

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento de Engenharia Eletrônica - DAELN
Eletromagnetismo 2: Linhas e Antenas

Sadrak da Silva
Graduando Eng. Eletrônica

**Antena Yagi UDA alimentada por microfitas na
frequência de 2,45Ghz e 50 Ω de impedância de
entrada**

Curitiba/PR
2023

Sumário

1. INTRODUÇÃO	3
2. METODOLOGIA	4
3. DESENVOLVIMENTO	6
4. CONFECÇÃO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO	13
5. MEDIÇÕES	15
6. ANÁLISES E CURIOSIDADES	17
7. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO	18
8. REFERÊNCIAS	19

1. INTRODUÇÃO

As antenas desempenham um papel crucial na comunicação sem fio, sendo essencial que possuam dimensões compactas e desempenho eficiente. Um tipo de antena adequado para atender às necessidades desta tecnologia é a antena de microfita. Além, de apresentar diversas vantagens em comparação com outros tipos de antenas, nomeadamente formatos pequenos e finos, peso leve, fácil de fabricar, custo relativamente baixo e facilidade de integração.

Em geral, uma das desvantagens das antenas de microfita é que elas têm um baixo ganho, mas essas deficiências podem ser reduzidas ajustando o formato. Uma técnica que possui um alto valor de ganho é fornecer um refletor e um diretor, como em um arranjo de antenas Yagi-Uda em geral.

As antenas de Yagi-Uda são bem conhecidas desde sua proposta por UDA em 1927 e a publicação por Yagi em 1928. A configuração geralmente consiste em uma série de elementos dipolo lineares, um dos quais é acionado diretamente, enquanto a corrente restante é induzida por um acoplamento mútuo, consistindo em uma série de diretores e refletores que aumentam a radiação em uma direção quando devidamente apoiados em um estrutura suportada.

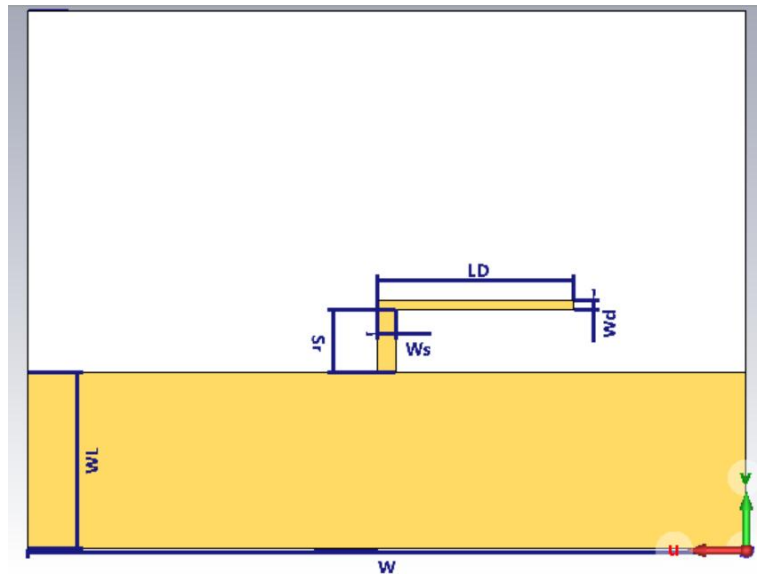


Figura 2: Esboço do arranjo dipolo Yagi-Uda alimentado por microfita vista inferior

Nas figuras 1 e 2 têm-se as nomenclaturas das dimensões de cada elemento da antena. Essas nomenclaturas serão usadas no desenvolvimento para projetar e simular a antena Yagi-UDA de microfita.

3. DESENVOLVIMENTO

Seguindo a norma NBS 688, o primeiro passo consiste em determinar os parâmetros fundamentais da antena, incluindo o ganho relativo, comprimento total, comprimento dos refletores, diretores e do dipolo, bem como os espaçamentos entre esses elementos. Essa análise é realizada com base na Tabela 1, que apresenta comprimentos e espaçamentos otimizados em relação ao comprimento de onda (λ), sendo a escolha guiada pelo ganho desejado.

$d = 0,0085\lambda$ $S_{12} = 0,2 \lambda$		Comprimento da Yagi em comprimentos de onda					
		0,4	0,8	1,2	2,2	3,2	4,2
Comprimento do refletor, (L_1/λ)		0,482	0,482	0,482	0,482	0,482	0,475
Comprimento dos diretores, λ	1°	0,424	0,428	0,428	0,432	0,428	0,424
	2°		0,424	0,420	0,415	0,420	0,424
	3°		0,428	0,420	0,407	0,407	0,420
	4°			0,428	0,398	0,398	0,407
	5°				0,390	0,394	0,403
	6°				0,390	0,390	0,398
	7°				0,390	0,386	0,394
	8°				0,390	0,386	0,390
	9°				0,398	0,386	0,390
	10°				0,407	0,386	0,390
	11°					0,386	0,390
	12°					0,386	0,390
	13°					0,386	0,390
	14°					0,386	
	15°					0,386	
Espaçamento entre diretores, em λ		0,20	0,20	0,25	0,20	0,20	0,308
Ganho em relação ao dipolo de meia onda em dB		7,1	9,2	10,2	12,25	13,4	14,2
Curva de projeto		(A)	(B)	(B)	(C)	(B)	(D)

Tabela 1: Comprimentos otimizados de elementos parasitas para antenas yagi.

