

Estudo e Montagem de um Sistema de Radar Monopulso

Relatório Parcial submetido à
Universidade Federal do ABC
(UFABC) como parte dos requisitos do
projeto de Trabalho de Graduação III.

André Gea Martinez Stefani

Santo André – São Paulo

Outubro/2013

Estudo e Montagem de um Sistema de Radar Monopulso

Relatório Parcial submetido à
Universidade Federal do ABC
(UFABC) como parte dos requisitos do
projeto de Trabalho de Graduação III.

André Gea Martinez Stefani
(Aluno)
Engenharia de Informação
UFABC

Prof. Dr. Marcelo Perotoni
(Orientador)
Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas (CECS)
UFABC

Prof. Dr. Stilante Manfrim
(Co-orientador)
Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas (CECS)
UFABC

Santo André – São Paulo

Outubro/2013

Título do Trabalho: Estudo e Montagem de um Sistema de Radar Monopulso

Resumo:

Este trabalho consiste no estudo, na simulação e na implementação de um sistema de radar monopulso. Para esse fim serão utilizadas duas antenas impressas do tipo Yagi que, combinadas com uma junção híbrida de 180° gerarão o padrão de radiação típico do radar.

Abstract:

This works consists on the study, simulation and evaluation of a monopulse-radar system. It consists of two printed Yagi antennas combined with a 180° hybrid junction that will generate the typical farfield response of this kind of radar.

Lista de Figuras

Figura 1: (a) Controle de tráfego aero [9] (b) Controle de velocidade terrestre [Apu Gomes/Folhapress].....	9
Figura 2: Tipos de sistemas de Radar [6].....	10
Figura 3: Radares Monoestático (a) e Biestático (b)	12
Figura 4: Circulador [8].....	12
Figura 5: Padrões do diagrama de radiação das antenas em 2D. (a)Mesma fase (b)Defasadas em 180°	17
Figura 6: Possíveis situações para o radar monopulso	18
Figura 7: Representação da junção Híbrida de 180° [1].....	19
Figura 8: Matriz de espalhamento da Híbrida 180° [1]	20
Figura 9: (a)Híbrida em anel ou "Rat-race". (b)Híbrida com linhas acopladas. (c)"Magic-T" [1].....	20
Figura 10: Configuração da híbrida 180°	21
Figura 11: Estrutura modelada	22
Figura 12: Definições dos caminhos elétricos(a) $2 Z_0 90^\circ$ (b) $2 Z_0 270^\circ$	23
Figura 13: Parâmetros S11; S22; S33; S44: portas casadas	24
Figura 14: Magnitude de S12 e S13 (em dB)	24
Figura 15: Fase de S12 e S13 (em graus)	25
Figura 16: Magnitude de S42 e S43 (em dB)	25
Figura 17: Fase de S42 e S43 (em graus)	26
Figura 18: S14 e S41: portar isoladas	26
Figura 19: Vistas do "rat race" simulado.....	27
Figura 20: Cálculo da largura das linhas	28
Figura 21: Cálculo do tamanho das trilhas	29
Figura 22: Parâmetros S11, S22, S33 e S44: portas casadas	30
Figura 23: Magnitude de S12 e S13 (em dB)	30
Figura 24: Fase de S12 e S13 (em graus)	31
Figura 25: Magnitude de S42 e S43 (em dB)	31
Figura 26: Fase de S42 e S43 (em graus)	32
Figura 27: Parâmetros S14 e S41	32
Figura 28: (a) Radar Monopulso usada na banda S [12]. (b) Antena Monopulso usada na Banda X alimentada com 4 antenas de abertura [13].....	33

Figura 29: Antenas de Microfita em formato circular (a) e em formato quadrangular (b) [3]	35
Figura 30: Configuração da antena Yagi-Uda [3]	36
Figura 31: Medidas de uma das antenas utilizadas	37
Figura 32: Parâmetro S11, em dB.....	39
Figura 33: Parâmetro S11.	40
Figura 34: Ligação direta do gerador de sinais com o analisador de espectro	41
Figura 35: Experimento para calcular o ganho das antenas impressas Yagi. ...	42
<i>Figura 36: Montagem alternativa do sistema de radar monopulso.....</i>	<i>43</i>
Figura 37: Possíveis medições nos analisadores de espectro	44
Figura 38: À frente, antena Tx ligada ao gerador de sinal. Ao fundo, antenas Rx ligadas aos analisadores de espectro	45
Figura 39: Configuração do gerador de sinais (2,45 GHz e 0dBm).....	45
Figura 40: (a) Distância entre as antenas Rx. (b) Limitação física: o tamanho das bases	46
Figura 41: Fator de array para distância de $0,57 \lambda$	47
Figura 42: Dois analisadores de espectro e as duas antenas ligadas no "rat race"	48
Figura 43: Legenda das portas da híbrida 180° e o que estão conectadas nelas	48
Figura 44: Cálculo do deslocamento angular	49
Figura 45: Disposição dos equipamentos no laboratório.....	50
Figura 46: Gráfico das medidas dos dois padrões	51
Figura 47: Segunda montagem do sistema de radar monopulso	52
Figura 48: Interferência do Wi-Fi no experimento	53
Figura 49: Gráfico dos valores de potência medidos	54
Figura 50: Comparação das curvas teóricas e práticas	55

Lista de equações

- 1 Densidade de potência incidente no alvo
- 2 Seção transversal do radar
- 3 Densidade de potência dispersa que volta a antena de transmissão
- 4 Área efetiva
- 5 Potência recebida pela antena de recepção
- 6 Máxima distância detectável
- 7 Definição da impedância
- 8 Definição de constante
- 9 Impedância das linhas de transmissão
- 10 Largura das trilhas de impedância 50Ω
- 11 Largura das trilhas de impedância 70Ω
- 12 Tamanho das trilhas de impedância 50Ω
- 13 Tamanho das trilhas de impedância 70Ω
- 14 Circunferência do “rat race”
- 15 Raio do “rat race”
- 16 Fórmula de Friis, considerando que as antenas são iguais
- 17 Cálculo da potência recebida, desconsiderando o cabo e conectores
- 18 Cálculo do ganho das antenas (linear)
- 19 Cálculo do ganho das antenas (em dB)
- 20 Cálculo do fator de array
- 21 Cálculo do deslocamento angular

Lista de tabelas

- 1 Bandas de frequências disponíveis para sistema de Radar

Sumário

1. Contextualização e Justificativa	8
2. Fundamento teórico	10
2.1 Radar	10
2.1.1 Fórmulas do radar.....	14
2.1.2 Radar Monopulso.....	16
2.1.2.1 Monopulso por comparação de Amplitude – ACM	17
3. Componentes passivos.....	19
3.1 Junção híbrida 180°	19
3.1.1 Simulações	22
3.2 Antena.....	33
3.2.1 Antenas de Microfita	35
3.2.2 Antena Yagi-Uda.....	36
3.2.3 Antena Yagi utilizada	37
3.2.3.1 Medida do parâmetro S11	39
3.2.3.2 Cálculo do ganho.....	41
4. Parte experimental.....	43
5. Conclusões	56
6. Referências Bibliográficas	58
Anexo A: Valores coletados na primeira montagem.....	59
Anexo B: Valores coletados na segunda montagem.....	60

1. Contextualização e Justificativa

As primeiras aplicações dos radares datam da Segunda Guerra Mundial, quando foram desenvolvidos variedades de radares para os combates aéreos na Europa e nos EUA. Os radares tornaram-se elementos aplicados nas bases terrestres, em navios, em submarinos e em aviões de combate. Esta busca por novas teorias ou tecnologias que objetivavam radares mais eficientes e outros equipamentos que prejudicassem as funcionalidades de um radar inimigo é conhecida por guerra eletrônica [1].

Neste ambiente das formulações teóricas, limitadas entre as questões econômicas, políticas e tecnológicas da época, não bastava um dispositivo eficiente, mas um dispositivo acessível às economias em período de guerra, aos modos de produção do período e também deveria ser tecnologicamente viável. O fator custo versus produção, submetido à urgência dos conflitos, foi indubitavelmente determinante para o desenvolvimento dos radares, e, consideradas as devidas conjecturas, ainda continua sendo o fator determinante para futuros progressos na área [2].

Com o advento da Guerra Fria, além das motivações relacionadas com a corrida armamentista, surgiram os esforços em direção aos sistemas aeroespaciais. Estes sistemas passaram a formar, com o tempo, algumas linhas diretrizes de pesquisas no processo tecnológico. O sistema radar, então, torna-se um acessório essencial nas missões espaciais, e molda-se não apenas em um elemento constitutivo e definitivo para defesa territorial, mas é aplicado, a partir de então, com maior frequência em mapeamentos meteorológicos do espaço aéreo para fins civis [3].

Sistemas de radares modernos usados em muitas áreas do controle de tráfego aéreo civil e aplicações militares usam a técnica de detecção por monopulso. Detecção de ângulo melhorada, resolução e precisão angular oferecido por radares monopulso são suas principais vantagens em relação aos sistemas de radares clássicos [4].

Mesmo se tornando cada vez mais importante nas aplicações civis, principalmente para a navegação marítima e aérea, o foco principal do radar, e colaborador do custo de quase todo o seu desenvolvimento, é a área de defesa [5].

Na figura 1 são apresentadas algumas aplicações de radar.



Figura 1: (a) Controle de tráfego aero [6] (b) Controle de velocidade terrestre [Apu Gomes/Folhapress]

2. Fundamento teórico

2.1 Radar

Radar é um acrônimo para *Radio Detection And Ranging* que em português significa localização e detecção através de radiofrequência. Eles são dispositivos que transmitem ondas eletromagnéticas e as detectam após serem refletidas pelo alvo. Analisando essa informação é possível determinar características do alvo, como distância e velocidade.

Radar é uma das aplicações mais comuns da tecnologia de micro-ondas. Na sua operação básica, um transmissor envia um sinal que é parcialmente refletido por um alvo distante, e então detectado por um receptor sensível. A distância do alvo é determinada pelo tempo necessário para que o sinal viaje até o alvo e retorne e a velocidade radial do alvo está relacionada com o efeito de Doppler do sinal de retorno (defasagem em frequência) [7].

A figura 2 apresenta alguns tipos de radares.

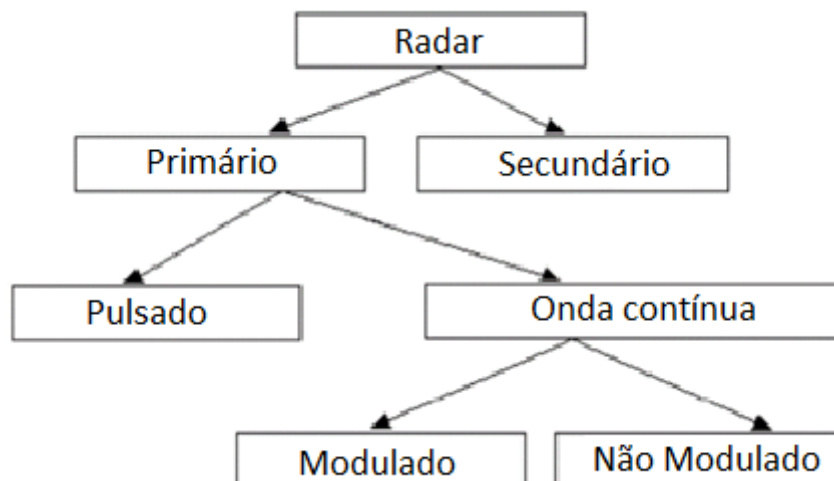


Figura 2: Tipos de sistemas de Radar [8]

O radar primário transmite sinais que são refletidos pelo alvo. Os ecos produzidos são recebidos e avaliados. Isto significa que, diferente das unidades de radar secundário, uma unidade de radar primário recebe seus próprios sinais emitidos como um eco, seu alvo é dito como passivo.

Em um radar secundário, os alvos devem possuir um *transponder* (*transmitting responder* – transmissor de resposta) que recebe o sinal do radar e responde com outro sinal, a partir dessa resposta, é possível obter muito mais informações do que uma unidade de radar primário, neste caso os alvos são tidos como ativos [8].

Uma analogia que pode ser feita, é comparar este tipo de radar com a tecnologia RFID (*Radio Frequency IDentification*), que utiliza tanto etiquetas passivas (não enviam sinal, somente refletem) como etiquetas ativas (radiam ondas eletromagnéticas com informações próprias).

Outro tipo de classificação de um sistema de radar é se ele é monoestático ou biestático. No radar monoestático a mesma antena é utilizada para transmitir e receber, ao passo que no radar biestático são utilizadas duas antenas separadas para essas funções. A maior parte dos radares é do tipo monoestático [8].

Antenas separadas são também usadas para obter o isolamento necessário entre o transmissor e o receptor. Na figura 3, as representações de um radar monoestático e de um biestático são apresentadas.

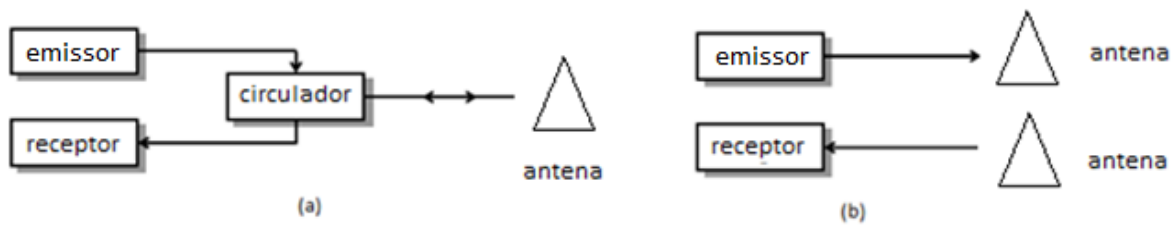


Figura 3: Radares Monoestático (a) e Biestático (b)

No radar monoestático, o circulator (figura 4) tem a função isolar a emissão e a recepção da antena. Ele tem uma interface que possibilita que o sinal possa fluir a partir do transmissor (porta 1) para a antena (porta 2) durante a transmissão, e a partir da antena (porta 2) ao receptor (porta 3) durante a recepção [9].

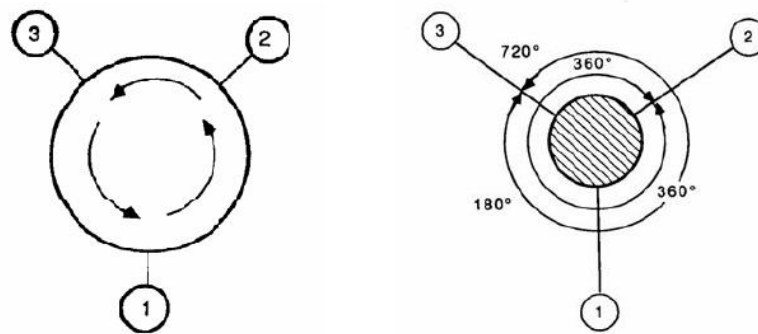


Figura 4: Circulador [9]

Outra característica importante do radar é sua frequência de operação. As bandas de frequência de transmissão influenciam a arquitetura da antena e do receptor. Na Tabela 1 são apresentadas as faixas de frequência padronizadas para radares [10].

Tabela 1: Possíveis bandas do radar [10]

Banda do Radar	Faixa de Frequência	Bandas definidas pelos padrões ITU
HF	3 – 30 MHz	
VHF	30 – 300 MHz	138 – 144 MHz 216 – 225 MHz
UHF	300 – 1.000 MHz	420 – 450 MHz 890 – 942 MHz
Banda L	1 – 2 GHz	1,215 – 1,400 GHz
Banda S	2 – 4 GHz	2,30 – 2,5 GHz 2,7 – 3,7 GHz
Banda C	4 – 8 GHz	5,250 – 5,925 GHz
Banda X	8 – 12 GHz	8,50 – 10,68 GHz
Banda Ku	12 – 18 GHz	13,4 – 14,0 GHz 15,7 – 17,7 GHz
Banda K	18 – 27 GHz	25,05 – 24,25 GHz
Banda Ka	27 – 40 GHz	33,4 – 360 GHz
Banda V	40 – 75 GHz	59 – 64 GHz
Banda W	75 – 110 GHz	76 – 81 GHz 92 – 100 GHz
Ondas Milimétricas	110 – 300 GHz	126 – 142 GHz 144 – 149 GHz

Na próxima sessão serão estudadas as propriedades do radar.

