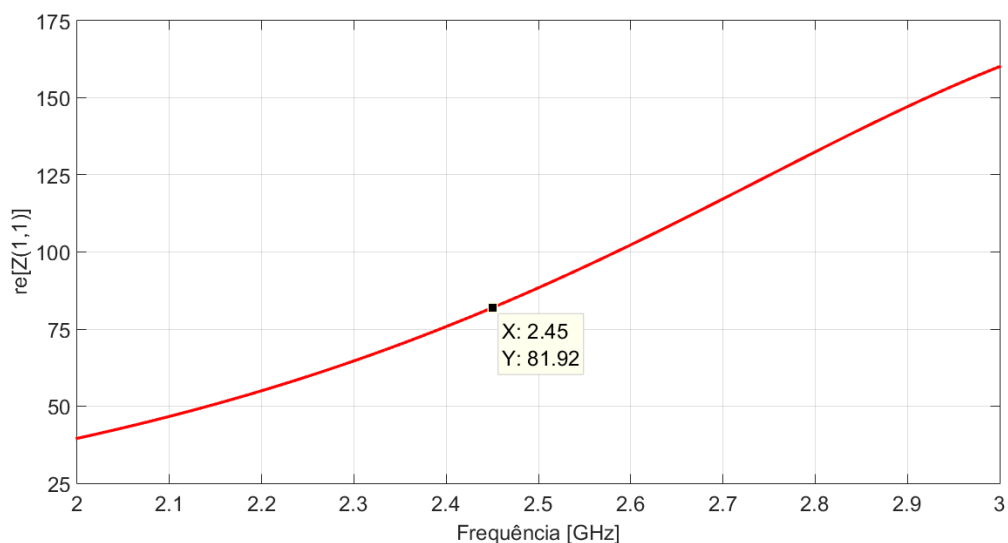
Figura 18: Dipolo simples com mesma dimensão e características do utilizado no primeiro modelo simulado no *software* ANSYS HFSS porém isolado do arranjo.



Fonte: do autor

Observa-se na figura 19 que a parte real da impedância de entrada para o dipolo isolado é 81,92  $\Omega$  em 2,45 GHz, próximo dos 75  $\Omega$  esperado pela teoria. Em comparação com o mesmo dipolo posicionado no arranjo da antena Yagi-Uda, com a parte real da impedância igual a 21,14  $\Omega$ , tem-se uma diferença de 60,78  $\Omega$ .

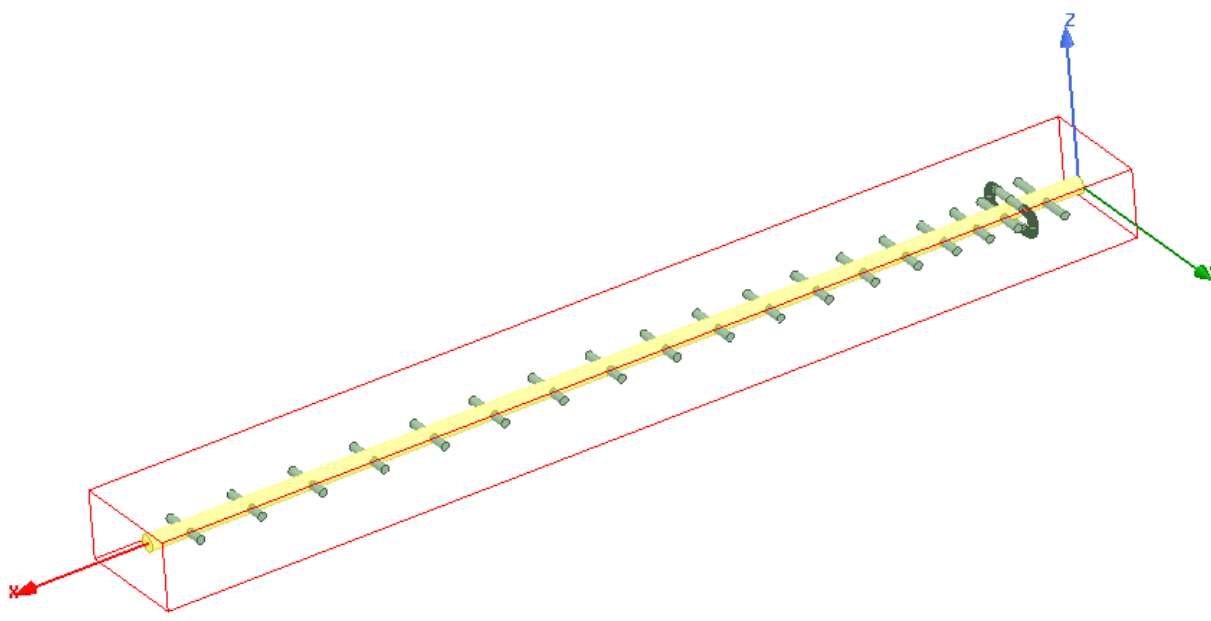
Figura 19: Parâmetro  $\text{re}\{Z_{11}\}$  simulado no *software* ANSYS HFSS para o dipolo simples isolado e *lumped port* com 50  $\Omega$ .