Uma vez que a frequência de operação é 2,45GHz, e o substrato utilizado é a placa de fibra de vidro FR-4, abaixo na equação 1, têm-se o valor do comprimento de onda (λ), dado que a placa utilizada FR - 4 apresenta $\rightarrow \epsilon_r = 4.4$

$$\lambda = \frac{c}{f \cdot \sqrt{\epsilon_r}} = 58,3753 \text{ mm}$$

Equação 1

Portanto os valores obtidos, foram:

$$S_{11} = -10.2 \text{ dB}$$

$$W = 1.20 * \lambda = 70,05 \text{ mm}$$

$$L_D = 0.450 * \lambda = 26.2688 \text{ mm}$$

$$L_R = 0.482 * \lambda = 28.1369 \text{ mm}$$

$$S_{12} = 0.200 * \lambda = 11.6751 \text{ mm}$$

$$S_{2n} = 0.250 * \lambda = 14.5938 \text{ mm}$$

$$L_{D1} = 0.428 * \lambda = 24,9846 \text{ mm}$$

$$L_{D2} = 0.420 * \lambda = 24.5176 \text{ mm}$$

$$L_{D3} = L_{D2}$$

$$L_{D4} = L_{D1}$$

Ao simular a antena no CST Studio com estes valores, os resultados não foram satisfatórios, a figura 3 evidencia o gráfico em função do parâmetro S11.

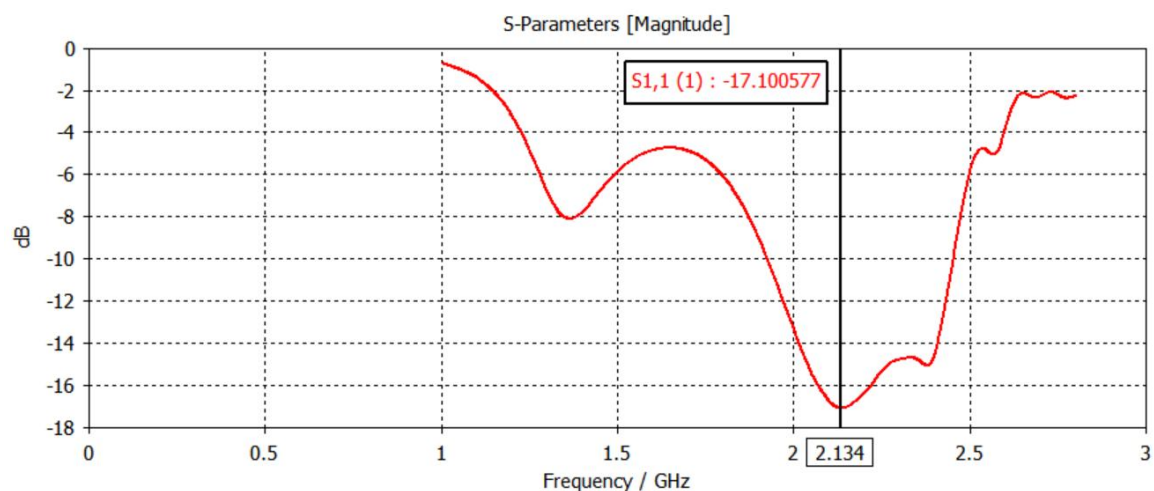


Figura 3: simulação da antena Yagi-Uda de microfitas com os valores da norma NDB 688

Como o objetivo é projetar uma antena de Yagi-Uda que opera em 2,45Ghz com pelo menos -10db no parâmetro S11, usando a metodologia tentativa/erro os valores foram ajustados para obter esse resultado.

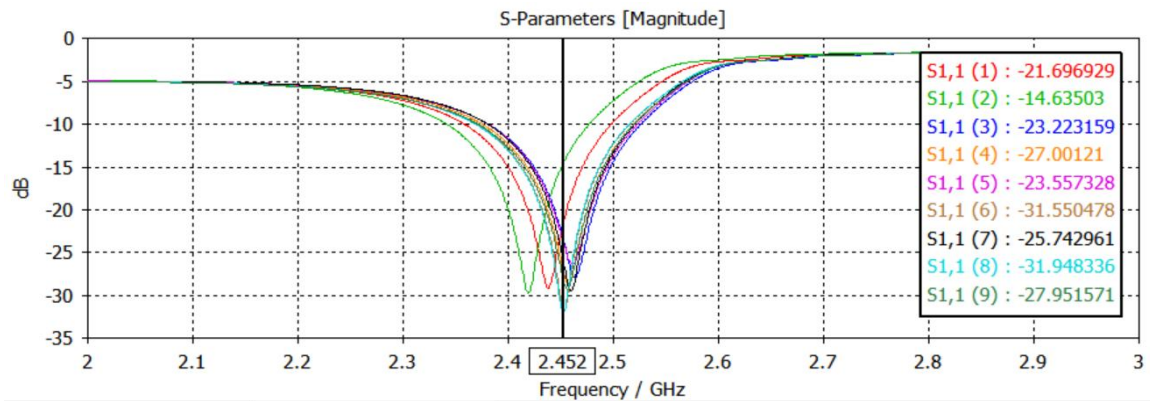


Figura 4: Resultados das simulações ajustando as dimensões para obter os valores ideais.