2.1.1 Fórmulas do radar

Para calcular a densidade de potência incidente S_t em uma antena, consideramos a potência irradiada pelo transmissor P_t através de uma antena com ganho G , a uma distância R , temos:

$$S_t = \frac{P_t G}{4\pi R^2} \quad (1)$$

Assume-se que o alvo está no sentido do feixe principal da antena (região de máximo ganho). O alvo irá espalhar a energia incidente em várias direções, a razão entre a energia dispersa numa dada direção para a densidade de potência incidente é definida como a seção transversal de radar σ . Matematicamente:

$$\sigma = \frac{P_s}{S_t} \quad (2)$$

Onde P_s é a potência total espalhada pelo alvo e S_t a densidade de energia espalhada. A seção transversal do radar, portanto, tem as dimensões de área e é uma propriedade do próprio alvo. Ela depende dos ângulos de incidência e de reflexão, bem como da polarização da onda incidente.

A densidade de potência do campo re-irradiado decai com $1/4\pi R^2$. Assim, a densidade de potência do campo disperso de volta para a antena (*backscattered*) de recepção é dada por:

$$S_r = \frac{P_t G \sigma}{(4\pi R^2)^2} \quad (3)$$

Acrescentando a ideia de área efetiva A_e

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

Onde λ é o comprimento de onda da frequência utilizada na transmissão e D é a directividade da antena. Tem-se que:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (5)$$

Esta é a equação do radar. A potência recebida varia de $1/R^4$, o que implica que um transmissor de alta potência e um receptor sensível de baixo ruído são necessários para detectar alvos a longas distâncias.

Devido aos ruídos recebidos pela antena bem como gerados pelo receptor, há uma potência mínima detectável no receptor (acima do piso de ruído - *noise floor*). Se esta potência é P_{min} , então é possível reescrever a Eq. 5 para obter a máxima distância detectável.

$$R_{max} = \left[\frac{P_t G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 P_{min}} \right]^{1/4} \quad (6)$$

Neste trabalho será analisado um sistema de radar de monopulso, portanto será aprofundada sua teoria de funcionamento.

2.1.2 Radar Monopulso

Esse sistema de radar usa o princípio de redes de antenas para gerar padrões de radiação diferentes modificando as excitações relativas das antenas – os feixes têm nulos e máximos distribuídos espacialmente de maneira a discriminar o alvo de maneira comparativa. O ângulo de chegada do sinal de eco pode ser determinado através da medição da fase relativa ou da amplitude relativa do pulso de eco recebido em cada feixe [5].

A técnica monopulso pode ser classificada como ACM, acrônimo do inglês *Amplitude-Comparison Monopulse* – monopulso por comparação de amplitude ou PCM, *Phase-Comparison Monopulse* – monopulso por comparação de fase [11].

Neste projeto optou-se por utilizar a técnica de comparação por amplitude.

2.1.2.1 Monopulso por comparação de Amplitude – ACM

O uso do radar monopulso caracteriza-se como um tipo de *beamforming*, ou seja, a rede de duas antenas é fixa, mas possui uma distribuição de campo distante espacial variável, realizada por uma rede de distribuição de sinal (*corporate feed*). Outros exemplos semelhantes podem ser citados como a matriz de Butler ou a lente de Rotman [5]. Uma alternativa ao beamforming consiste em rodar a antena ou rede mecanicamente, varrendo o espaço de maneira cíclica.

Em radares monopulso por comparação de amplitude, o posicionamento do alvo é obtido pela comparação da amplitude do sinal recebido quando o sinal chega em fase nas duas antenas, com a amplitude do sinal quando este chega com uma defasagem de 180° entre as duas antenas.

Quando o sinal incide nas duas antenas com a mesma fase, o diagrama de radiação tem um maior ganho próximo ao eixo de simetria, e quando o sinal apresenta uma defasagem de 180° , essa mesma região apresenta um nulo. Neste último caso, o ganho ocorre ao se aumentar o deslocamento angular em relação ao eixo de simetria. A figura 5 apresenta a diferença do diagrama de radiação entre esses dois casos.

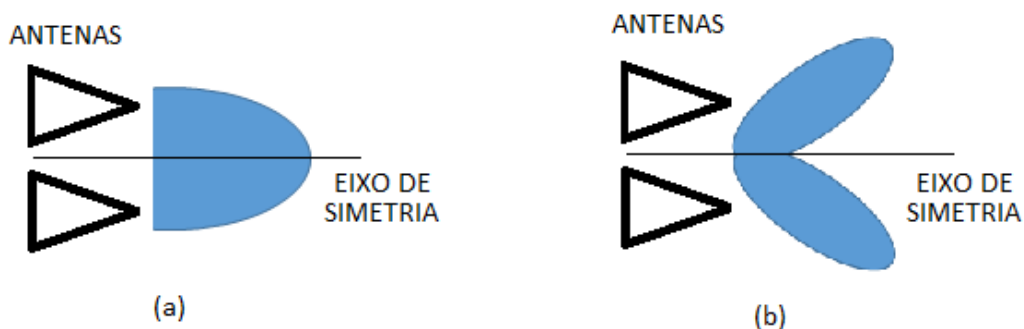


Figura 5: Padrões do diagrama de radiação das antenas em 2D. (a) Mesma fase (b) Defasadas em 180°

Na situação apresentada na figura 6.a, o sinal medido pelo radar é maior quando não há diferença de defasagem entre os sinais que alimentam as antenas, oposto do que ocorre na situação 6.b, em que o sinal na recepção do radar será maior quando as antenas são alimentadas por um sinal defasado de 180° .

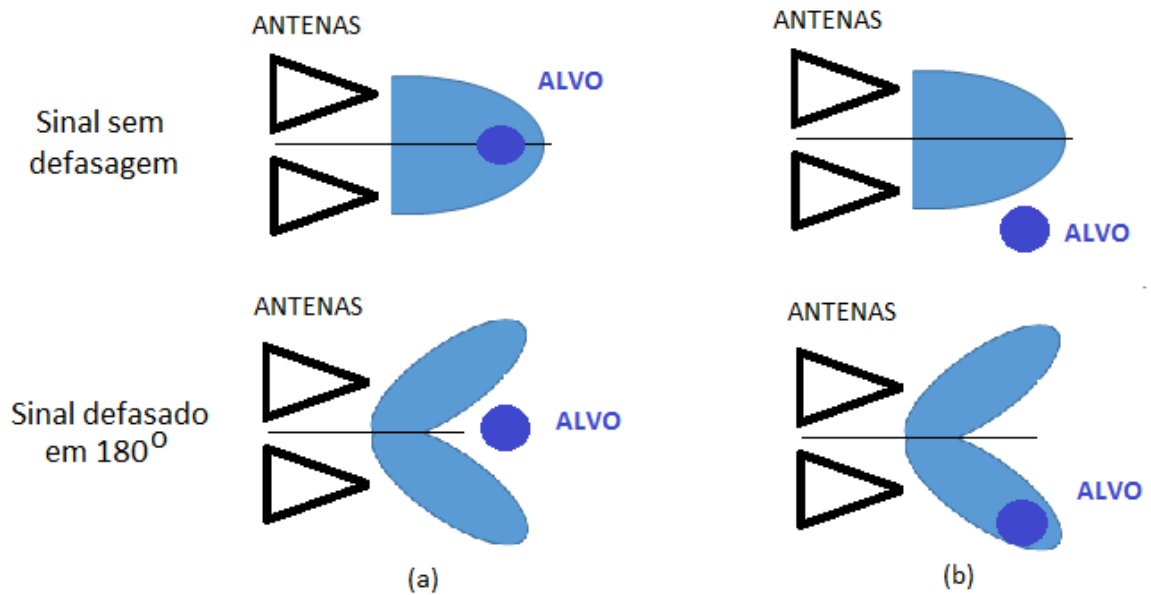


Figura 6: Possíveis situações para o radar monopulso

Para tecnicamente obter essas duas situações, as antenas alimentadas por um sinal sem defasagem e alimentadas por um sinal defasado em 180° , será utilizada a híbrida de 180° , que será estudada na próxima sessão.

3. Componentes passivos

3.1 Junção híbrida 180°

A junção híbrida 180° é uma rede de quatro portas com uma diferença de fase entre as duas portas de saída de 180° . Um sinal aplicado à porta 1 será igualmente dividido em dois componentes em fase nas portas 2 e 3, e a porta 4 ficará isolada. Se a entrada é aplicada na porta 4, o sinal será igualmente dividido em duas componentes, com uma diferença de fase de 180° nas portas 2 e 3, e a porta 1 ficará isolada [7].

Na figura 7 é apresentada a representação de uma junção híbrida 180° .

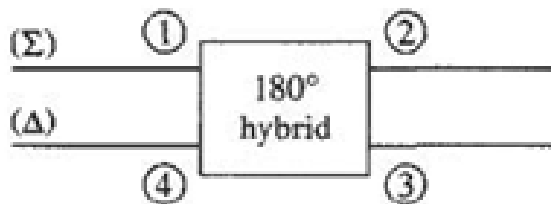


Figura 7: Representação da junção Híbrida de 180° [7]

Quando operando como um combinador, com sinais de entrada aplicados às portas 2 e 3, a soma das entradas será formada na porta 1, enquanto que a diferença será formada na porta 4. Assim, as portas 1 e 4 são referidas como as portas de soma (Σ) e diferença (Δ), respectivamente [7].

A matriz de espalhamento S para uma híbrida 180° ideal de 3 dB (que divide a potência de maneira igual nas respectivas saídas) é mostrada na figura 8.

$$[S] = \frac{-j}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Figura 8: Matriz de espalhamento da Híbrida 180° [7]

Sua matriz de espalhamento é unitária e simétrica. A híbrida 180° pode ser implementada em diversas formas. O híbrido em anel (ou “rat-race”) mostrado na Figura 9.a, possui forma planar (*microstrip* ou *stripline*). Outro tipo de híbrida 180° usa linhas acopladas, como mostrado na Figura 9.b. Existe ainda um terceiro tipo que é a junção guia de onda (ou “*magic-T*”) ilustrado na Figura 9.c [7].

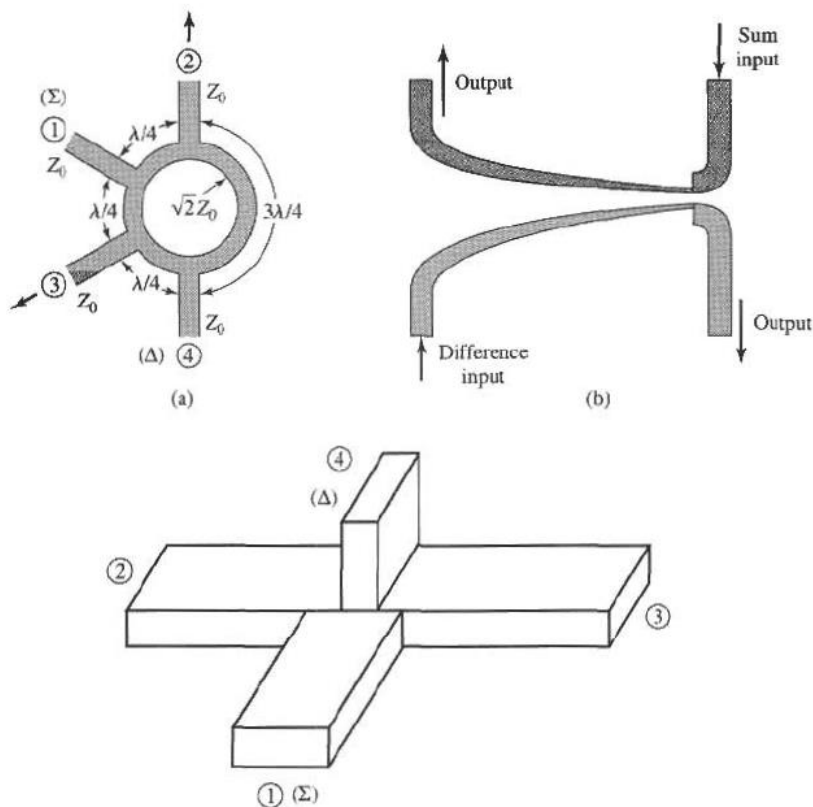


Figura 9: (a)Híbrida em anel ou "Rat-race". (b)Híbrida com linhas acopladas. (c)"Magic-T" [7]

Neste projeto será usado o tipo “*rat-race*” planar atuando como um combinador. Isso porque o interesse é produzir um padrão em que as antenas operem em mesma fase e outro com elas operando 180° defasadas entre si.

Isso será possível, alimentando o “*rat race*” com as antenas nas portas 2 e 3, assim a saída na porta 1 será a combinação dos diagramas das antenas alimentadas sem defasagem, esse padrão recebe o mesmo nome da porta, padrão soma. E na saída da porta 4, temos a combinação dos diagramas com as antenas alimentadas 180° defasadas, este padrão é chamado de diferença, também pelo mesmo motivo anterior. Na figura 10 é possível observar essa configuração.

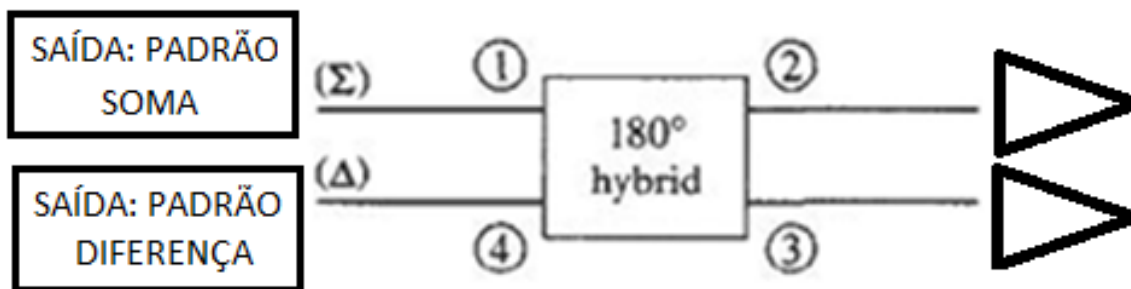


Figura 10: Configuração da híbrida 180°

3.1.1 Simulações

Foi feita uma simulação no CST Design Studio® [12] para um melhor entendimento das propriedades da híbrida 180°. A simulação foi feita na frequência de 2.45GHz, pois é a frequência de operação das antenas que serão usadas no projeto (conforme sessão 3.2.3).

A estrutura modelada é apresentada na figura 11.

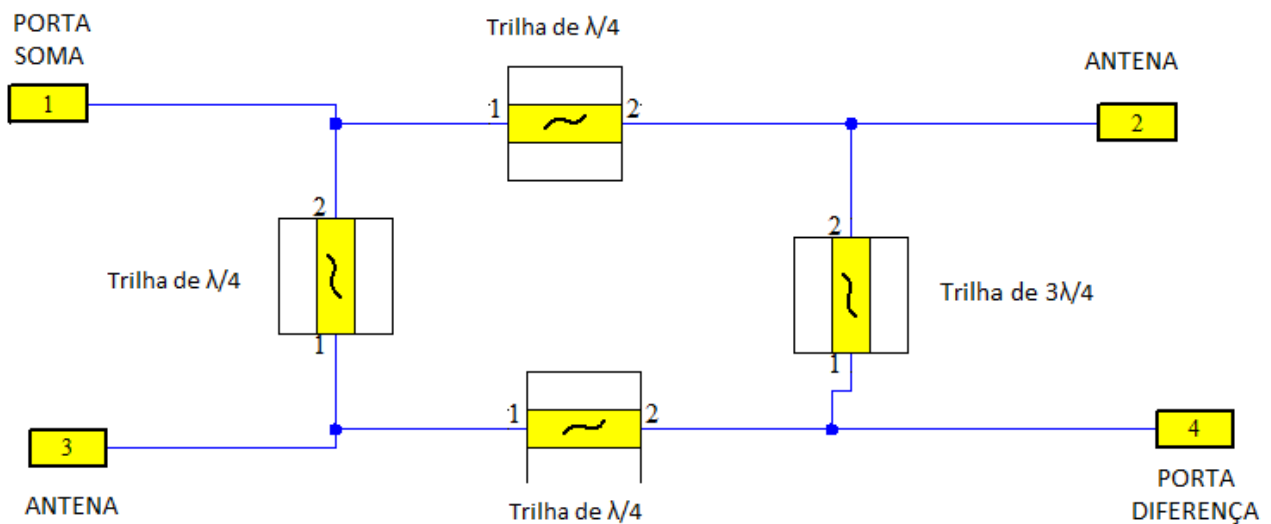


Figura 11: Estrutura modelada

Entre as portas 1-2, 1-3 e 3-4 existe uma linha de transmissão com impedância $\sqrt{2}Z_0$ e comprimento 90° e outra linha de $\sqrt{2}Z_0$ 270° entre as portas 2-4. Estão sendo usados:

$$Z_0 = 50 \Omega$$

(7)

$$\sqrt{2} = 1,41 \tag{8}$$

Portando a impedância da linha de transmissão Z é:

$$Z = \sqrt{2} Z_0 = 1,41 * 50 \approx 70\Omega \tag{9}$$

No comprimento elétrico temos que 90° é equivalente a um quarto de comprimento de onda ($0,25\lambda$) e 270° vale três quartos ($0,75\lambda$). No CST, essas linhas foram configuradas conforme apresentado na figura 12.