Fonte: do autor

A fim de comparar a diferença entre o arranjo da antena Yagi-Uda com um dipolo simples e o arranjo com um dipolo dobrado, foi criado um segundo modelo igual ao primeiro, substituindo apenas o elemento radiante por um dipolo dobrado. Dessa forma, foram realizadas para esse novo modelo as mesmas análises desenvolvidas para o primeiro modelo. O novo modelo criado no HFSS está apresentado na figura 21.

Figura 20: Segundo modelo de antena Yagi-Uda criado no *software* ANSYS HFSS com dipolo dobrado.



Fonte: do autor

A impedância da *lumped port* foi configurada novamente com  $50 \Omega$  e foi utilizado o comprimento do dipolo dobrado calculado pelo *software* Yagi Calculator. Para criar o modelo no HFSS foi utilizada a equação de uma superelipse para modelar a seção reta do dipolo dobrado. A figura 22 mostra a equação inserida no HFSS e a tabela 7 o valor utilizado nas variáveis.

Figura 21: Equação de uma superelipse utilizada para criar o dipolo dobrado no ANSYS HFSS.

| Name              | Value                                                                   | Unit | Evaluated Value  | Description |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------|------|------------------|-------------|
| Command           | CreateEquationCurve                                                     |      |                  |             |
| Coordinate Sys... | Global                                                                  |      |                  |             |
| X(t)              | $(W/2)*\text{abs}(\cos(t))^{(2/SGMA\_1)}*(\cos(t)/\text{abs}(\cos(t)))$ |      | -----            |             |
| Y(t)              | $(L/2)*\text{abs}(\sin(t))^{(2/SGMA\_2)}*(\sin(t)/\text{abs}(\sin(t)))$ |      | -----            |             |
| Z(t)              | 0                                                                       |      | 0                |             |
| Start _t          | 0                                                                       |      | 0                |             |
| End _t            | $2*\pi$                                                                 |      | 6.28318530717... |             |
| Number of Poi...  | 100                                                                     |      | 100              |             |

Fonte: do autor

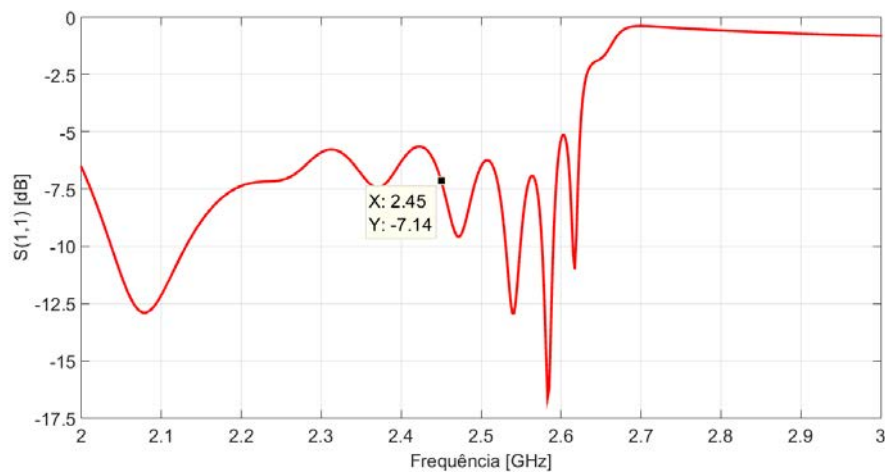
Tabela 7: Variáveis utilizadas na equação do elipsoide para criar o modelo do dipolo dobrado no *software* ANSYS HFSS.

| Variável | Valor    |
|----------|----------|
| L        | 54,7 mm  |
| W        | 16,35 mm |
| SGMA_1   | 3        |
| SGMA_2   | 10       |

Fonte: do autor

A seguir estão apresentados os resultados para a simulação do segundo modelo. A figura 23 apresenta o parâmetro  $|S_{11}|$ . Verifica-se um coeficiente de reflexão  $|S_{11}| = -7,14$  dB em 2,45 GHz. Novamente esse valor não apresenta um parâmetro aceitável dentro da banda de operação.

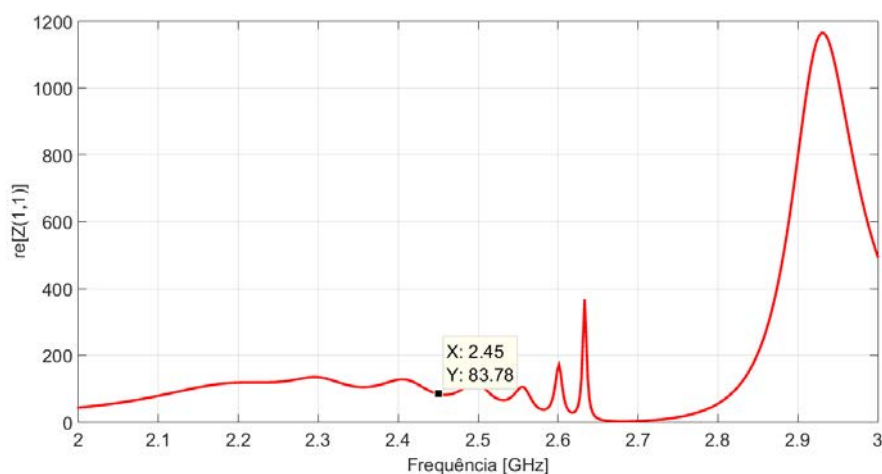
Figura 22: Parâmetro  $|S_{11}|$  simulado no software ANSYS HFSS para o segundo modelo da antena Yagi-Uda com dipolo dobrado e *lumped port* de 50  $\Omega$ .