Após várias simulações, os valores ideais para a antena Yagi-Uda de microfitas foram estes presentes na tabela 1:

Parâmetro	Expressão	Valor	Descrição
LD	$0,54535 * \lambda$	31,8349 mm	Tamanho do dipolo/refletor
LD1	$0,62450 * \lambda$	36,4553 mm	Tamanho do diretor 1
LD2	$0,61746 * \lambda$	36,0443 mm	Tamanho do diretor 2
LD3	$0,60929 * \lambda$	35,5674 mm	Tamanho do diretor 3
LD3	$0,60171 * \lambda$	35,1249 mm	Tamanho do diretor 4
S01	$0,05076 * \lambda$	2,9771 mm	Distancia entre dipolo e diretor 1
S12	$0,15537 * \lambda$	9,9631 mm	Distancia entre diretor 1 e 2
S23	$0,17781 * \lambda$	10,3797 mm	Distancia entre diretor 2 e 3
S34	$0,19888 * \lambda$	11,6096 mm	Distancia entre diretor 3 e 4
Wd	$0,02920 * \lambda$	1,7045 mm	Espessura dos diretores
Ws	Wd^2	2,9055 mm	Largura sustentação dipolo face GND
We	$0,82500 * \lambda$	1,4062 mm	Largura dipolo
Sr	$0,17487 * \lambda$	10,2080 mm	Altura entre casador/gnd e dipolo
WL	$0,49232 * \lambda$	28,7393 mm	Altura GND
L	$(3/2) * \lambda$	87,5628 mm	Comprimento da placa
tc	-	0,04000 mm	Espessura do cobre
Wf	$0,05100 * \lambda$	2,9771 mm	Largura do casador de impedância
W	$2,00000 * \lambda$	116,7505 mm	Comprimento ground
h	-	1,60000 mm	Espessura do substrato

Tabela 2: Valores ideais para antena Yagi-Uda de microfita para operar em 2,45Ghz

A figura 5 evidencia o excelente resultado para o parâmetro S11, com cerca de -50db exatamente em 2,45Ghz.

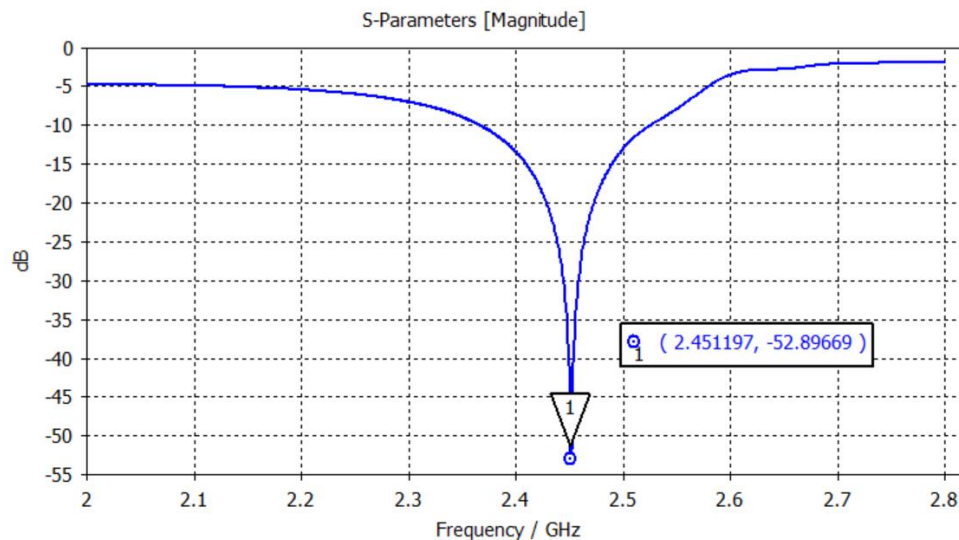


Figura 5: Resultado da simulação, frequência de operação em função do parâmetro S11 em decibéis

A impedância de entrada foi ajustada com sucesso para exatos 50 ohms, conforme desejado. O parâmetro crucial para esse casamento de impedância é a largura (Wf). Notavelmente, a largura é inversamente proporcional à impedância de entrada, indicando que um aumento na largura resulta em uma queda significativa na impedância. Durante a simulação, identificou-se que com uma largura de 5.4 mm, a impedância de entrada diminui para aproximadamente 30 ohms, enquanto o valor ideal para alcançar os 50 ohms desejados é de cerca de 2,9 mm.

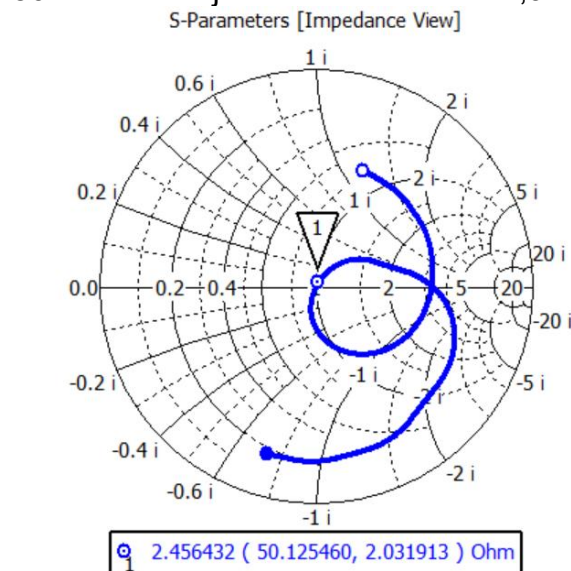


Figura 6: Impedância de entrada para 2,45Ghz

O "Voltage Standing Wave Ratio (VSWR)" é um parâmetro crucial em antenas e sistema de radio frequência, medindo o descasamento de impedância. Em situações ideais, quando a carga é perfeitamente compatível com a fonte, o VSWR será igual a 1. Isso implica em uma eficiente transferência de energia entre a fonte e a carga, indicando um casamento de impedância ideal.