Definition Frequency	2.45	GHz	Definition Frequency	2.45	GHz
Electrical Length	0.25		Electrical Length	0.25*3	
Epsilon	1.0		Epsilon	1.0	
Impedance	1.41*50	Ohm	Impedance	1.41*50	Ohm
Const. Attenuation	0.0		Const. Attenuation	0.0	

(a) (b)

Figura 12: Definições dos caminhos elétricos (a) $\sqrt{2} Z_0 90^\circ$ (b) $\sqrt{2} Z_0 270^\circ$

Pode-se observar na figura 13 que todas as portas estão casadas, pois os parâmetros S11, S22, S33 e S44 estão com -50 dB de isolamento.

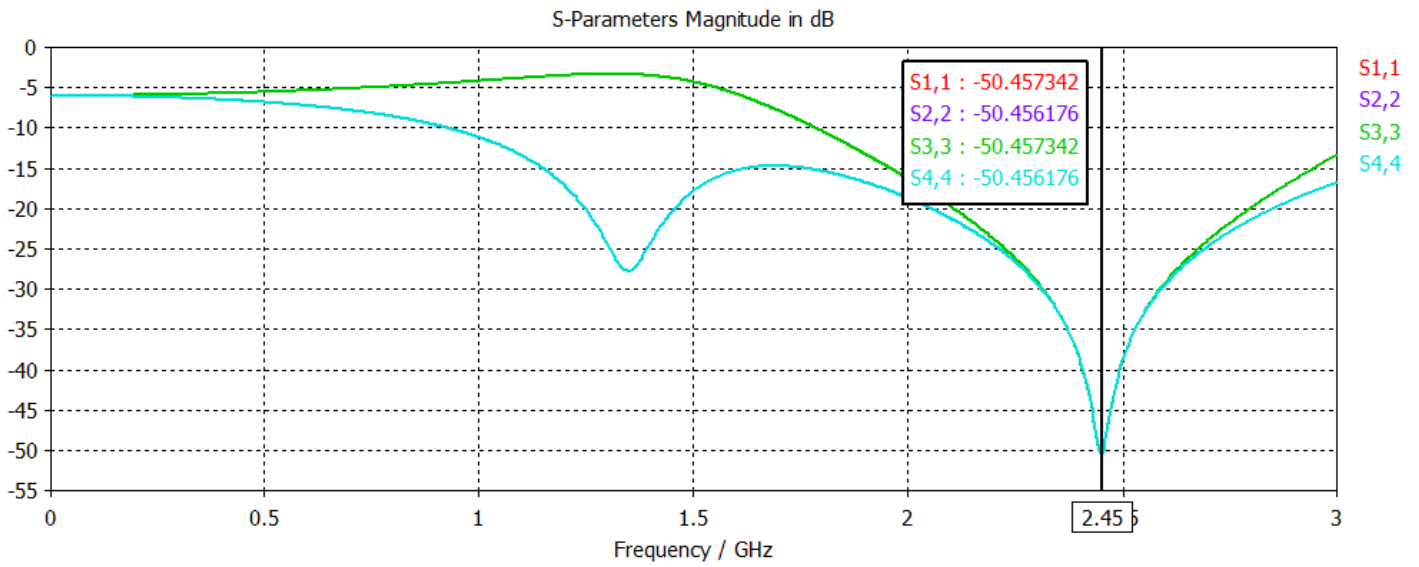


Figura 13: Parâmetros S11; S22; S33; S44: portas casadas

Na figura 14 observa-se que os sinais das portas 2 e 3 possuem a metade da potência (-3dB) na porta 1 (porta soma) e na figura 15 é possível visualizar que esses sinais possuem a mesma fase.

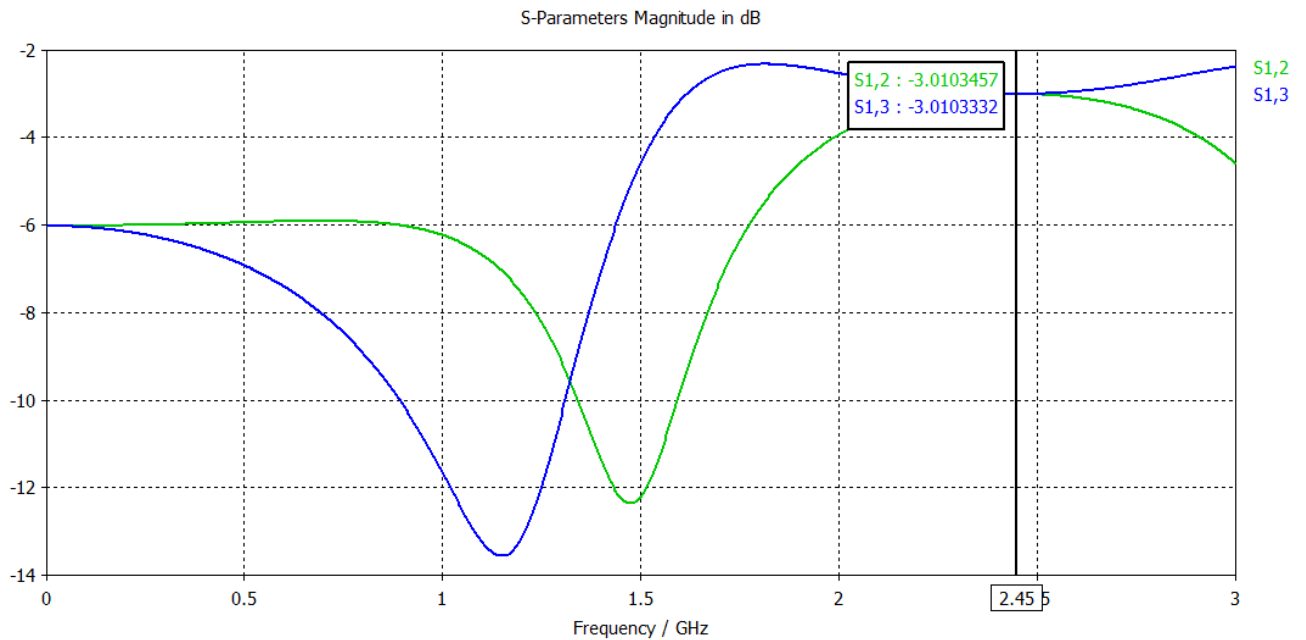


Figura 14: Magnitude de S12 e S13 (em dB)

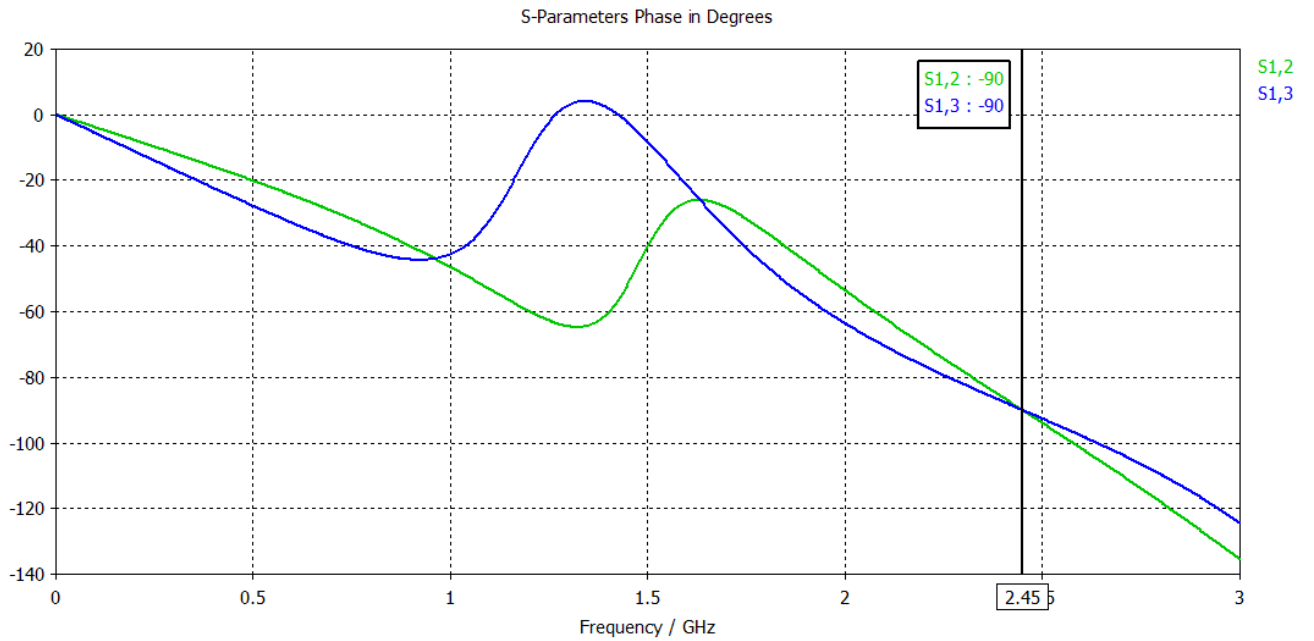


Figura 15: Fase de S12 e S13 (em graus)

Na figura 16 observa-se que os sinais das portas 2 e 3 possuem a metade da potência (-3dB) na porta 4 (porta diferença) e na figura 17 é possível observar que possuem uma defasagem de 180°.

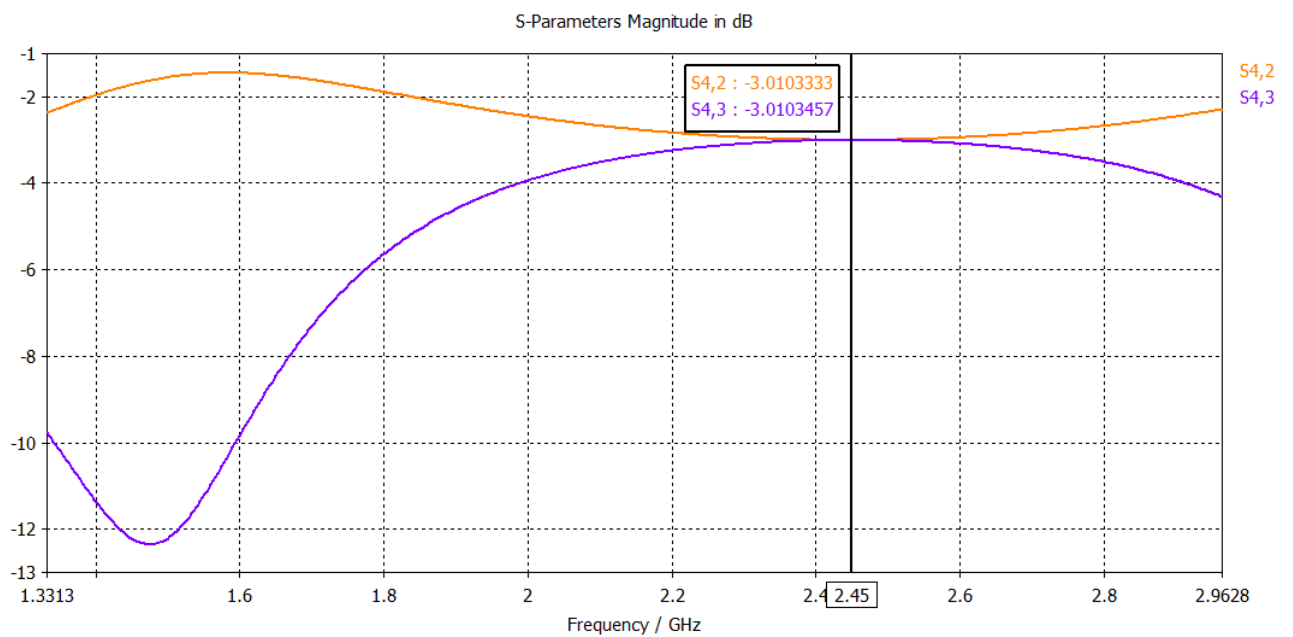


Figura 16: Magnitude de S42 e S43 (em dB)

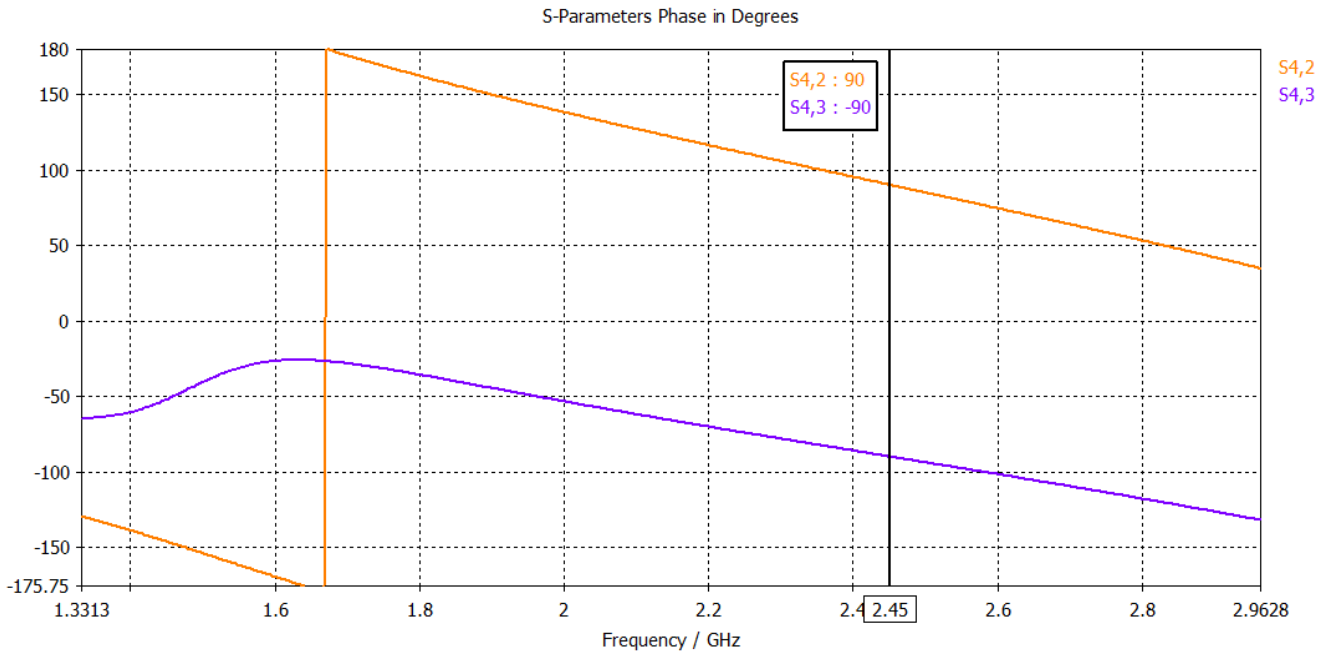


Figura 17: Fase de S42 e S43 (em graus)

Pode-se observar na figura 18 que as portas 1 (soma) e a 4 (diferença) são isoladas entre si, com -70 dB.