Fonte: do autor

Analisando a figura 24, tem-se que a parte real da impedância de entrada da antena é de 83,78  $\Omega$  em 2,45 GHz, e varia entre 80 e 130  $\Omega$  dentro da banda de operação. Novamente existindo um descasamento com a *lumped port* configurada em 50  $\Omega$ .

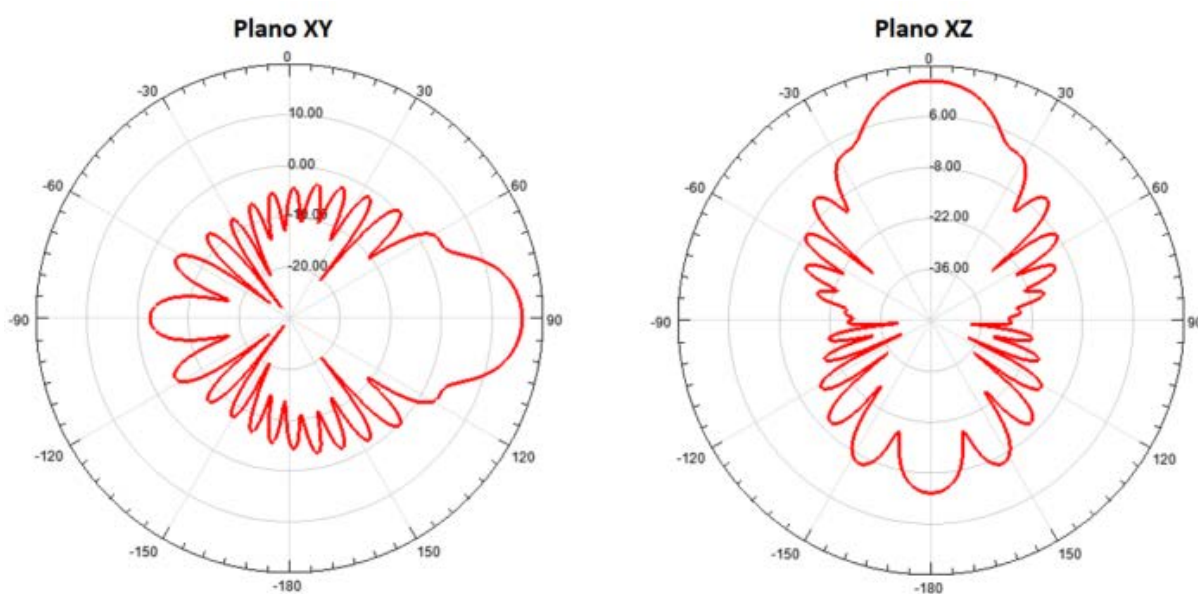
Figura 23: Parâmetro  $\text{re}\{Z_{11}\}$  simulado no *software* ANSYS HFSS para o segundo modelo da antena Yagi-Uda com dipolo dobrado e *lumped port* de  $50\ \Omega$ .



Fonte: do autor

Na figura 25 é apresentado o padrão de irradiação da antena e novamente pode ser observado algumas das principais características da antena Yagi-Uda. No plano XY foi obtido  $\text{HPBW} = 24,43^\circ$  e no plano XZ,  $23,57^\circ$ . Novamente, valores próximos dos  $28^\circ$  calculado pelo Yagi Calculator. Em comparação com o primeiro modelo utilizando dipolo simples, onde o  $\text{HPBW}$  foi de  $24,19^\circ$  no plano XY, praticamente não houve alteração. A relação frente-costa desse modelo foi de 17,82 dB e os lóbulos laterais ficaram abaixo de 0,3 dB.

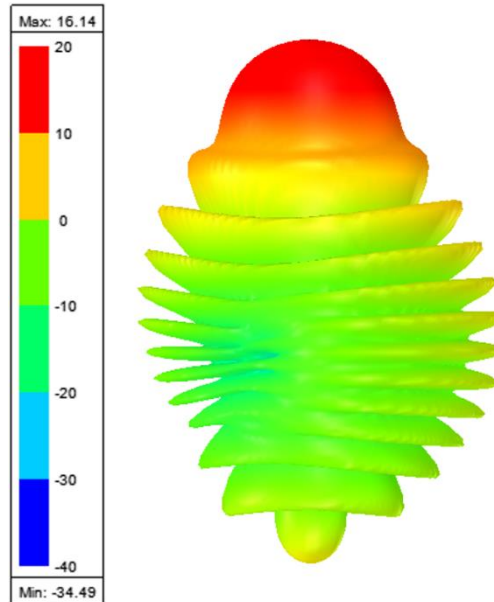
Figura 24: Padrão de irradiação simulado no *software* ANSYS HFSS para o segundo modelo da antena Yagi-Uda com dipolo dobrado e *lumped port* de  $50\ \Omega$ .