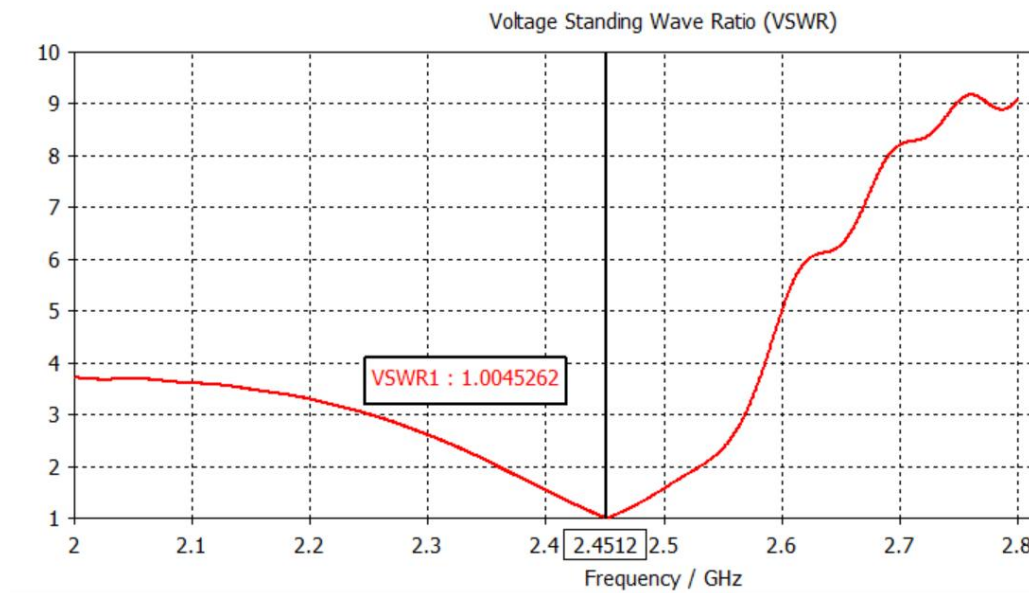


Figura 7: Gráfico do valor de SWR, demonstrando o excelente valor para antena de 2,45Ghz projetada.

O padrão de radiação e diretividade também ficaram satisfatórios, com um ganho de 8,62 dBi, a antena projetada demonstrou-se relativamente eficiente.

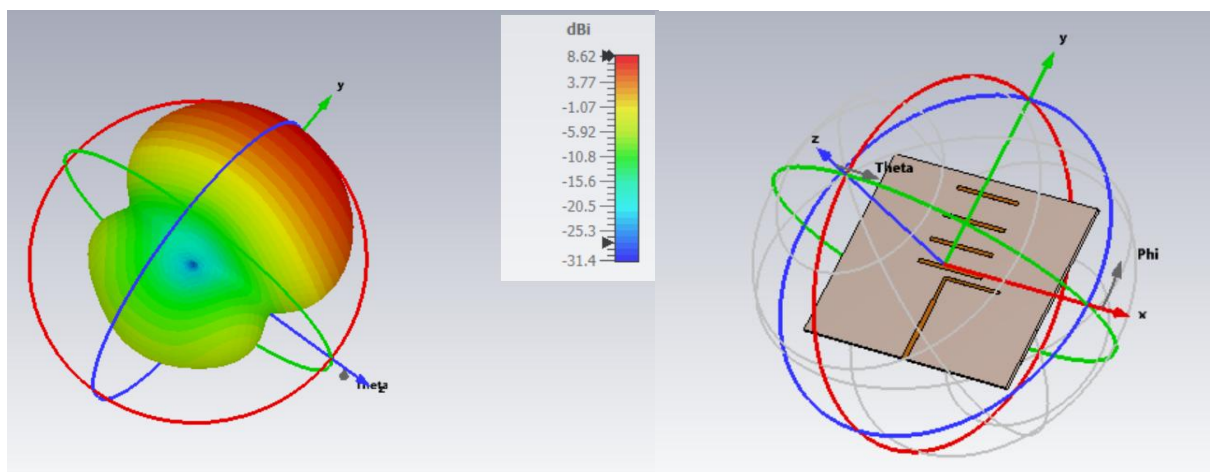
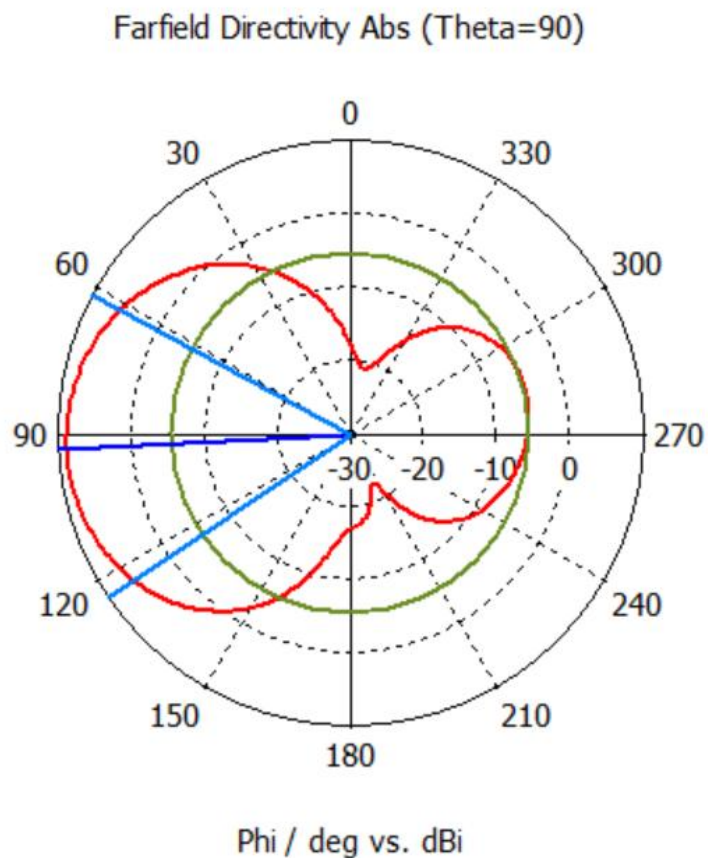
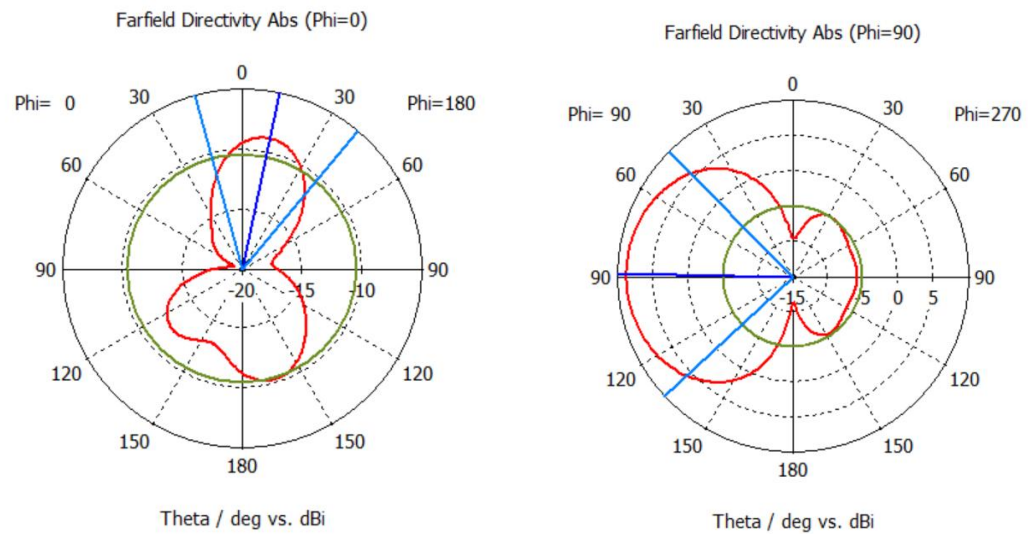