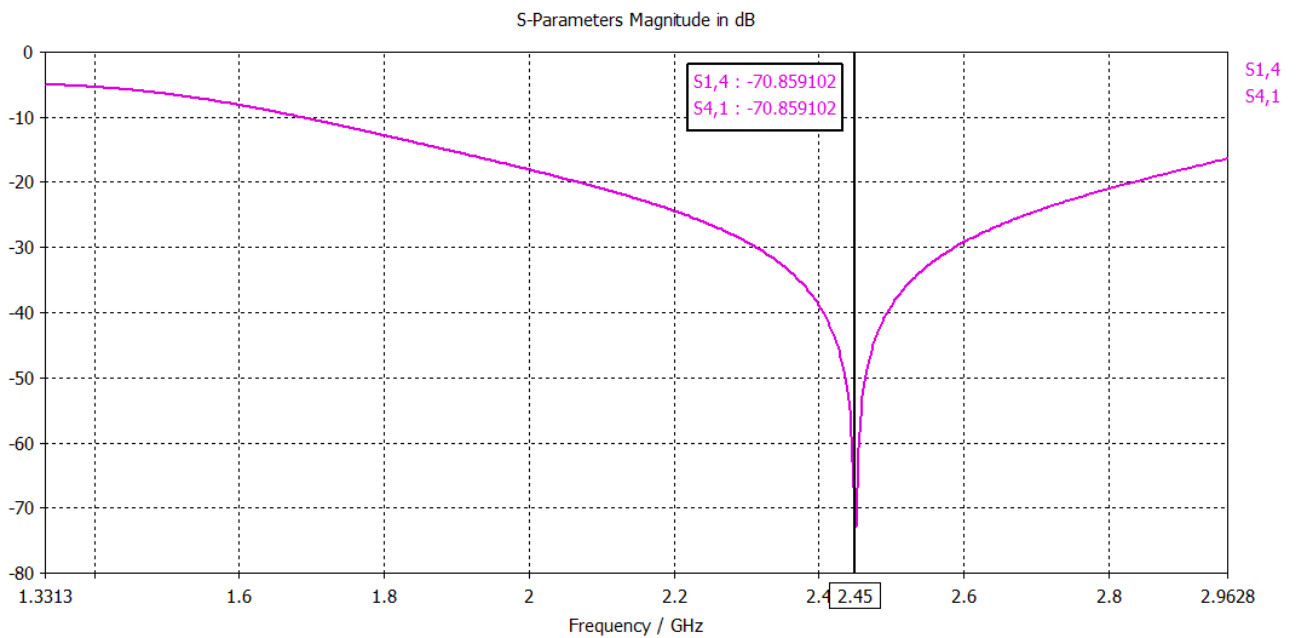


Figura 18: S14 e S41: portar isoladas

Com esta simulação foi possível verificar todas as propriedades da híbrida 180°, como dito anteriormente, neste projeto será usado o tipo “rat race”, simulado a seguir. Para isso, foi utilizado o CST Microwave Studio® [12], que é um simulador eletromagnético 3D, enquanto o Design Studio é um simulador de circuitos. Na figura 19 pode-se observar o modelo em duas vistas. A simulação anterior considerou as linhas em sua expressão matemática analítica, enquanto as avaliações a seguir levam em consideração efeitos mais realistas na modelagem 3D, tais como acoplamentos entre linhas, descasamentos locais devidos a gradientes geométricos e radiação.

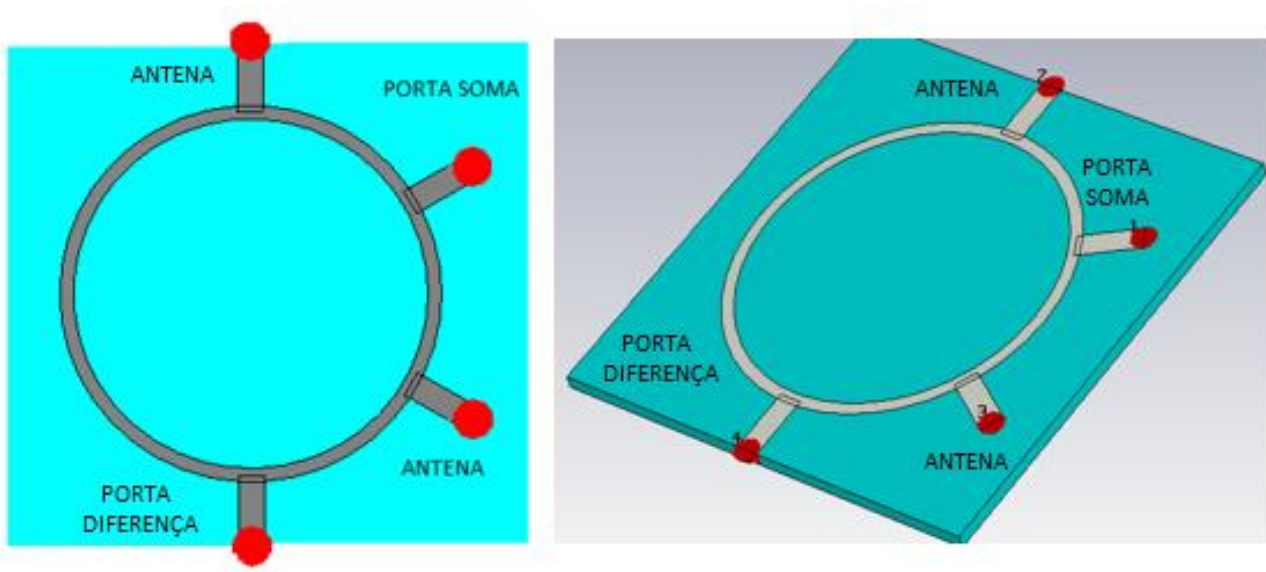


Figura 19: Vistas do "rat race" simulado

Primeiramente, foi definido para a simulação que a espessura do substrato possui 1 mm, sendo usado o FR-4, com constante dielétrica de 4,3. Como a impedância característica da linha também é conhecida (de acordo

com Eq.9), usou-se uma macro VBA do próprio CST para calcular o tamanho e a largura das trilhas, como ilustrado na figura 20. Os resultados obtidos foram:

$$W_{50} = 2\text{mm} \quad (10)$$

$$W_{70} = 1.05\text{mm} \quad (11)$$

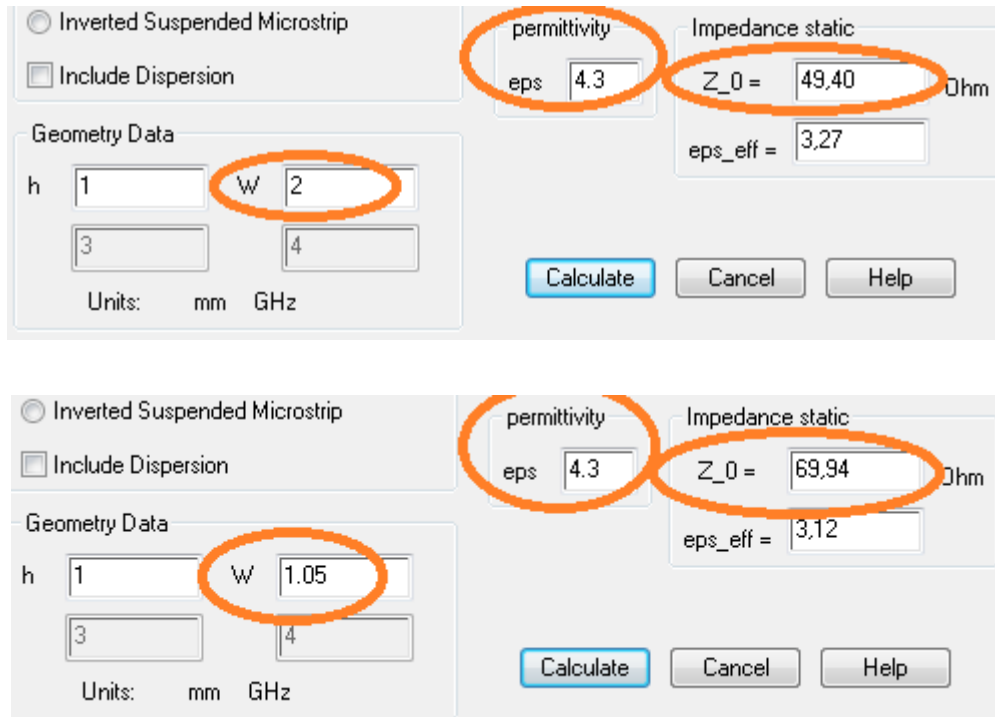


Figura 20: Cálculo da largura das linhas

Usando a mesma ferramenta calculou-se o tamanho das linhas de 90° e de 270° , apresentado na figura 21. Seguem os resultados:

$$L_{90} = 14,8\text{mm} \quad (12)$$

$$L_{270} = 44,3\text{mm} \quad (13)$$



Figura 21: Cálculo do tamanho das trilhas

Para desenhar o “rat race” foi calculado o tamanho da circunferência C , pois as distâncias entre as portas são conhecidas (ilustrado na figura 8.a).

$$C = 3 \cdot L_{90} + L_{270} = 88,7\text{mm} \quad (14)$$

Para calcular o raio R , tendo a circunferência, basta utilizar a fórmula:

$$R = \frac{C}{2\pi} = 14,12 \text{ mm} \quad (15)$$

Com o raio conhecido, foi possível desenhar a circunferência do “rat race” e como as distâncias entre as portas também foram calculadas, foi possível modelar o dispositivo da figura 15.

A seguir, os resultados da simulação. Na figura 22 é possível observar que as portas estão casadas.

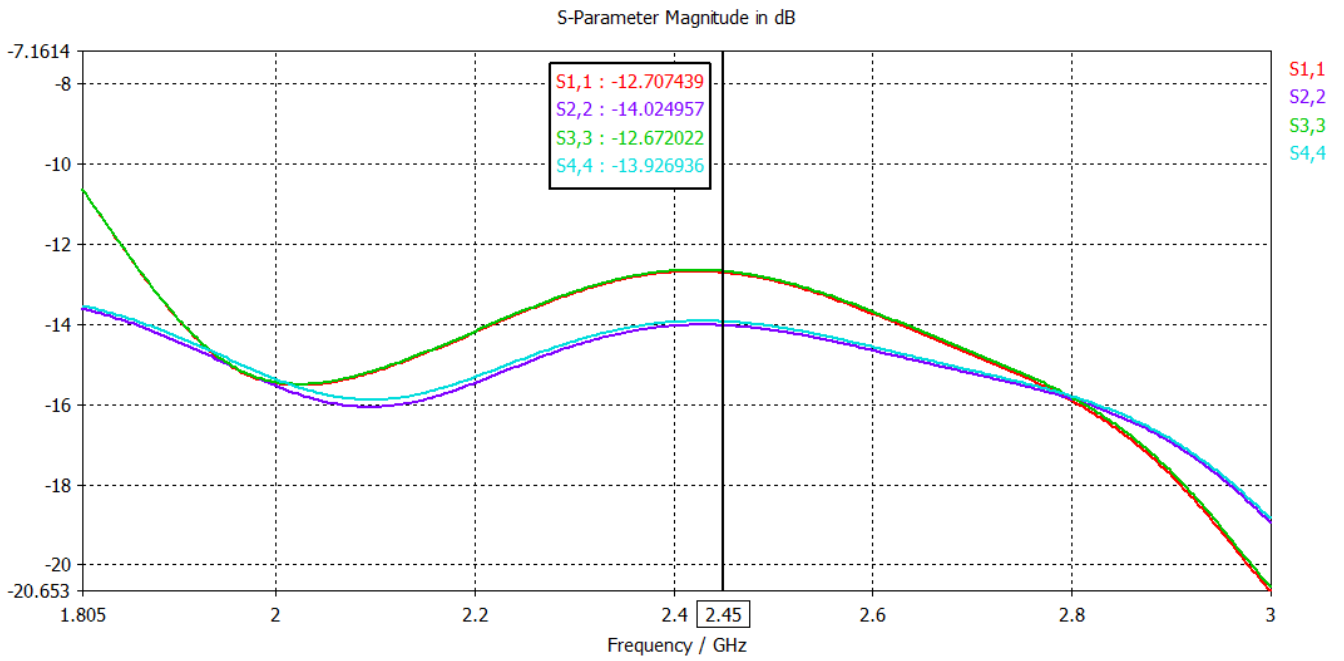


Figura 22: Parâmetros S₁₁, S₂₂, S₃₃ e S₄₄: portas casadas

Na figura 23 nota-se que os sinais das portas 2 e 3 encontrados na porta soma (porta 1) com quase meia potência e com uma pequena diferença de fase, aproximadamente 8 graus, que pode ser observada na figura 24.

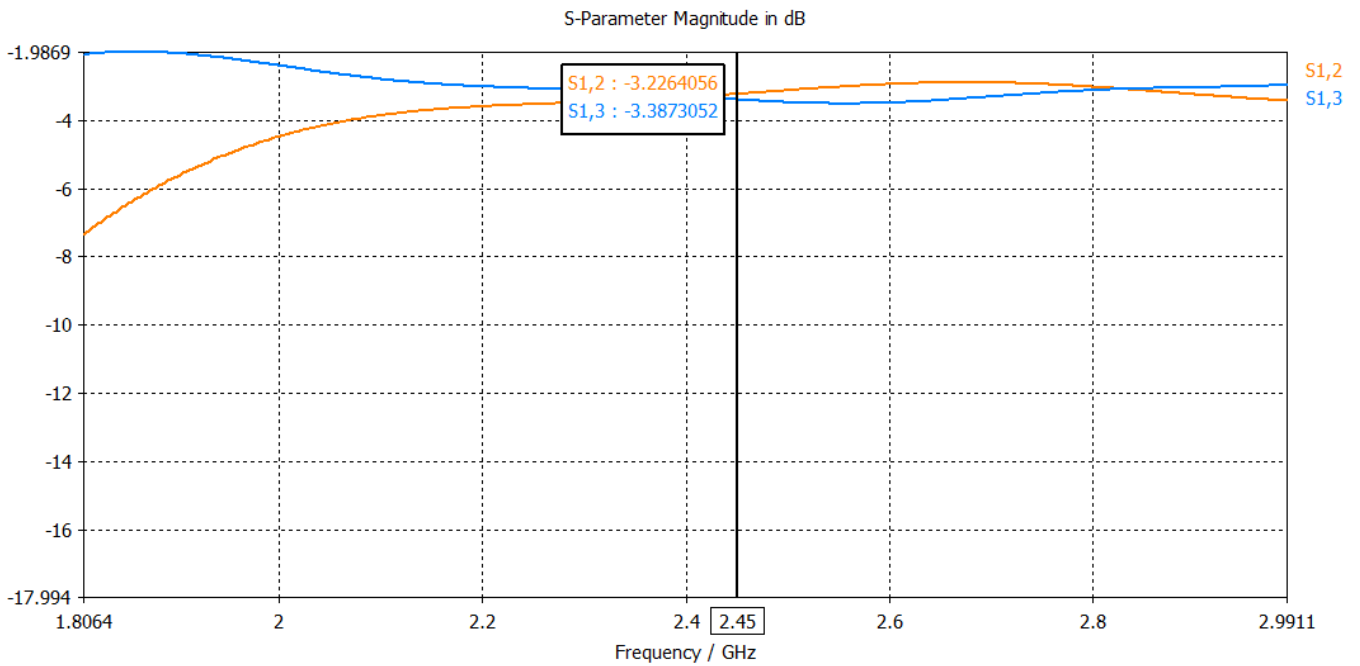


Figura 23: Magnitude de S₁₂ e S₁₃ (em dB)

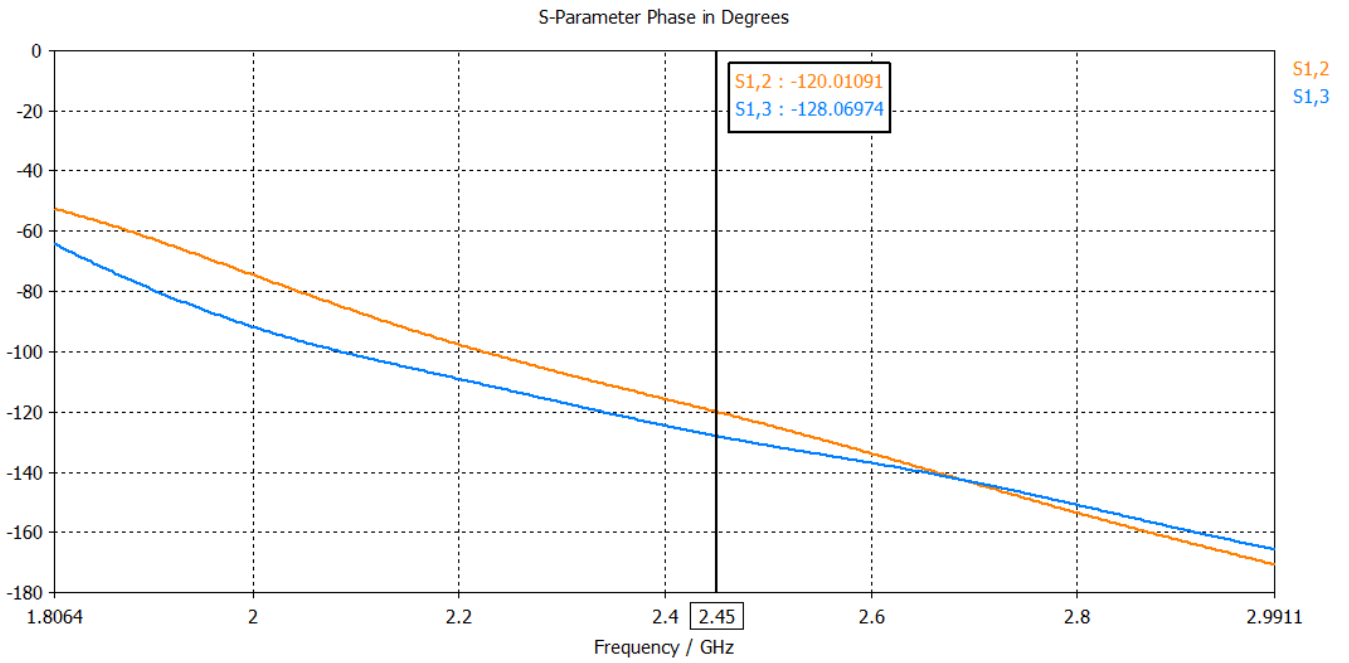


Figura 24: Fase de S12 e S13 (em graus)

Na figura 25 pode-se observar os sinais das portas 2 e 3 encontrados na porta diferença (porta 4) com quase aproximadamente meia potência e na figura 26 é apresentada uma defasagem próxima de 180° .