Fonte: do autor

A figura 26 apresenta o diagrama 3D do ganho e complementa as análises do padrão de irradiação. Destacando o ganho máximo de 16,14 dBi. Em comparação com o primeiro modelo que alcançou um ganho máximo de 15,89 dBi, houve um aumento de 0,25 dB.

Figura 25: Ganho 3D simulado no *software* ANSYS HFSS para o segundo modelo da antena Yagi-Uda com dipolo dobrado e *lumped port* de 50  $\Omega$ .

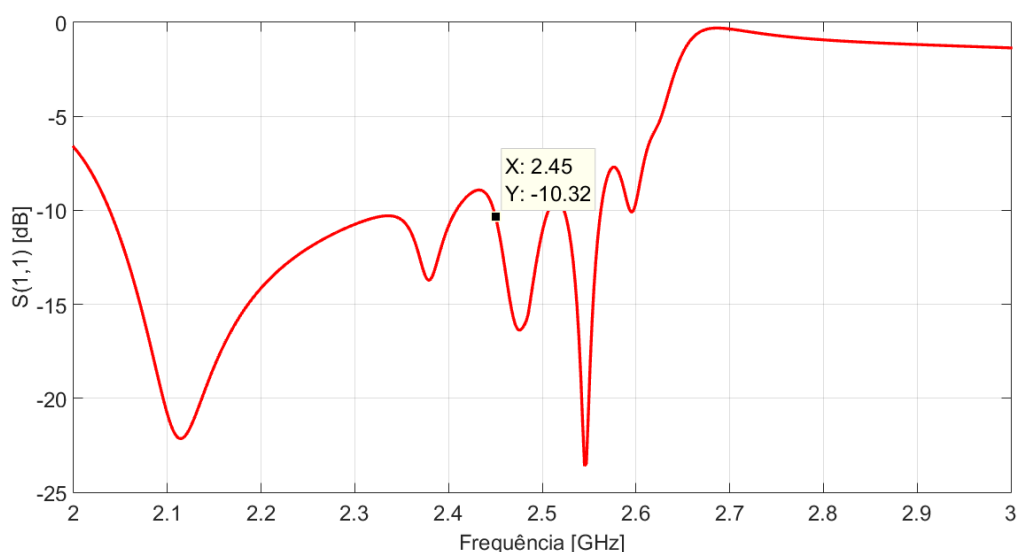


Fonte: do autor

O principal problema desse segundo modelo foi novamente o fato de não possuir  $|S_{11}| \leq -10$  dB na banda de operação. As principais características da antena Yagi-Uda ficaram evidentes e o ganho chegou próximo do valor desejado. Dessa forma, a fim de melhorar o parâmetro  $|S_{11}|$  e analisar o desempenho da antena sob uma alimentação casada, a impedância da *lumped port* foi alterada para 83,78  $\Omega$ , ficando igual a parte real da impedância simulada no modelo.

A figura 27 mostra que utilizando uma *lumped port* com 83,78  $\Omega$  obteve-se um parâmetro  $|S_{11}| = -10,32$  dB em 2,45 GHz, porém o coeficiente de reflexão dentro da banda de operação não ficou dentro do esperado,  $|S_{11}| \leq -10$  dB.

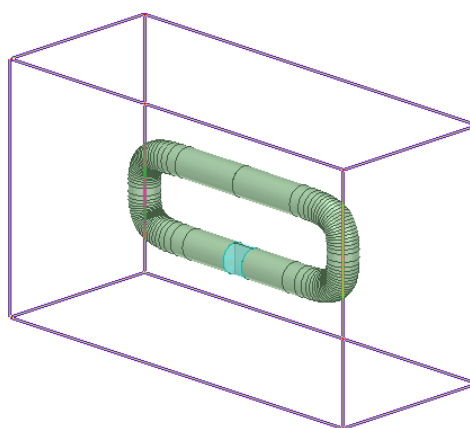
Figura 26: Parâmetro  $|S_{11}|$  simulado no *software* ANSYS HFSS para o modelo da antena Yagi-Uda com dipolo dobrado e *lumped port* de  $83,78 \Omega$ .



Fonte: do autor

Sabe-se que a parte real da impedância de entrada de um dipolo dobrado isolado é aproximadamente  $300 \Omega$ , portanto o valor de  $83,78 \Omega$  encontrado para a parte real da impedância de entrada no primeiro modelo é inferior ao do dipolo isolado. A fim de comparar a impedância da antena Yagi-Uda, com a impedância de um dipolo dobrado, o mesmo dipolo dobrado utilizado como elemento radiante no arranjo da antena Yagi-Uda foi isolado e simulado no HFSS conforme a figura a seguir:

Figura 27: Dipolo dobrado com mesma dimensão e características do utilizado no segundo modelo simulado no *software* ANSYS HFSS porém isolado do arranjo.