Figura 8: Padrão de radiação

Gráficos do padrão de radiação e diretividade da antena projetada e simulada no software CST Studio 2022.



A figura abaixo demonstra com mais precisão os valores exatos utilizados na simulação, quase todos em função do comprimento de onda.

Parameter List				
Name	Expression	Value	Description	
c	$= 3 \times 10^8$	300000000	Velocidade da onda no ar	
Er	$= 4.4$	4.4	Permissividade relativa substrato FR4	
f	$= 2.45 \times 10^9$	2450000000	Frequencia de operação	
h	$= 1.6$	1.6	Espessura do substrato	
L	$= (3/2) * \text{lambda}$	87.5628908490851	Comprimento da placa	
lambda	$= c / (\text{sqr}(\text{Er}) * f) * 1000$	58.3752605660567	Comprimento de onda	
LD	$= 0.54535 * \text{lambda}$	31.834948349699	Tamanho do dipolo/refletor	
LD1	$= 0.62450 * \text{lambda}$	36.4553502235024	Tamanho do diretor 1	
LD2	$= 0.61746 * \text{lambda}$	36.0443883891174	Tamanho do diretor 2	
LD3	$= 0.60929 * \text{lambda}$	35.5674625102927	Tamanho do diretor 3	
LD4	$= 0.60171 * \text{lambda}$	35.124978035202	Tamanho do diretor 4	
S01	$= 0.05076 * \text{lambda}$	2.96312822633304	Distancia entre dipolo e diretor 1	
S12	$= 0.15537 * \text{lambda}$	9.06976423414823	Distancia entre diretor 1 e 2	
S23	$= 0.17781 * \text{lambda}$	10.3797050812505	Distancia entre diretor 2 e 3	
S34	$= 0.19888 * \text{lambda}$	11.6096718213774	Distancia entre diretor 3 e 4	
Sr	$= 0.17487 * \text{lambda}$	10.2080818151863	Altura entre casado/gnd e dipolo	
tc	$= 0.04$	0.04	Espessura cobre	
W	$= 2 * \text{lambda}$	116.750521132113	Comprimento ground	
Wd	$= 0.0292 * \text{lambda}$	1.70455760852886	Espessura diretores	
We	$= 0.825 * \text{Wd}$	1.40626002703631	Largura dipolo	
Wf	$= 0.051 * \text{lambda}$	2.97713828886889	Largura Casador	
WL	$= 0.49232 * \text{lambda}$	28.739308281881	Altura GND	
Ws	$= \text{Wd}^2$	2.90551664079363	Largura sustentação dipolo face GND	

Figura 9: Print da lista de parâmetros utilizados no software CST Studio 2022

4. CONFEÇÃO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

A confecção da placa foi realizada por meio do método fotográfico conhecido como 'Transferência Térmica'. Este método, amplamente utilizado por entusiastas de eletrônica, proporciona resultados excelentes tanto para placas de face simples quanto para face dupla.

Inicialmente, a antena foi impressa com suas dimensões reais em papel couchê 170g. Destaca-se a importância de manusear as folhas impressas com cuidado, evitando o toque no circuito para prevenir a transferência de gorduras, as quais podem impactar negativamente na qualidade da transferência térmica para a placa.