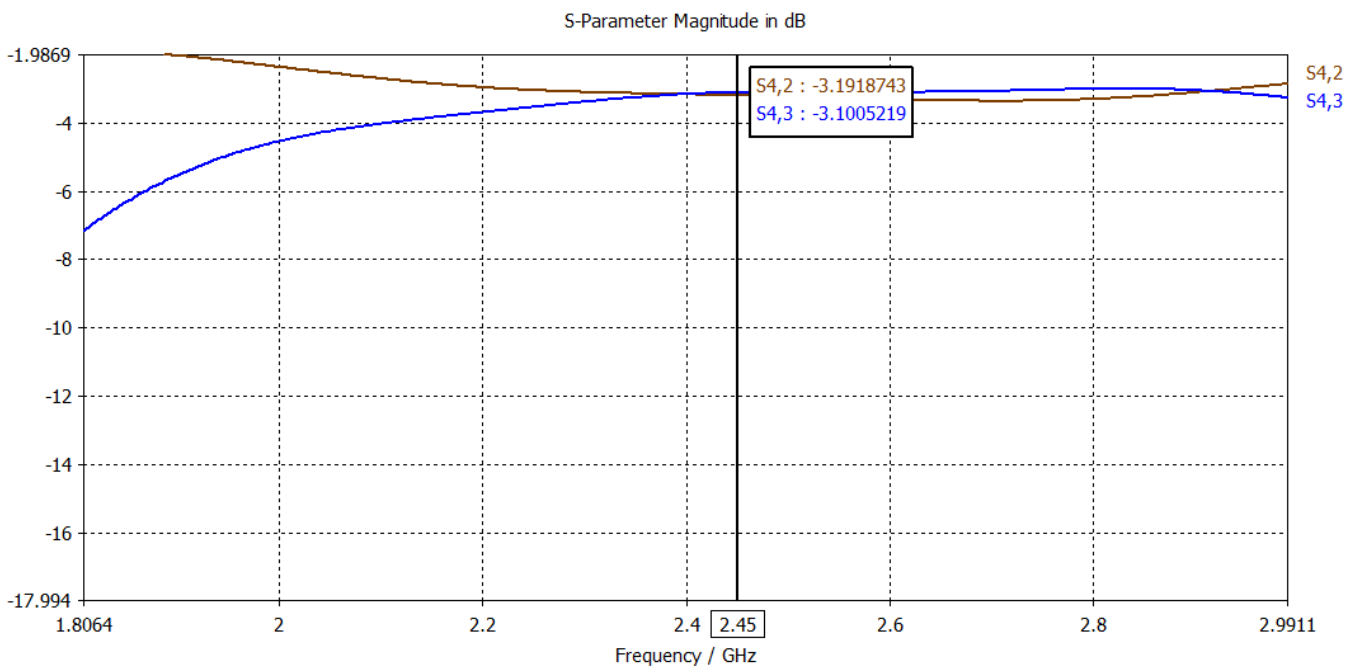


Figura 25: Magnitude de S42 e S43 (em dB)

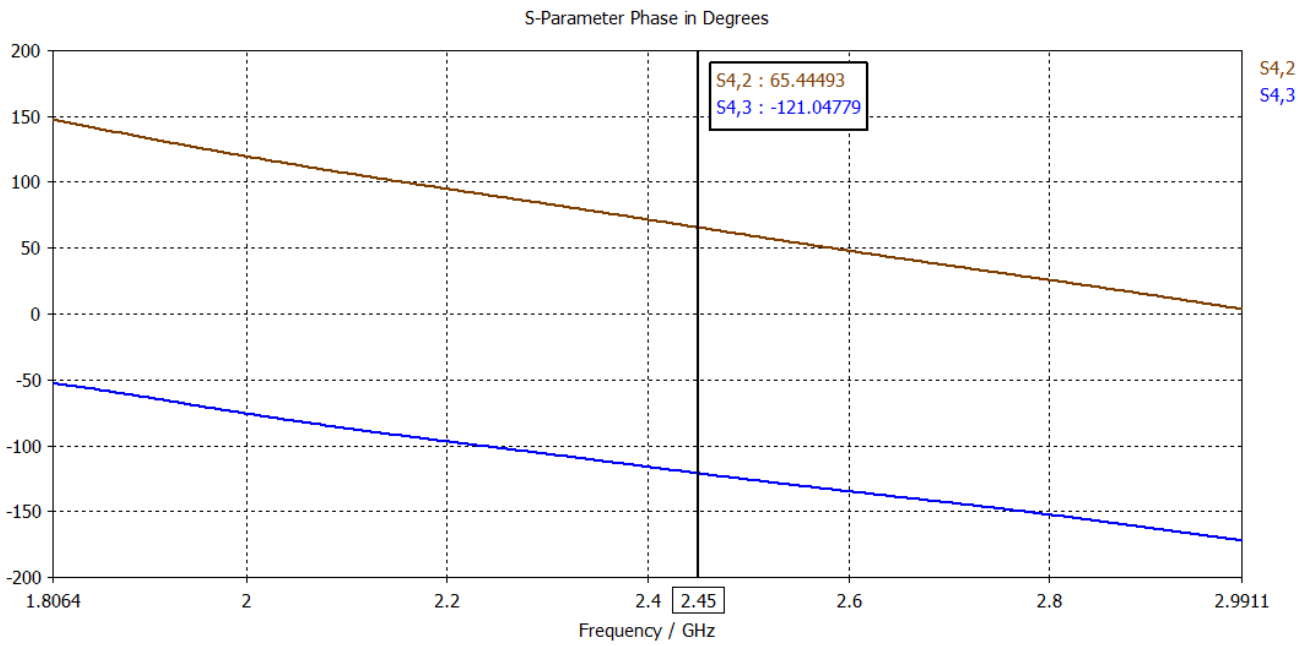


Figura 26: Fase de S42 e S43 (em graus)

Na figura 27 é possível observar os parâmetros S14 e S41, mostrando que as postas 1 e 4 estão isoladas a aproximadamente -22dB.

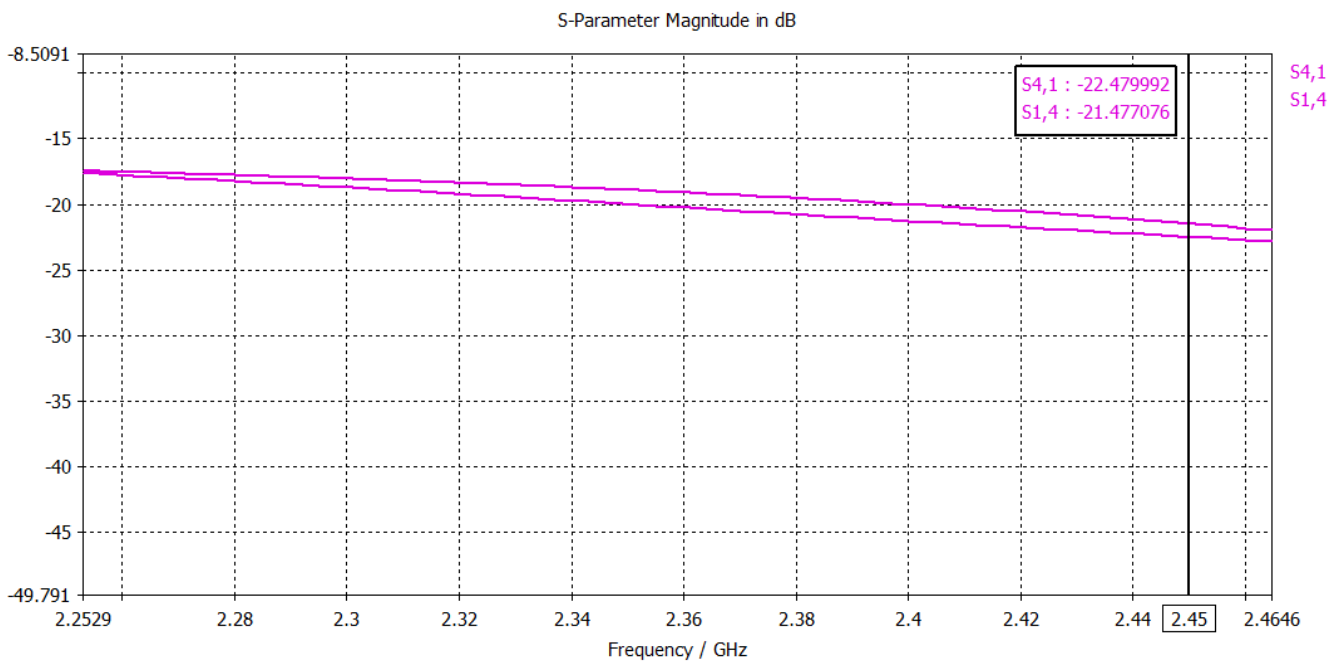


Figura 27: Parâmetros S14 e S41

3.2 Antena

O padrão IEEE 145-1983 define antena como "um meio para irradiar ou receber ondas de rádio". Em outras palavras, a antena é a estrutura de transição entre o espaço livre e um dispositivo de guia. A linha orientadora ou dispositivo de transmissão pode ter a forma de uma linha coaxial ou um tubo oco (waveguide), e é utilizada para o transporte de energia eletromagnética a partir da fonte de transmissão para a antena, ou a partir da antena para o receptor. No primeiro caso, tem-se uma antena de transmissão e na segunda antena de recepção [13].

Exemplos de antenas usadas na técnica monopulso são apresentados na figura 28.

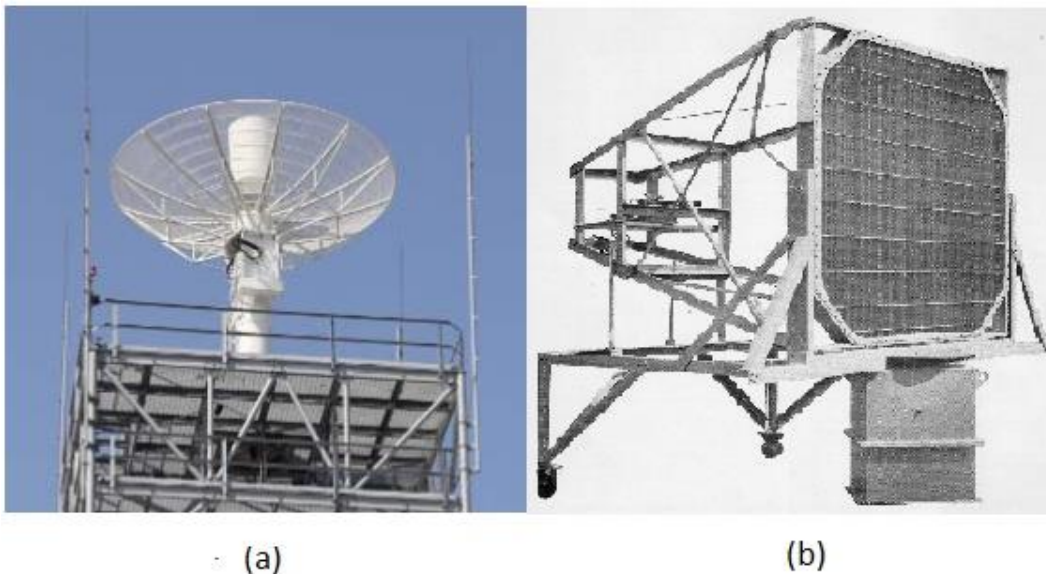


Figura 28: (a) Radar Monopulso usada na banda S [14]. (b) Antena Monopulso usada na Banda X alimentada com 4 antenas de abertura [15]

Para a técnica monopulso, a antena deve ser capaz de operar na largura de banda desejada, e seus padrões de radiação de campo distante devem ter as características de polarização desejadas (isolação entre polarizações

cruzadas). Não é de estranhar que o cumprimento de todas essas especificações não pode ser totalmente satisfeitos simultaneamente. O *design* da antena é uma parte importante da realização bem sucedida de um radar monopulso com desempenho aceitável [5].

A rede de antenas usada em um sistema monopulso deve gerar um padrão de soma com alta eficiência e um padrão de diferença com um grande valor de inclinação no cruzamento dos feixes de offset. Além disso, os lóbulos laterais de ambos os padrões devem ser baixos, isso porque se houver ecos de alvos na direção de lóbulos laterais, haverá erro na indicação angular, uma vez que o radar assume que a direção do alvo é a do lobo principal [5].

Para este projeto utilizaremos antenas impressas do tipo Yagi-Uda, pois possuem uma boa largura de feixe (entre 35-55°) e um ganho razoável [16].

A seguir serão mostradas as características das antenas usadas no presente estudo.

3.2.1 Antenas de Microfita

Antenas impressas, ou de microfita, possuem um caminho metálico sobre um substrato aterrado. O caminho metálico pode ter muitas configurações diferentes, no entanto, os mais populares são os retangulares e circulares, apresentados na figura 29. Isso ocorre pelo fato desses modelos serem fabricados mais facilmente, e possuírem características de radiação atraentes, como baixa radiação de polarização cruzada e radiação eminentemente na direção broadside, com pouca energia irradiada na direção do plano terra (*back-side radiation*) [13].

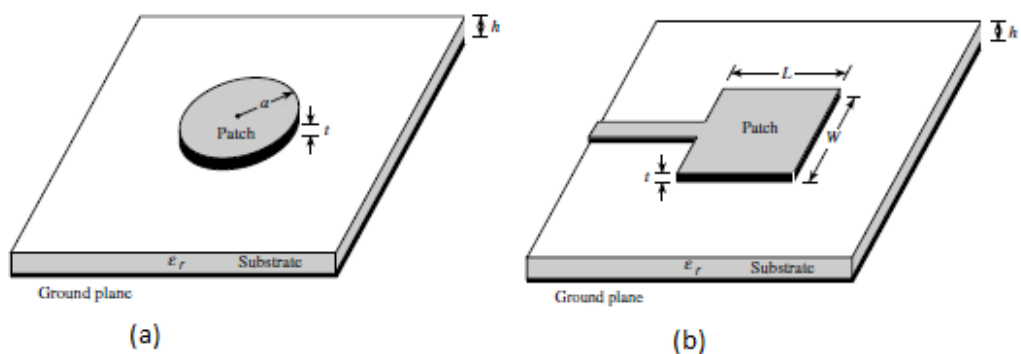


Figura 29: Antenas de Microfita em formato circular (a) e em formato quadrangular (b) [13]

As antenas de microfita são de baixo perfil, compatíveis para superfícies planas e não planares. Elas possuem fabricação simples e barata, utilizando a tecnologia de circuito impresso, são mecanicamente robustas, quando montadas em superfícies rígidas, e muito versáteis em termos de frequência de ressonância, polarização, padrões e impedância. Estas antenas podem ser montadas na superfície das aeronaves, naves espaciais, satélites, mísseis, carros, e até mesmo telefones celulares portáteis [13]. Apresentam, como ponto negativo, bandas de ressonância estreitas (ordem de 4%), assim não indicadas em operações em sistemas banda larga.