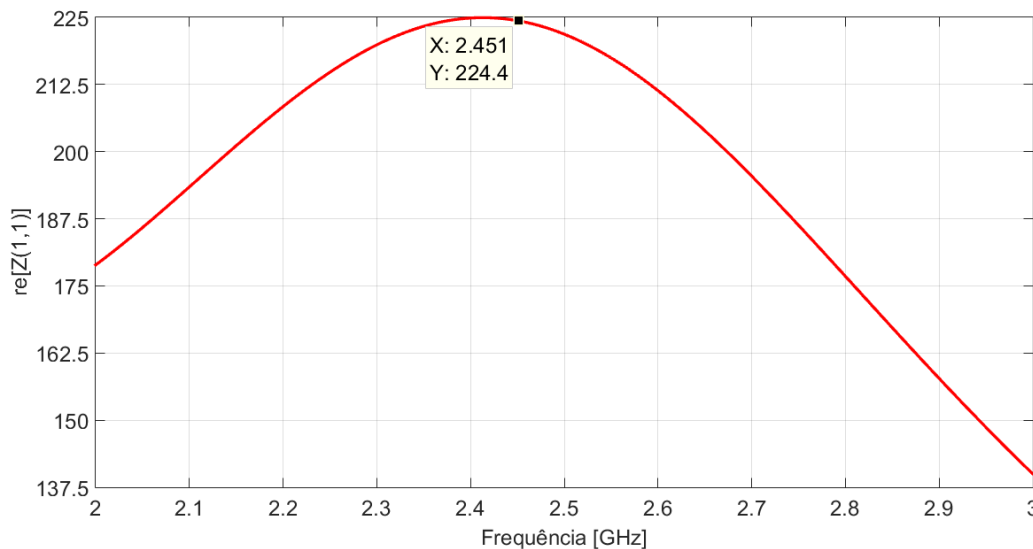


Fonte: do autor

Observa-se na figura 29 que a parte real da impedância de entrada para o dipolo isolado é  $224,4 \Omega$  em  $2,45 \text{ GHz}$ , um valor mais próximo dos  $300 \Omega$  esperado pela teoria. Possivelmente

essa diferença de aproximadamente  $75 \Omega$  entre a impedância prevista em teoria e a simulada se dá pelas dimensões utilizadas na seção reta do dipolo dobrado, utilizando um diâmetro menor essa diferença tende a diminuir. Em comparação com o mesmo dipolo posicionado no arranjo da antena Yagi-Uda, com a parte real da impedância igual a  $83,78 \Omega$ , existe uma diferença de  $140,62 \Omega$ .

Figura 28: Parâmetro  $\text{re}\{Z_{11}\}$  simulado no *software* ANSYS HFSS para o dipolo dobrado isolado e lumped port com  $50 \Omega$ .



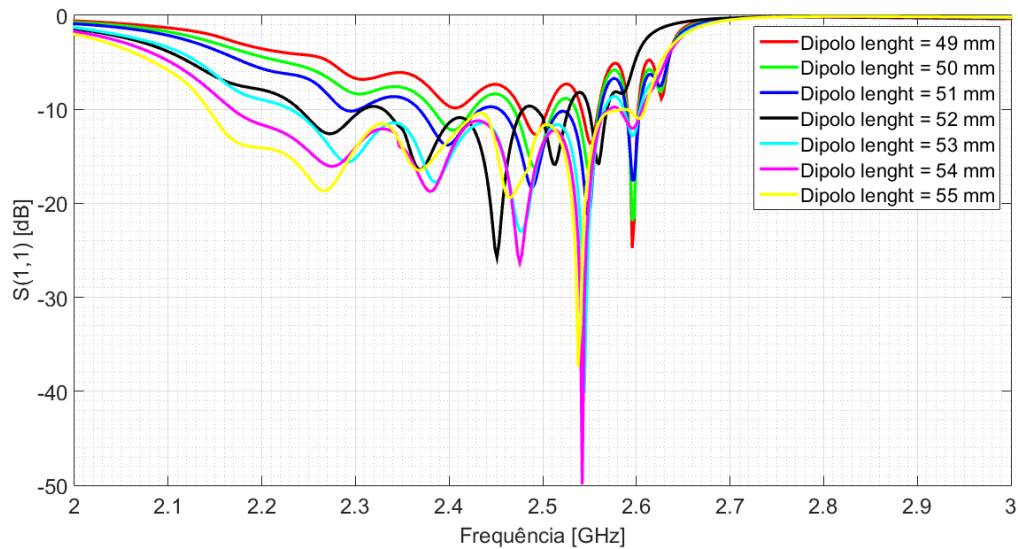
Fonte: do autor

A partir dos resultados obtidos até aqui, é possível concluir que o *software* Yagi Calculator calculou um modelo de antena Yagi-Uda que atingiu os objetivos deste trabalho, o primeiro modelo utilizando um dipolo simples e *lumped port* casada apresentou um ganho de  $15,89 \text{ dBi}$ , acima dos  $14,14 \text{ dBi}$  esperados, e o modelo apresentou perda de retorno  $\text{RL} \geq 10 \text{ dB}$  dentro da banda de operação. Porém, para realizar o casamento de impedância entre a antena e a linha de transmissão foi alterada a impedância da *lumped port* ao invés de utilizar um *balun*.