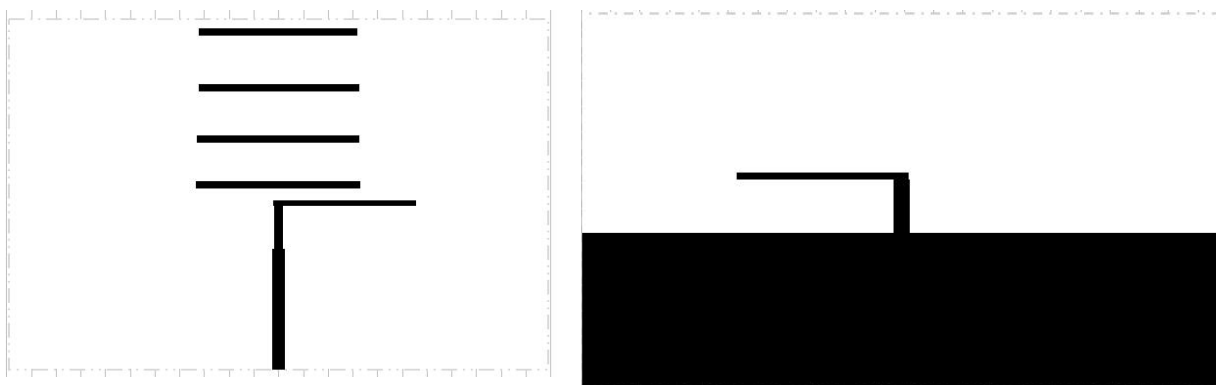


Figura 10: Desenho da placa preparado para impressão com papel couchê 170g

Em seguida, a placa foi cuidadosamente limpa com detergente e secada com um secador de cabelo. Em seguida, a folha com o circuito impresso foi posicionada sobre a placa, e utilizando um ferro de passar roupa, realizou-se movimentos circulares por cerca de 10 minutos.

Posteriormente, a placa foi submersa em água fria para criar um choque térmico. Com a tinta transferida para a placa, o próximo passo envolveu a imersão na solução corrosiva de perclororeto para obter apenas o circuito desejado.



Figura 11: Placa de fibra de vidro FR-4 e ao lado o corrosivo perclororeto.

O resultado final da antena é evidenciada pela figura 12.

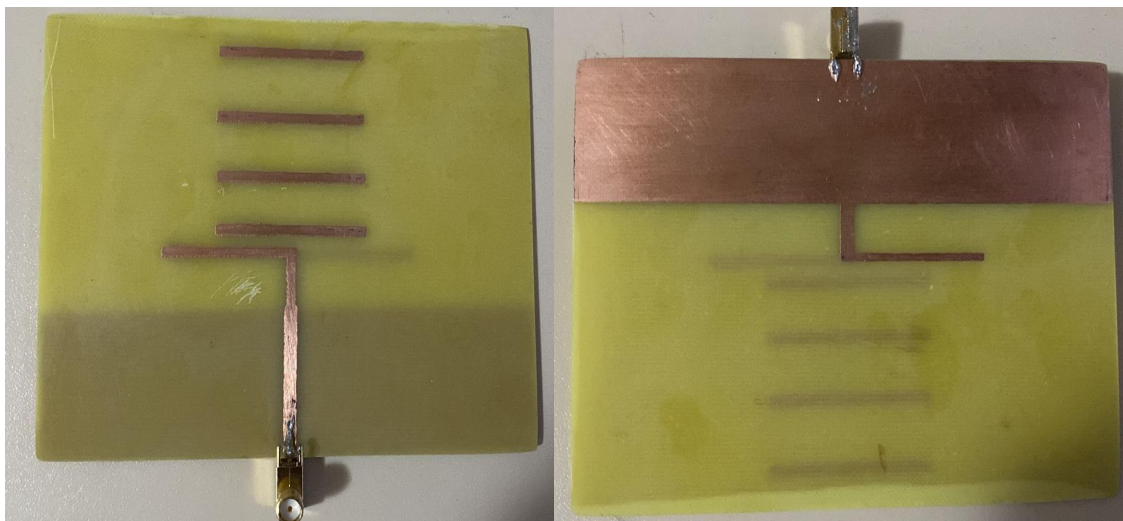


Figura 12: Antena Yagi-Uda de microfita com frequência de operação de 2,45Ghz

5. MEDIÇÕES

As medições dos parâmetros S11 e impedância de entrada são destacadas na Figura 13 e 14. Embora, nas simulações, a antena tenha operado precisamente em 2,45 GHz, as medições revelaram uma pequena diferença de aproximadamente 40 MHz, convergindo para 2,49 GHz. No entanto, essa discrepância pode ser atribuída às limitações/precisão do equipamento utilizado ou ainda à imprecisão na confecção da placa utilizando o método caseiro fotográfico, o qual é relativamente bom porém não é tão preciso. Importante notar que, apesar dessa variação, a antena projetada atendeu aos requisitos pretendidos.