3.2.2 Antena Yagi-Uda

A Antena Yagi-Uda, ou simplesmente Yagi, opera nas faixas de frequência de HF (3-30 MHz), VHF (30-300 MHz), e UHF (300-3,000 MHz). Esta antena é composta por um certo número de dipolos lineares, como ilustrado na figura 30, sendo que um desses dipolos é energizado diretamente por uma linha de transmissão, enquanto os outros funcionam como radiadores passivos, cujas correntes são induzidas por acoplamento mútuo. Este radiador é exclusivamente concebido para funcionar como alimentação do *array*, tendo elementos na frente dele atuando como diretores (usualmente de comprimento menor que o dipolo excitado), enquanto os elementos na traseira atuam como refletores (usualmente maiores que o elemento alimentador) [13].

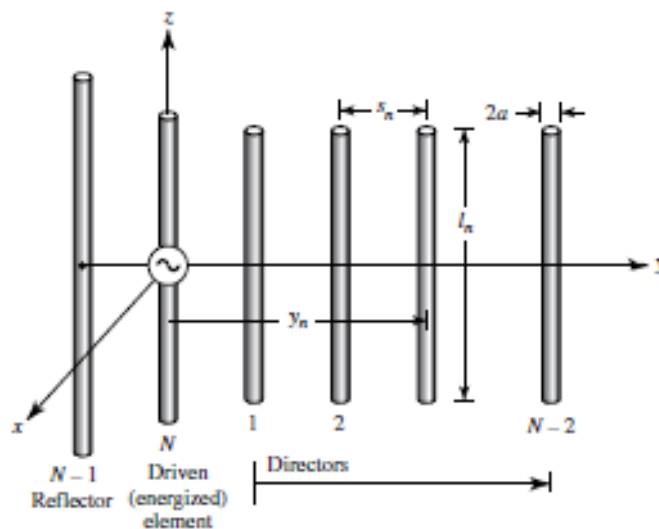


Figura 30: Configuração da antena Yagi-Uda [13]

Na próxima sessão serão mostrados os equipamentos necessários e como será feita a montagem do sistema de radar monopulso para este projeto.

3.2.3 Antena Yagi utilizada

As três antenas utilizadas para a montagem do sistema de radar monopulso são do tipo Yagi-Uda impressas, e fazem parte do kit WATTS-2002, da empresa Manttel [17]. Na figura 31 pode-se observar a antena utilizada.

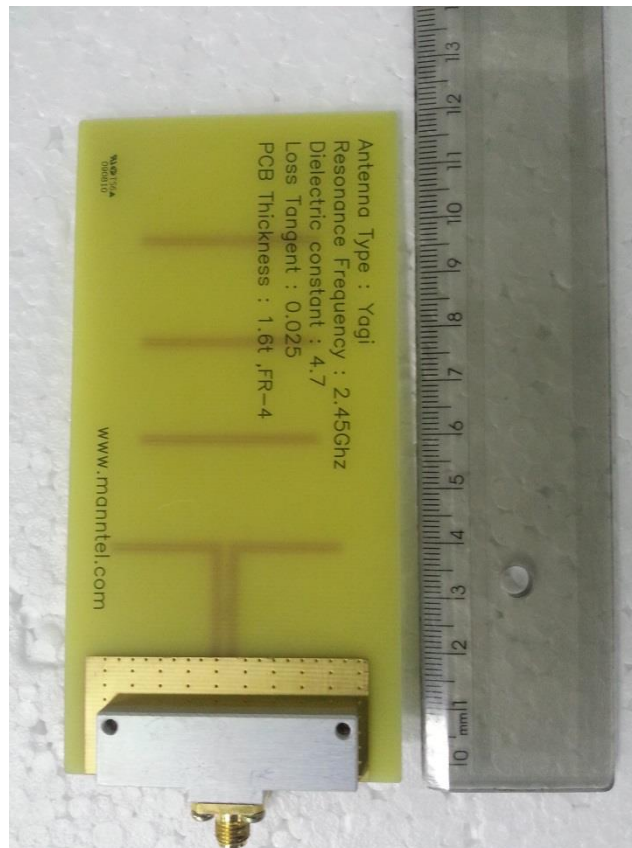


Figura 31: Medidas de uma das antenas utilizadas

As espessuras de todas as linhas são idênticas e medem 0.2 cm, todos os três diretores possuem um comprimento de 3.3 cm e estão espaçados entre si a uma distância de 1.7 cm. O primeiro diretor está a uma distância de 1.9 cm do elemento ativo. O tamanho de cada linha horizontal do dipolo é de 2 cm e elas estão espaçadas entre si a uma distância 0.1 cm. O tamanho de cada

linha vertical do dipolo é de 1.7 cm. Como é possível visualizar na imagem 31, o tamanho da antena é de 12 cm.

É possível observar na imagem 32 a presença de um capacitor, este é usado no sistema de balun, que é responsável por balancear a antena. Devido a este capacitor não foi possível simular esta antena no CST, visto que o valor desse capacitor não é mencionado na documentação do kit de antenas da Universidade que foi utilizado.

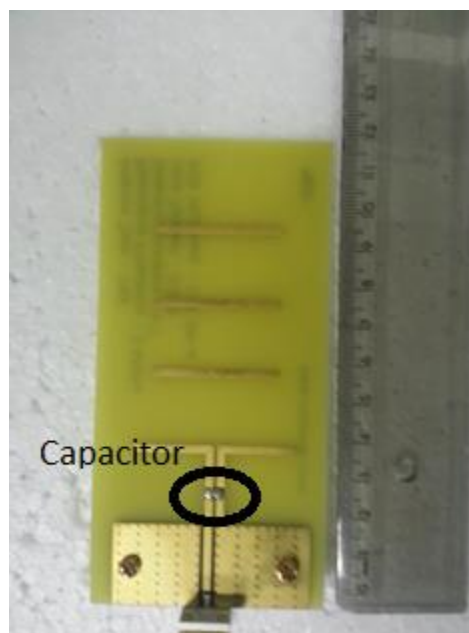


Figura 32: Visão traseira da antena

Antes do início da montagem do sistema de radar monopulso, foram medidos os parâmetros básicos de uma antena, o ganho e o fator S11.

3.2.3.1 Medida do parâmetro S11

O valor S11 foi medido no laboratório de antenas do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) de São José dos Campos. Na figura 33 é possível visualizar o parâmetro S11 (em dB), variando de 1,5 GHz até 5 GHz. Na frequência de operação (2,45GHz), o valor de S11 é de -18,73 dB. Na figura 34 é possível visualizar o parâmetro S11 no formato da carta de Smith, no mesmo intervalo de variação.

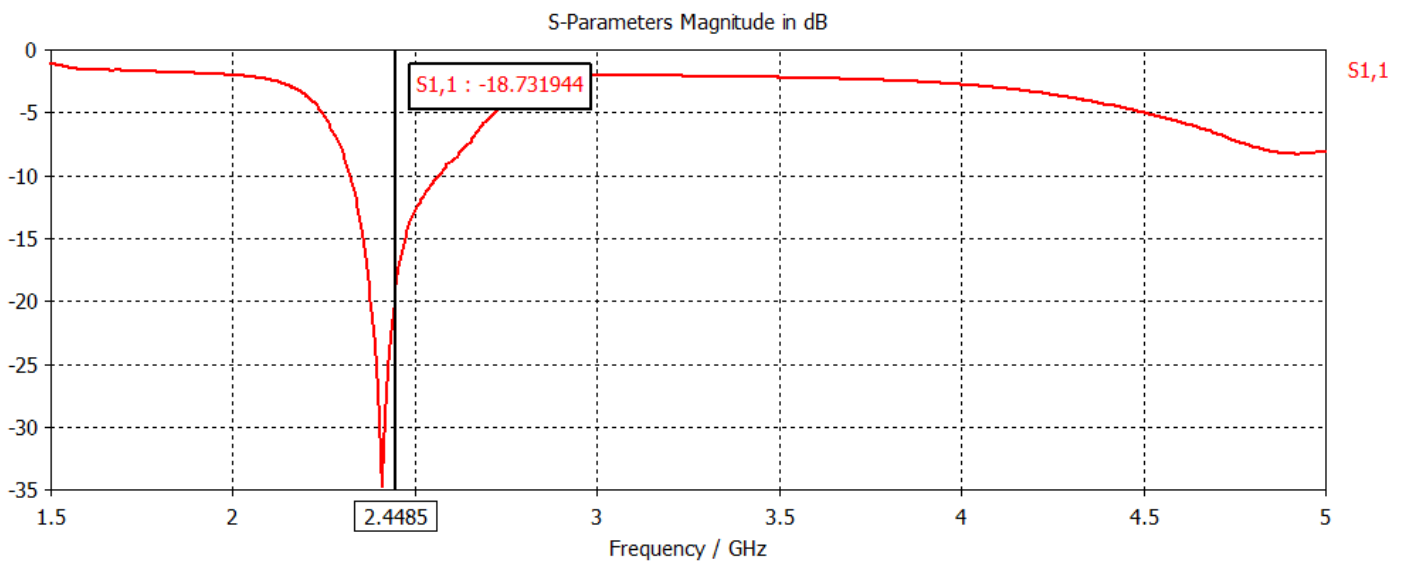
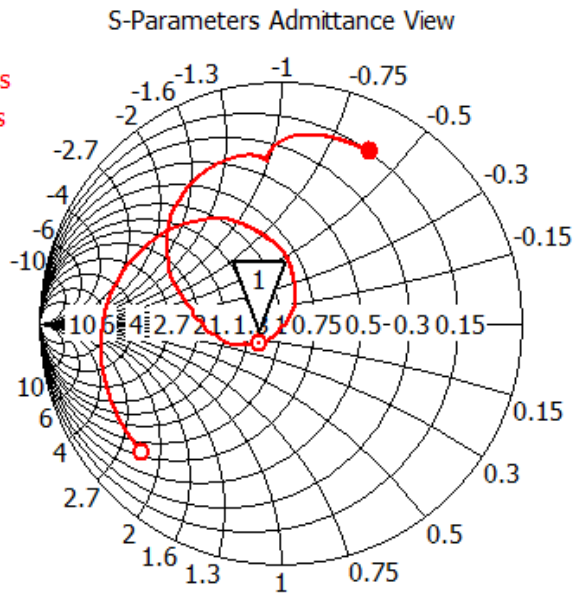


Figura 33: Parâmetro S11, em dB

○ 2 (0.0167, 0.0461) Siemens
 ● 3 (0.0031, -0.012) Siemens
 Frequency / GHz

S1,1



○ 2.450533 (0.023543, 0.004084) Siemens

Figura 34: Parâmetro S11.

3.2.3.2 Cálculo do ganho

Para o cálculo do ganho das antenas utilizadas foi feita uma aproximação usando a Fórmula de Friis. Primeiramente foi necessário calcular a perda do cabo e dos conectores usados, para isso, foi realizada a montagem conforme figura 35.

O gerador de sinal foi conectado com o analisador de espectro, através de um cabo e dois conectores do tipo N-BNC e foi configurado para transmitir a 2,45 GHz e 0dBm. Nesta configuração o analisador apresentou a leitura de -4,7 dBm.

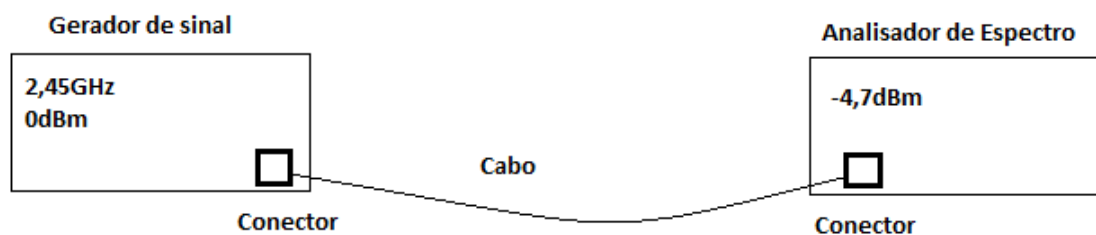


Figura 35: Ligação direta do gerador de sinais com o analisador de espectro

Conhecido o valor a ser desconsiderado do cabo e dos conectores, foi montado um novo experimento, apresentado na figura 36. A antena transmissora foi conectada no gerador à mesma distância da receptora, que foi conectada no analisador de espectro. Transmitindo com a mesma configuração (2,45GHz e 0dBm), foi obtida a leitura de -43,7dBm.

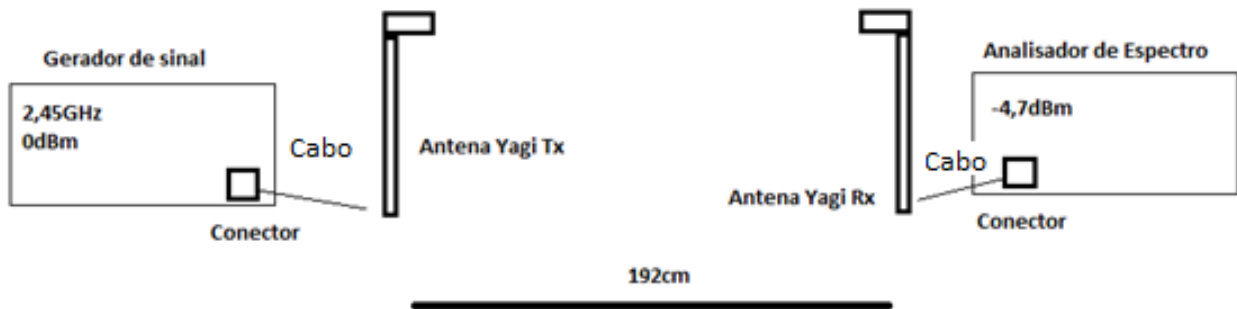


Figura 36: Experimento para calcular o ganho das antenas impressas Yagi.

Utilizando a fórmula de Friis para cálculo do decaimento de potência no espaço livre tem-se:

$$GanhoRx = GanhoTx = \sqrt{\left(\frac{4\pi D}{\lambda}\right)^2 \times \frac{Pr}{Pt}} \quad (16)$$

Onde D é a distância entre a antena transmissora e a receptora, λ é o comprimento de onda, Pt é a potência transmitida e Pr é a recebida.

Considerando as perdas dos cabos e conectores, pode-se reescrever a potência transmitida como:

$$Pt = 0 - 4,7 = 4,7 \quad (17)$$

Substituindo os valores citados, o valor de ganho igual a:

$$GanhoRx = GanhoTx = \sqrt{\left(\frac{4\pi \cdot 1,92}{0,12}\right)^2 \frac{4,27E - 5}{0,339}} = 2,21 \quad (18)$$

$$GanhoRxdB = GanhoTx dB = 10 \times \log_{10}(2,21) = 3,45 \quad (19)$$

4. Parte experimental

O projeto original segue o exposto em [4], contudo, devido à limitação de não possuir um circulador disponível, foi proposto um modelo alternativo em que ele não precisa ser utilizado. Para isso, é necessária a troca do alvo por uma antena transmissora de modo que as duas antenas receptoras não precisam transmitir o sinal, elas funcionarão somente no modo de recepção, já que a transmissão será feita pelo alvo (antena transmissora).

Para montar o sistema de radar monopulso alternativo foram utilizados:

- Três antenas impressas do tipo Yagi
- Uma junção híbrida de 180° (“*rat race*” impresso)
- Dois analisadores de espectro (Rohde & Schwarz FS315)
- Um gerador de sinais (Agilent N9310A)

Na figura 37 é apresentado o esquema de montagem do modelo alternativo de radar monopulso.