Foi criada uma análise paramétrica visando otimizar o desempenho desse primeiro modelo centralizando um dos picos do parâmetro  $|S_{11}|$  na frequência de operação da antena. Como visto na teoria, porém, o desempenho de uma antena Yagi-Uda depende de diversos parâmetros e o ideal seria realizar análises paramétricas envolvendo todos esses parâmetros simultaneamente, por exemplo uma pequena variação no comprimento de todos os elementos e no espaçamento entre eles. Uma análise como essa exige um elevado custo computacional, sendo inviabilizada neste trabalho.

O comprimento do dipolo foi variado entre 49 e 55 mm com passo linear de 1 mm. Não foi realizada nenhuma outra alteração. A figura 31 mostra o parâmetro  $|S_{11}|$  gerado pela simulação.

Figura 29: Parâmetro  $|S_{11}|$  simulado no *software* ANSYS HFSS para o modelo da antena Yagi-Uda com dipolo simples e *lumped port* com 21,14  $\Omega$ . O modelo conta com uma análise paramétrica no comprimento do dipolo, variando entre 49 e 55 mm com passo linear de 1 mm.

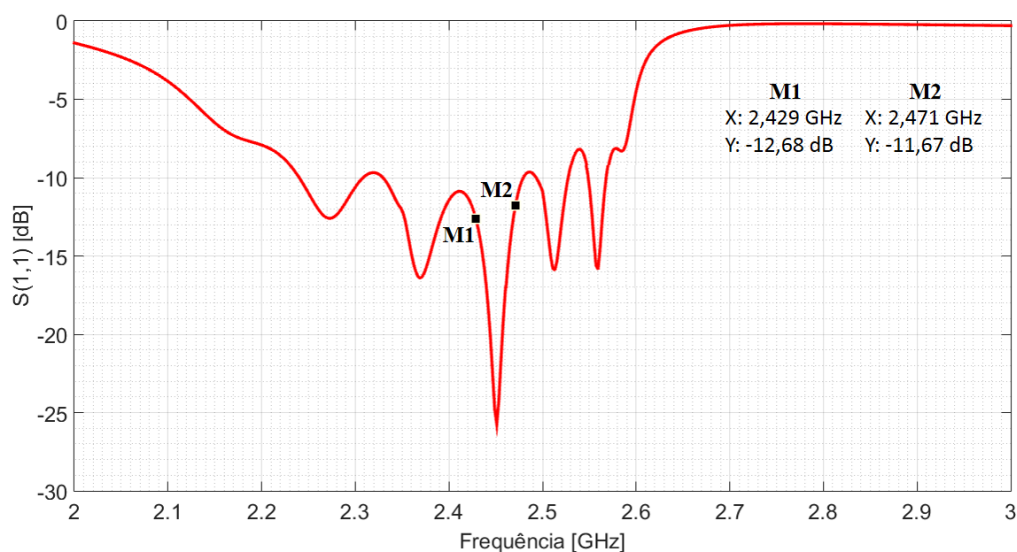


Fonte: do autor

Verifica-se na figura 31 diferentes valores para o parâmetro  $|S_{11}|$ , com destaque para a curva referente ao comprimento do dipolo igual a 52 mm, com um pico centralizado próximo de 2,45 GHz. A curva foi isolada a fim de analisar os resultados para esse comprimento.

A figura 32 mostra com mais clareza o parâmetro  $|S_{11}|$  para o modelo com comprimento de dipolo igual a 52 mm. O coeficiente de reflexão em 2,45 GHz foi  $|S_{11}| = -25,26$  dB e a banda de operação, de 2,429 a 2,471 GHz, possui  $|S_{11}| \leq -10$  dB, com -12,68 dB em 2,429 GHz e -11,67 dB em 2,471 GHz.