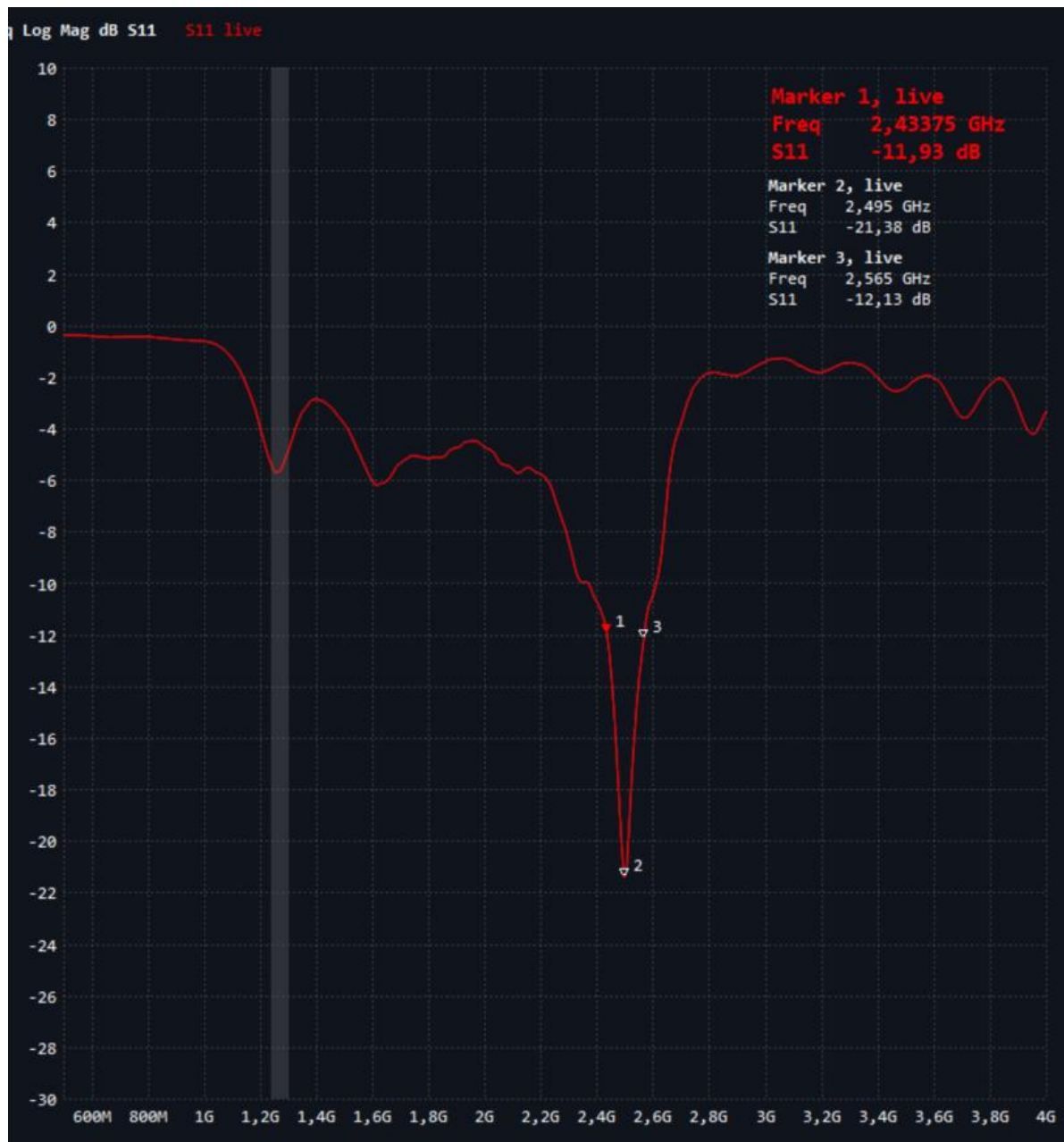


Figura 13: Resultados das medições da antena referente ao parâmetro S11.

A impedância de entrada ficou em cerca de 43 ohms, também relativamente próximo dos 50 ohms que era o objetivo. Outro fator que pode ter afetado os valores medidos é a espessura do casador de impedância que é muito sensível à alteração, uma vez que o método fotográfico de impressão da placa pode apresentar imprecisões no valor da dimensão Wf.