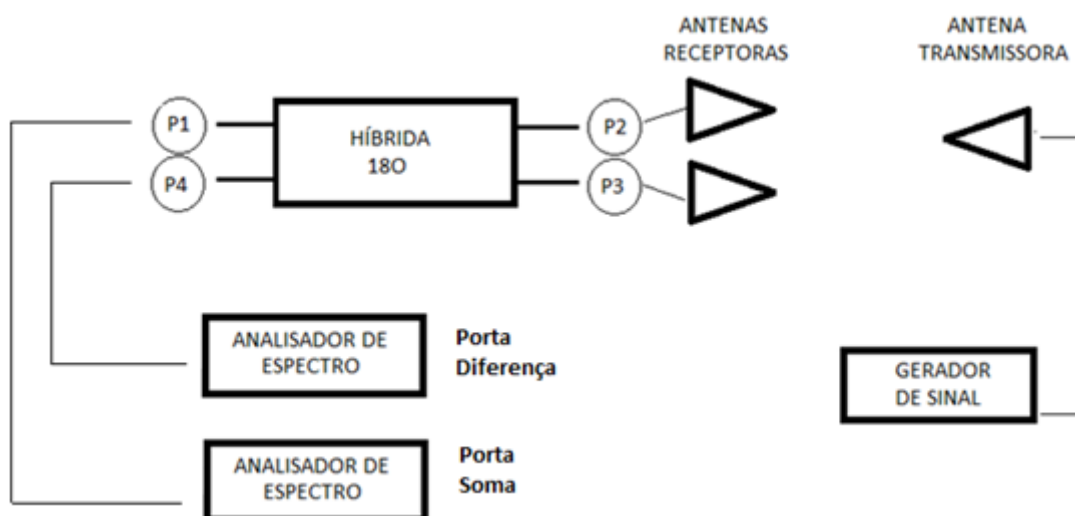


Figura 37: Montagem alternativa do sistema de radar monopulso

Mesmo sendo feitas estas alterações, o funcionamento é praticamente o mesmo que no proposto [4], a diferença é que no primeiro caso, o sinal que é detectado é um eco do sinal transmitido e no segundo caso é um sinal enviado pela antena transmissora, representando o alvo.

O funcionamento é o mesmo, dependendo da posição angular da antena transmissora (ou alvo) em relação às antenas receptoras, o sinal transmitido terá maior amplitude em um dos canais, como mostrado na figura 37.

Se a antena transmissora estiver mais próxima do eixo de simetria entre as antenas, o sinal no canal soma será maior (figura 38.a), e se estiver posicionada mais afastada desse eixo, a resposta no canal diferença será maior (figura 38.b).

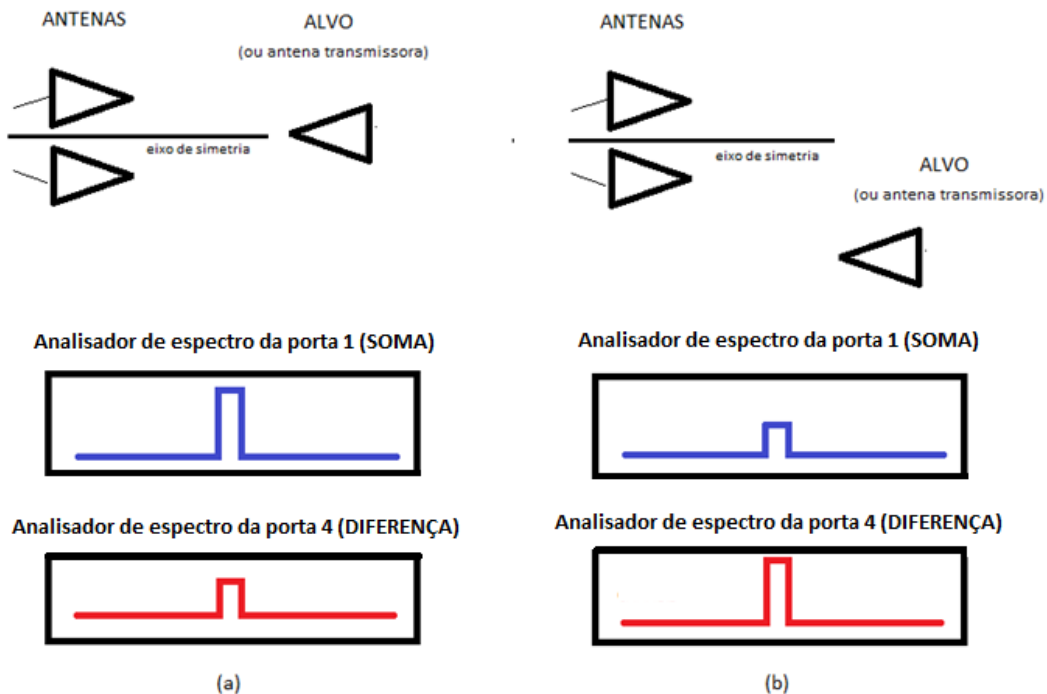


Figura 38: Possíveis medições nos analisadores de espectro

Após a obter desses valores, foi realizada a primeira montagem no sistema de radar monopulso. A antena transmissora foi ligada ao gerador de sinais, configurado para transmitir a 2,45 GHz e 0 dBm (ver figura 40) , a uma distância de 3 metros das antenas receptoras, como mostrado na figura 39.

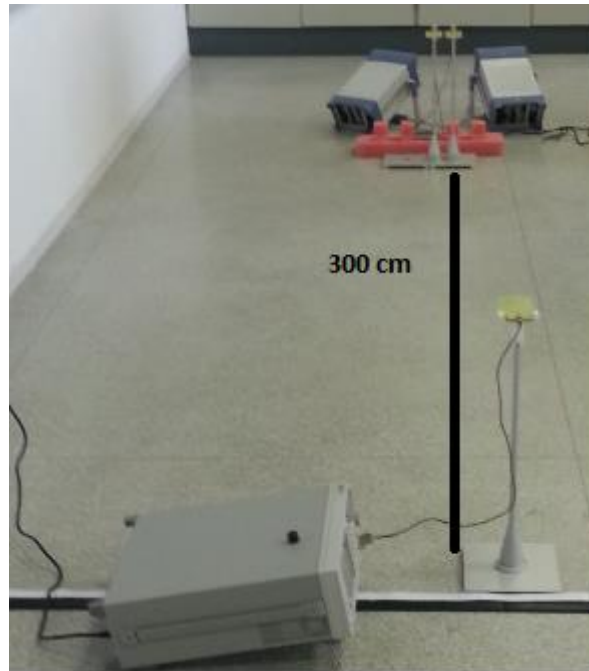


Figura 39: À frente, antena Tx ligada ao gerador de sinal. Ao fundo, antenas Rx ligadas aos analisadores de espectro



Figura 40: Configuração do gerador de sinais (2,45 GHz e 0dBm).

Para a montagem das antenas receptoras, as antenas foram posicionadas a uma distância de 7,2 cm entre elas, o que equivale a $0,57\lambda$. O ideal seria uma distância exata de $0,5\lambda$, ou seja, 6,12 cm. Porém, por uma limitação de tamanho das duas bases das antenas (figura 41.b), utilizou-se a menor distância possível, que foi a de 7,2 cm. A disposição descrita acima pode ser observada na figura 41.a.

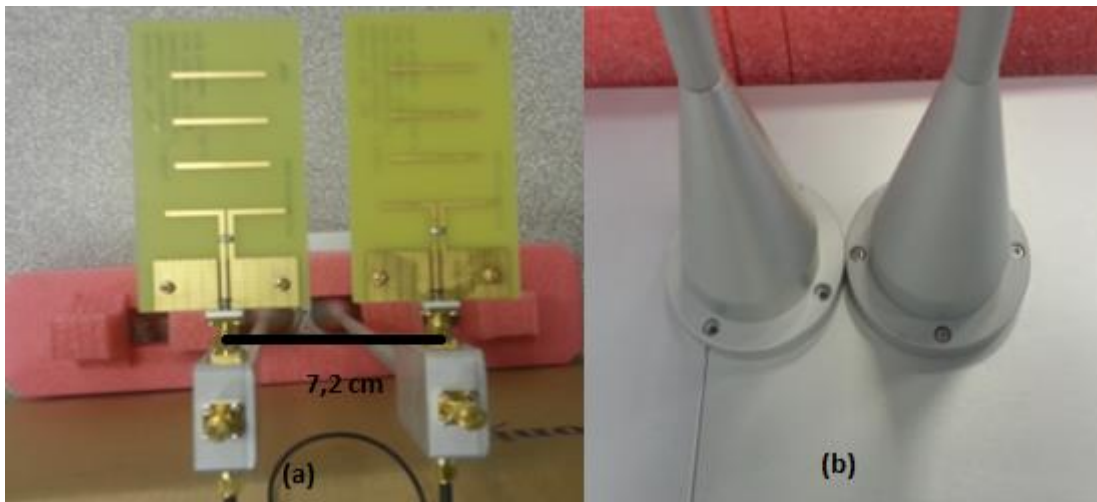


Figura 41: (a) Distância entre as antenas Rx. (b) Limitação física: o tamanho das bases

Como os diagramas de radiação dos padrões soma e diferença mostrados na seção anterior foram calculados com a distância ideal de 0.5λ , foi necessário calcular o fator de *array* (AF – *array factor*) para a distância utilizada no experimento. Para calcular o AF, foi utilizada a fórmula apresentada na Eq. 20 [13]:

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)[\beta d \cos \theta + \varphi]} \quad (20)$$

Onde N é o número de elementos, d é a distância uniforme entre eles, φ é a diferença de fase entre eles e Θ é o ângulo formado entre o ponto em que se deseja calcular a potência e o elemento.

Os resultados obtidos foram usados para plotar o gráfico do AF para uma distância de $0,57 \lambda$, o resultado é apresentado na figura 42.

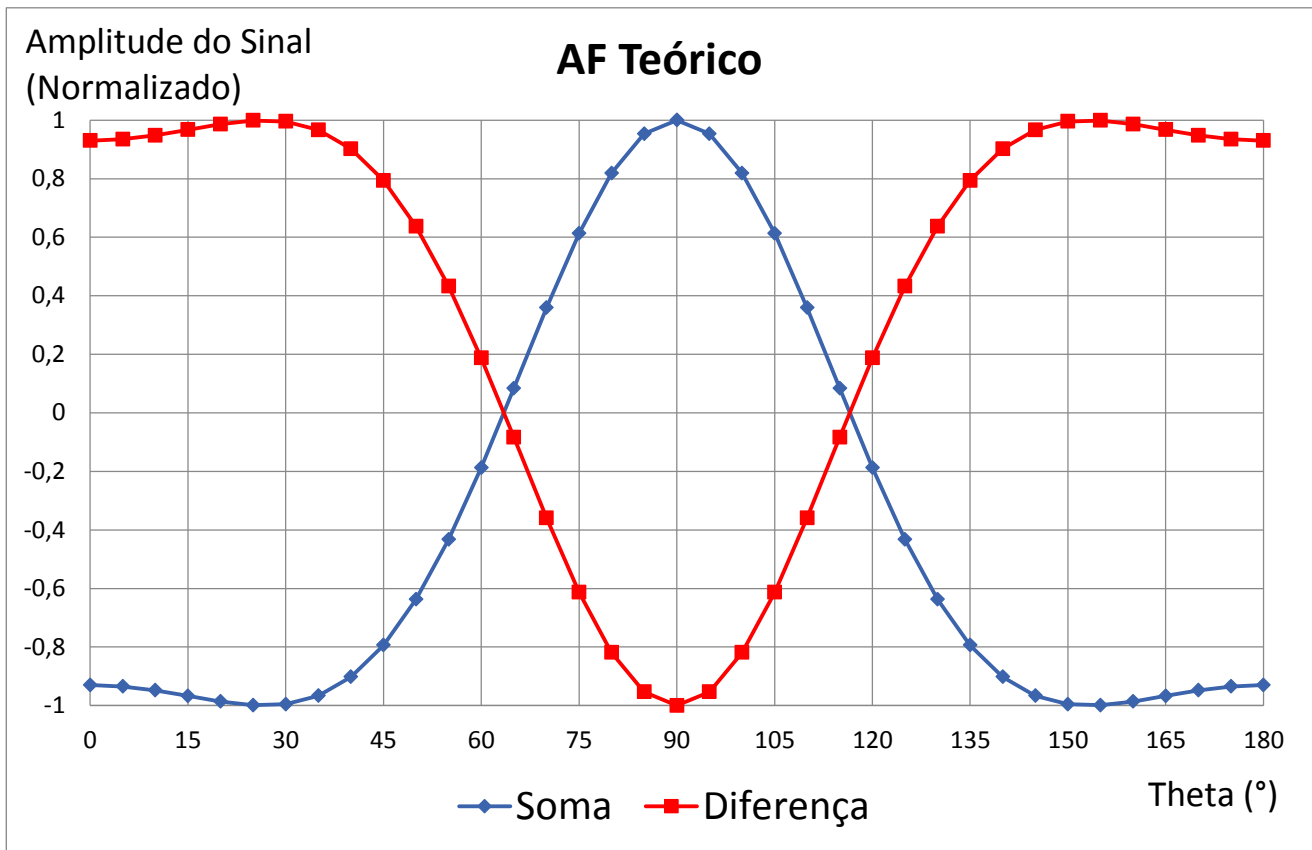


Figura 42: Fator de array para distância de $0,57 \lambda$

Como o resultado obtido é próximo do AF para uma distância de $0,5 \lambda$, foi possível realizar o experimento, mesmo com a obrigatoriedade do uso da distância de $0,57 \lambda$.

As duas antenas foram conectadas nas portas 2 e 3 do "rat race". As saídas (portas 1 e 4) da junção híbrida foram conectadas com os analisadores

de espectro, a porta 4 corresponde à leitura do padrão diferença enquanto a porta 1 o padrão soma, conforme as figuras 43 e 44.

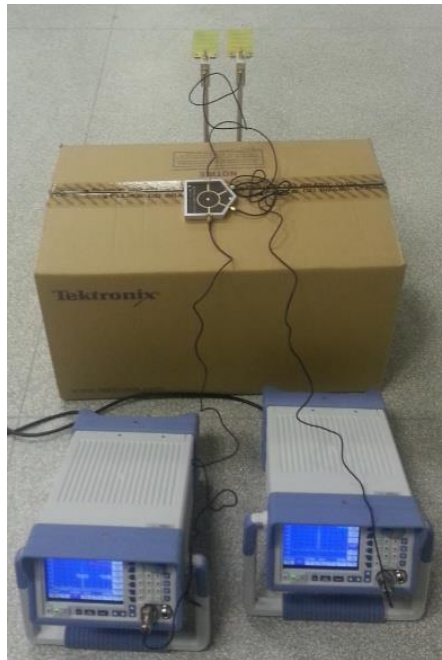


Figura 43: Dois analisadores de espectro e as duas antenas ligadas no "rat race"



Figura 44: Legenda das portas da híbrida 180° e o que estão conectadas nelas

Para observar a propriedade dos padrões soma e diferença, foram realizadas diversas medidas para diferentes posições da antena transmissora, utilizando uma régua para movimentar a antena transmissora com precisão.

Sabendo o deslocamento horizontal da antena, e a distância dela em relação às antenas receptoras, calculou-se o deslocamento angular da antena transmissora nas diversas medidas realizadas utilizando a relação trigonométrica apresentada na figura 45.

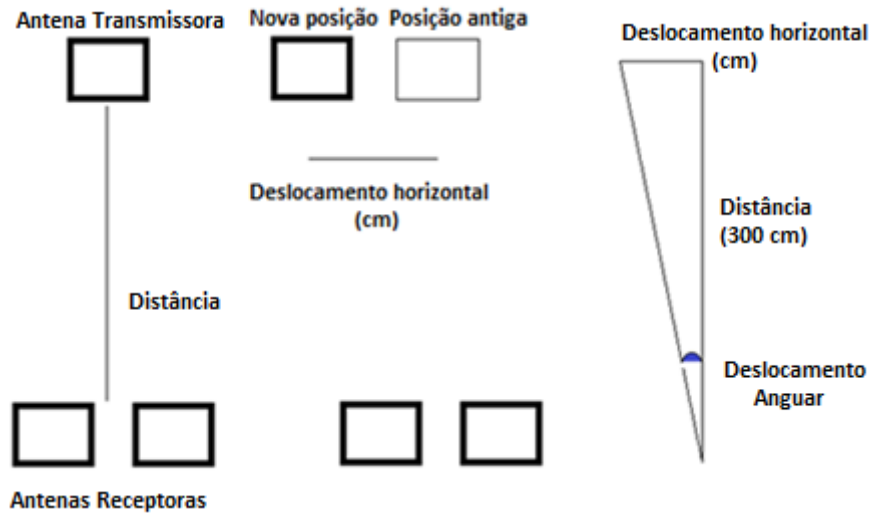


Figura 45: Cálculo do deslocamento angular

Do triângulo acima, tem-se que o deslocamento angular é dado por:

$$Deslocamento\ Angular = \tan^{-1}\left(\frac{Distância}{Deslocamento\ horizontal}\right) \quad (21)$$

Como essa primeira montagem foi realizada no laboratório didático da universidade, existiram restrições devido à distribuição da mobília e do tamanho da sala. A antena transmissora foi posicionada aproximadamente no centro do espaço reservado para sua movimentação horizontal, possuindo 122 cm de distância da parede (à esquerda) e 135 cm de distância da mobília (à direita) conforme apresentado na figura 46.