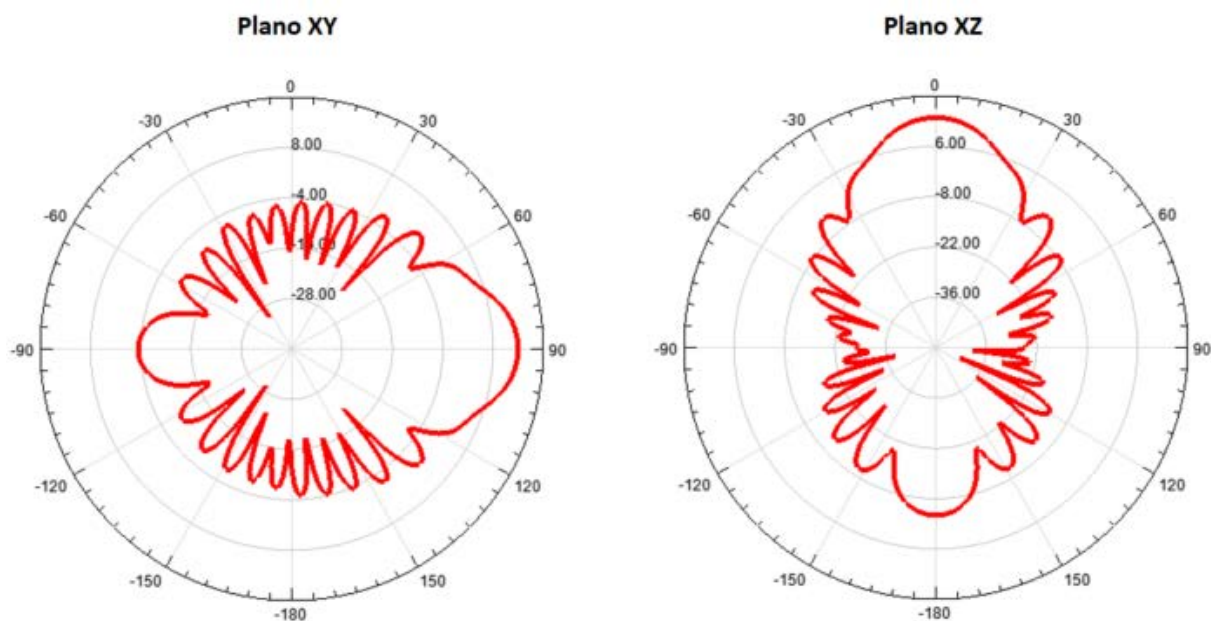
Figura 30: Parâmetro  $|S_{11}|$  simulado no *software* ANSYS HFSS para o modelo da antena Yagi-Uda com dipolo simples de comprimento igual a 52 mm e *lumped port* com 21,14  $\Omega$ .



Fonte: do autor

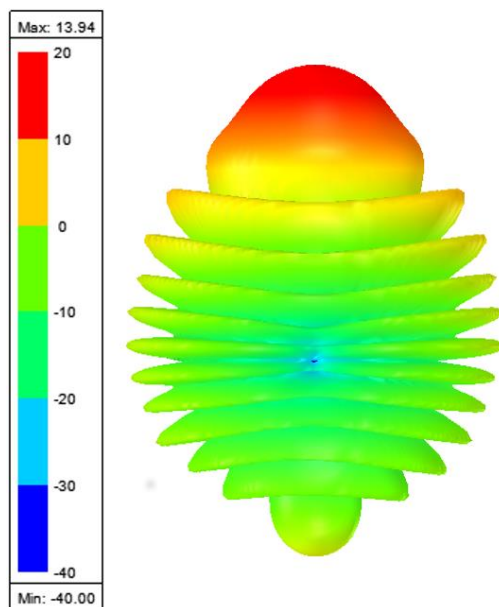
A impedância de entrada não teve nenhuma alteração significativa, mantendo-se em 21,14  $\Omega$ . Por outro lado, analisando a figura 33 observa-se um padrão de irradiação alterado. Em conjunto com a figura 34, nota-se que a alteração no comprimento do dipolo causou uma redução no ganho da antena. Em comparação com o modelo anterior que possuía ganho de 15,89 dBi, o novo ganho que é de 13,94 dBi, foi reduzido em aproximadamente 2 dB. Este novo ganho é próximo dos 14,14 dBi (12 dBd) desejados para a antena. No plano XY foi obtido HPBW = 23,65° e no plano XZ, HPBW = 22,83°. O modelo anterior possuía HPBW = 24,19° e HPBW = 23,36° nos planos XY e XZ respectivamente, dessa forma apresentando uma redução de 0,54° no plano XY e uma redução de 0,53° no plano XZ. A relação frente-costa foi de 17,28 dB, em comparação com o modelo anterior com uma relação frente-costa de 18,39 dB, houve uma redução de 1,11 dB e por fim, os lóbulos laterais ficaram abaixo de 1 dB.

Figura 31: Padrão de Irradiação simulado no *software* ANSYS HFSS para o modelo da antena Yagi-Uda com dipolo simples de comprimento igual a 52 mm e *lumped port* com 21,14  $\Omega$ .



Fonte: do autor

Figura 32: Ganho 3D simulado no *software* ANSYS HFSS para o modelo da antena Yagi-Uda com dipolo simples de comprimento igual a 52 mm e *lumped port* com 21,14  $\Omega$ .



Fonte: do autor

Como visto, a análise paramétrica variando o comprimento do dipolo não gerou melhoria no desempenho da antena. O primeiro modelo utilizando as dimensões calculadas pelo *software* Yagi Calculator e casado com a *lumped port* se manteve como melhor opção, atingindo os objetivos do trabalho.

Outras análises paramétricas, a partir de elementos isolados, como por exemplo variar o raio do *boom* para encontrar um ponto ótimo, variar a posição ou o raio do refletor para encontrar um ponto ótimo e até mesmo trocar o *boom* de material isolante por um *boom* de material metálico, se tornam análises sem grandes resultados, visto que o arranjo da Yagi-Uda possui uma alta complexidade e dependência entre os vários elementos.