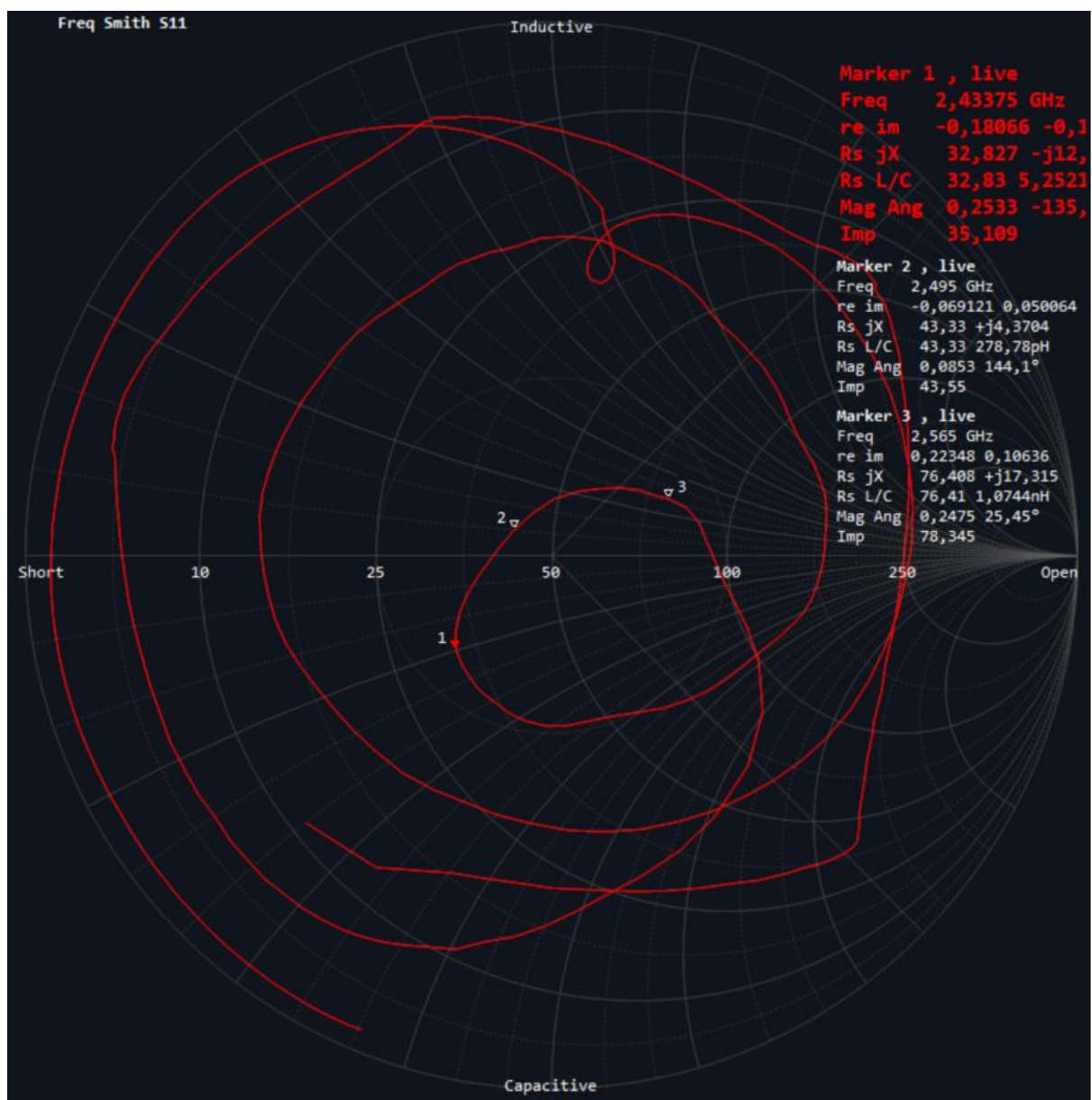


Figura 13: Resultados das medições da antena referente à impedância de entrada.

6. ANÁLISES E CURIOSIDADES

Dado que os parâmetros geométricos da antena são dependentes do comprimento de onda, foram conduzidos estudos para derivar equações que descrevessem a relação entre o design da Yagi-Uda implementada e a impedância de entrada em função do comprimento de onda, espessura do cobre, espessura da placa e do casador de impedância (W_f).

A equação resultante, desenvolvida para descrever a impedância de entrada, é a seguinte:

$$Z_0 = \frac{\lambda * t_c}{(1 - 1,15ht_c) \sin(W_f)}, \text{ para os valores da tabela 1, } Z_0 = 49.73 \, \Omega$$

Equação 2

Fazendo a operação inversa para obter o valor de W_f , tem-se:

$$W_f = \sin^{-1} \left[\frac{\lambda * t_c}{(1 - 1,15ht_c) Z_0} \right], \text{ para os valores da tabela 1, } W_f = 2,90 \text{ mm}$$

Equação 3

A equação que descreve as dimensões dos diretores:

$$LD_n = \left(\frac{1}{h} + \frac{t_c * \epsilon_r}{W} + \frac{n * h}{200} \right) * \lambda, \text{ onde } n = 0, 1, 2, \dots, \left(\frac{2 * W}{\lambda} - 1 \right)$$

Equação 4

A equação que descreve a dimensão da espessura dos diretores:

$$W_D = \sqrt{W_f}, \text{ para } W_f = 2,90 \text{ mm} \rightarrow W_D = 1.703 \text{ mm}$$

Equação 5

A equação que descreve a dimensão da espessura da haste de sustentação do dipolo na face inferior, com base na tabela 1 e figura 2:

$$W_s = W_D^2 \text{ para } W_D = 1.703 \text{ mm} \rightarrow W_s = 2.90 \text{ mm}$$

Equação 6

São curiosidades e análises que podem resultar em um artigo ou tema de TCC.

7. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

A partir da proposta inicial, foi possível simular, projetar e medir os parâmetros da antena de microfita Yagi-Uda na frequência de 2,45 GHz, mantendo a impedância de entrada em 50 ohms.

Durante o desenvolvimento, como a maioria dos valores estava relacionada ao comprimento de onda, tentou-se derivar equações que descrevessem não apenas a antena para a frequência de 2,45 GHz, mas também para uma ampla faixa de frequências. Contudo, devido à não linearidade dos parâmetros em relação ao comprimento de onda, encontrar essas equações tornou-se desafiador.

Apesar disso, esforços estão sendo mobilizados para identificar padrões que possam se aplicar a diferentes frequências, reconhecendo a importância e o valor que isso traria para a comunidade de engenharia.

8. REFERÊNCIAS

- IEEE, Department of Electrical Engineering Gunadarma University, Depok, Indonesia. Microstrip-Fed Yagi-Uda Dipole Array Antenna At 3.6 Ghz Frequency For 5G Application. Acesso em 10 dez 2023.
- Balanis, Antenna Theory – Analysis and Design, 3ª ed, 10.3.3 Yagi-Uda Array of Linear Elements. Acesso em 2 dez 2023.
- Medidas de Caracterização Eletromagnética de Materiais em Espaço Livre na Banda C. https://www.sige.ita.br/edicoes-anteriores/2019/st/ST_12_3.pdf. Acesso em 8 dez 2023.