O próximo passo neste trabalho seria utilizar técnicas que levam em consideração vários objetivos simultaneamente para alcançar as características ótimas dos modelos desenvolvidos. Como por exemplo, a otimização multiobjetivo de antenas Yagi-Uda por meio de Algoritmo Genético Multiobjetivo Real Polarizado (RBMGA – Real Biased Multiobjective Genetic Algorithm). (Ramos, Saldanha, Takahashi, Moreira, 2003)

Esses pesquisadores variaram o comprimento dos elementos assim a distância entre eles dentro de uma faixa de operação definida e obtiveram antenas com desempenho superior aos modelos apresentados nas literaturas existentes.

## 5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi estudado as características de projeto, a teoria, e o funcionamento de uma antena Yagi-Uda. Foram apresentadas as informações necessárias para o projeto da antena, para a simulação no *software* HFSS e as variações de projeto necessárias para a construção de uma antena na prática.

Por meio do modelo inicial de antena Yagi-Uda calculado pelo *software* Yagi Calculator, foi possível projetar uma antena para operar na frequência central de 2,45 GHz com dois canais de 20 MHz dentro da banda de operação. Foi atingido um ganho de 15,89 dBi, 1,75 dB acima dos 14,14 dBi requeridos. O modelo também apresentou as principais características de uma antena Yagi-Uda: alta diretividade, elevada relação frente-costa e pequena magnitude dos lóbulos laterais.

Para chegar no modelo final, foi necessário utilizar a *lumped port* casada com a antena. Em uma aplicação prática seria necessário utilizar um adaptador de impedância, como por exemplo, um transformador de  $\lambda/4$ , para realizar o casamento de impedância.

O principal ponto a ser observado na escolha entre um dipolo dobrado e um dipolo simples para o arranjo da Yagi-Uda é a impedância de entrada. Por meio de simulações foi observado que para um mesmo modelo de antena, variando apenas o elemento radiante, o arranjo com dipolo simples obteve  $\text{re}\{Z_{11}\} = 21,14 \, \Omega$  enquanto o arranjo com um dipolo dobrado obteve  $\text{re}\{Z_{11}\} = 83,78 \, \Omega$ . Dessa forma, utilizando um cabo coaxial com impedância de  $75 \, \Omega$  como linha de transmissão para alimentar a antena, o arranjo com dipolo dobrado está mais próximo do casamento.

A impedância de um dipolo de meia onda isolado é diferente da impedância de uma antena Yagi-Uda utilizando um dipolo de meia onda como elemento radiante. As simulações coincidiram com o previsto pela teoria, onde, por efeito da indução mútua, a impedância da antena Yagi-Uda utilizando um dipolo de meia onda, é inferior a impedância do dipolo de meia onda isolado.

Por fim, análises paramétricas no *software* ANSYS HFSS para uma antena Yagi-Uda exigem um elevado custo computacional. Dada elevada complexidade na relação entre os elementos do arranjo, uma análise paramétrica feita de maneira isolada não resulta em otimização para a antena. É necessário utilizar técnicas avançadas de análise para a otimização da antena, como o RBMGA, que analisa múltiplas variáveis do modelo da Yagi-Uda simultaneamente.

## REFERÊNCIAS

- BALANIS, C. A. **Antenna theory: analysis and design**. 3rd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2005. 1047 p.
- RIBEIRO, J. A. J. **Engenharia de Antenas: Fundamentos, Projetos e Aplicações**. 1ª ed. São Paulo: Érica, 2012. 584 p.
- ANATEL. RESOLUÇÃO Nº 680, DE 27 DE JUNHO DE 2017. **Regulamento sobre os equipamentos de radiocomunicação de irradiação restrita**. Brasília, DF, jun 2017. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2017/936-resolucao-680>>. Acesso em: 03 de outubro de 2018.
- UDA S. **Wireless Beam of Short Electric Waves**. J. IEEE (Japan), 273-282 p., Março 1926, e 1209-1219 p., Novembro 1927.
- YAGI H. **Beam Transmission of Ultra Short Waves**, Proc. IRE, Vol. 26, 715-741 p. Junho 1928. Também Proc. IEEE, Vol. 72, No.5, pp. 634-645, Maio 1984; Proc. IEEE, Vol. 85, No. 11, 1864-1874 p., Novembro 1997.
- YAGI CALCULATOR. **Yagi Calculator by John Drew**. Disponível em: <<http://www.vk5dj.com/yagi.html>>. Acesso em: 26 de outubro de 2018.
- ANSYS HFSS. **ANSYS HFSS – 3D Eletromagnetic Field Simulator for RF nd Wireless Design**. Disponível em: <<https://www.ansys.com/products/electronics/ansys/hfss>>. Acesso em: 26 de outubro de 2018.
- ANSYS HFSS. **HFSS Online Help**. Release 19.0. Canonsburg, PA: ANSYS Inc. and ANSYS Europe, Ltd. dez 2017. 3604 p.
- RAMOS, R. M.; SALDANHA, R. R.; TAKAHASHI, R. H. C.; MOREIRA, F. J. S. **Otimização Multiobjeto Aplicada ao Projeto de Antenas Filamentares**. Revista Ciência & Engenharia, Edição Especial, 2003. 67 – 70 p.