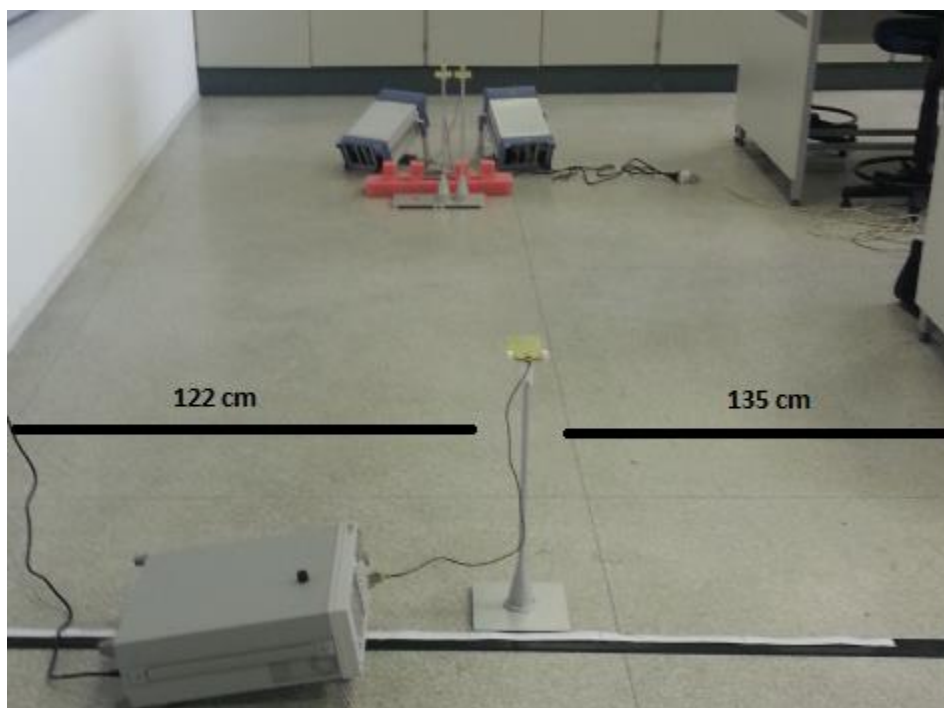


Figura 46: Disposição dos equipamentos no laboratório

Após a montagem do sistema de radar monopulso, foi iniciada a medição dos dois analisadores de espectro, conforme se deslocava a antena transmissora, novas medidas eram realizadas. Os resultados obtidos encontram-se no anexo A.

O gráfico gerado a partir das medidas realizadas pode ser observado na figura 47.

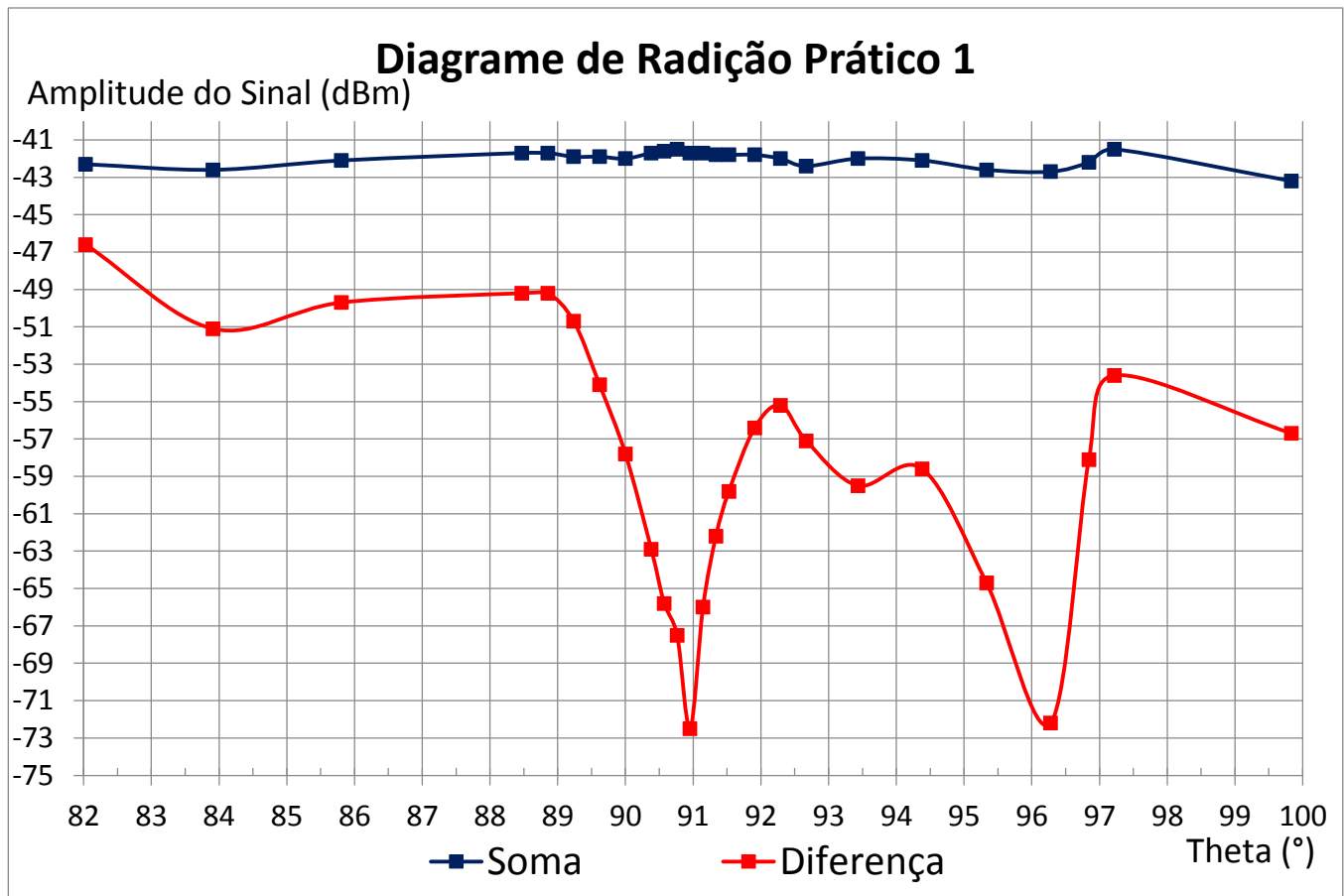


Figura 47: Gráfico das medidas dos dois padrões

Conforme apresentado na figura 34, o esperado da leitura na porta soma é que, conforme se aumenta o deslocamento angular em relação ao eixo de simetria, menor deve ser o valor lido. Na porta diferença espera-se o contrário, no eixo de simetria possui um nulo, e conforme se aumenta o deslocamento angular em relação a esse eixo, maior deve ser a leitura na porta.

Observa-se nos valores medidos que a porta soma pouco oscila conforme se varia o deslocamento angular, e na porta diferença observa-se que o valor da leitura aumenta junto com o deslocamento angular. Porém, a leitura na porta diferença apresenta um decaimento (penúltimo ponto) bem elevado, podendo até mesmo ser considerado como um segundo nulo.

Essa medida pode ter ocorrido devido às reflexões causadas pelo ambiente, visto que o espaço disponível para a montagem do sistema de radar no laboratório é pequeno e possui muitos objetos metálicos. Devido a esses problemas mencionados, foi decidido realizar o experimento em outro local mais amplo e sem a presença de objetos metálicos próximos.

Utilizou-se outro local da Universidade para a segunda montagem, o local escolhido foi o oitavo andar da torre A da UFABC. A distância entre as antenas receptoras e entre elas e a de transmissão foram mantidas. Na figura 48 pode-se observar a segunda montagem do sistema.

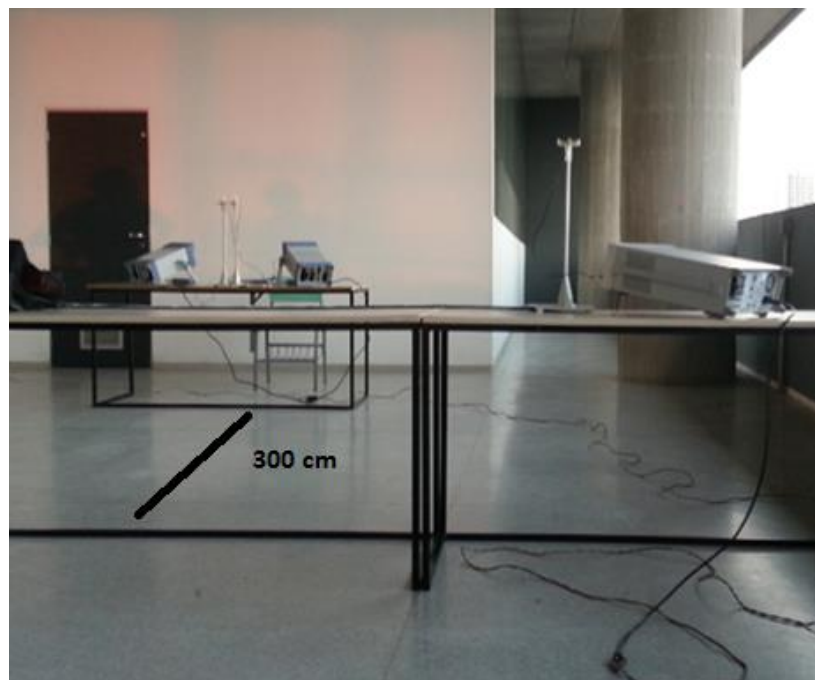


Figura 48: Segunda montagem do sistema de radar monopulso

Antes do início das medições, foi observada uma interferência nos analisadores de espectro, conforme é apresentado na figura 49. Embora os sinais interferentes não estivessem exatamente na frequência de operação do

sistema de radar (2,45 GHz), foi decidido esperar a ausência dessa interferência para a realização do experimento.

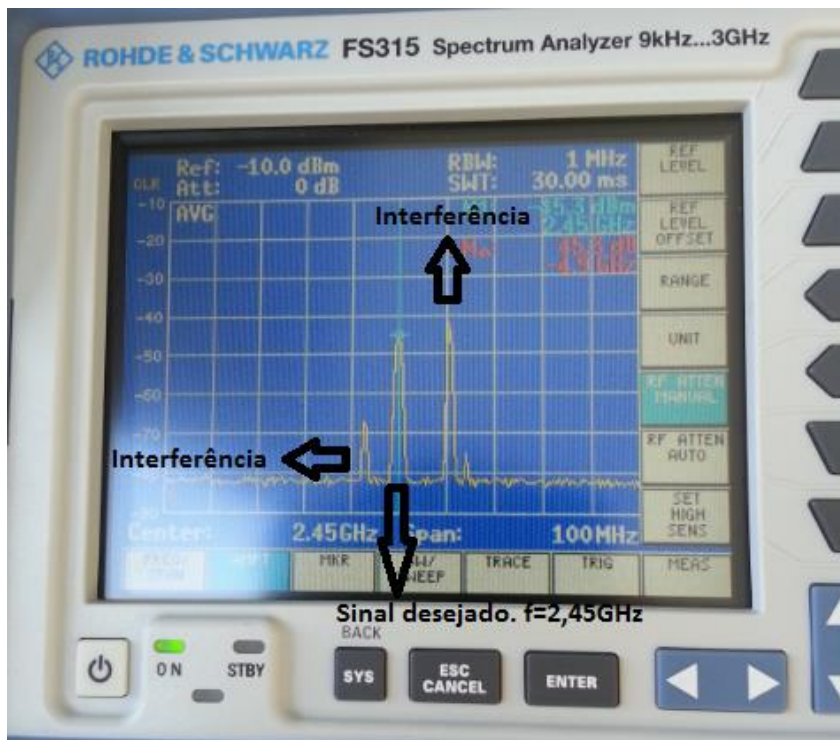


Figura 49: Interferência do Wi-Fi no experimento

O experimento foi refeito, dessa vez os valores de potência foram medidos de 5 em 5 cm, dois metros à direita e dois metros à esquerda da primeira medida, realizada no índice de 100 cm da régua . Os valores coletados são apresentados no anexo B.

Como o local da segunda montagem é maior que o da primeira, foi possível coletar mais pontos e, consecutivamente, observar melhor o comportamento do sistema de radar. O gráfico resultante das medidas coletadas pode ser observado na Fig. 50.

Neste experimento foi possível notar o que era esperado do padrão soma, conforme aumenta o deslocamento angular, ocorre um decaimento da

potência. Não foi possível observar este decaimento na primeira montagem devido às limitações de espaço, que proporcionou um deslocamento angular pequeno (menos que 8°).

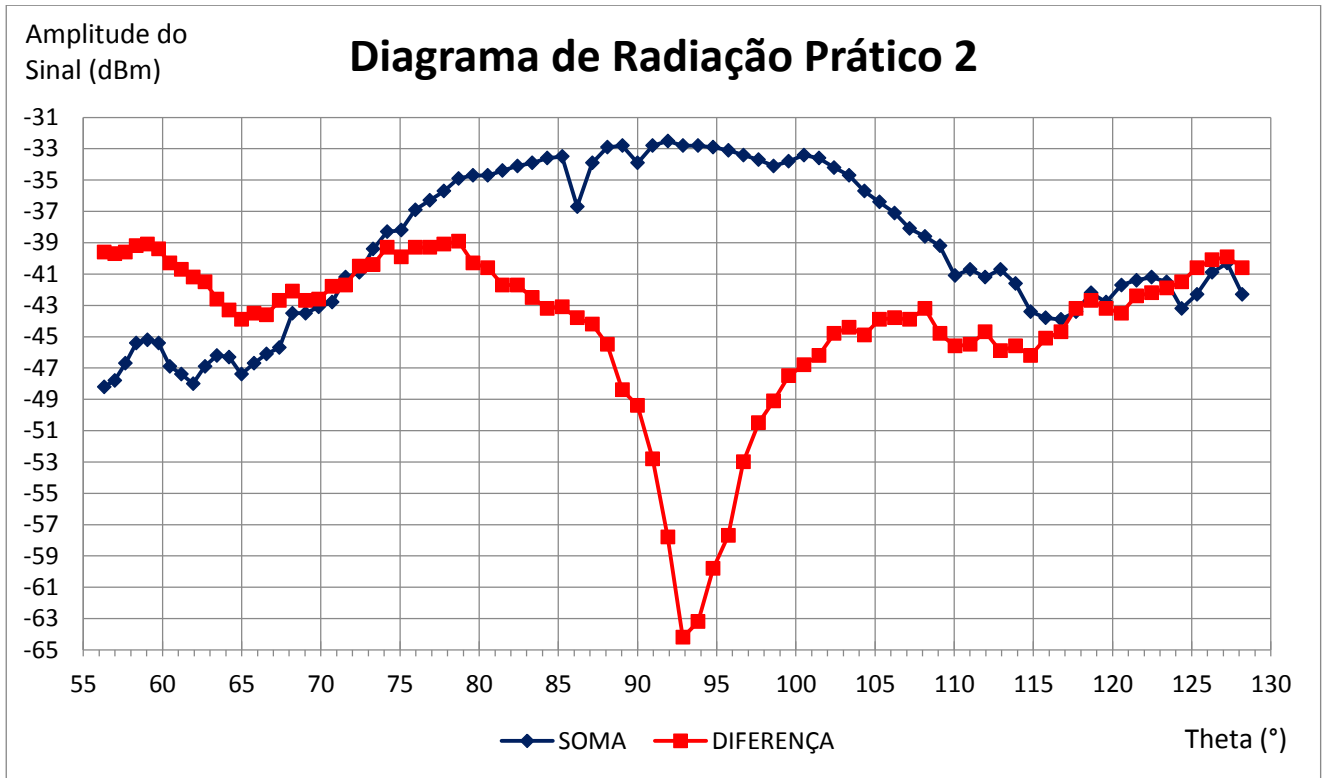


Figura 50: Gráfico dos valores de potência medidos

No padrão diferença também é possível observar o comportamento esperado, há um aumento gradual da potência à medida que se se afasta do centro (nulo).

Diferente do que ocorreu na primeira montagem, não foi detectado um valor muito baixo (outro nulo), nenhum valor medido ficou muito fora do que era esperado. Tal fato reforça a premissa anterior de que o segundo nulo encontrado na figura 48 era devido a alguma reflexão sofrida no ambiente, o que não ocorreu na segunda montagem.

Na figura 51 é possível visualizar a comparação do *array factor* teórico com os resultados práticos medidos, lembrando que nos resultados medidos temos o array factor mais o fator de radiação da antena.

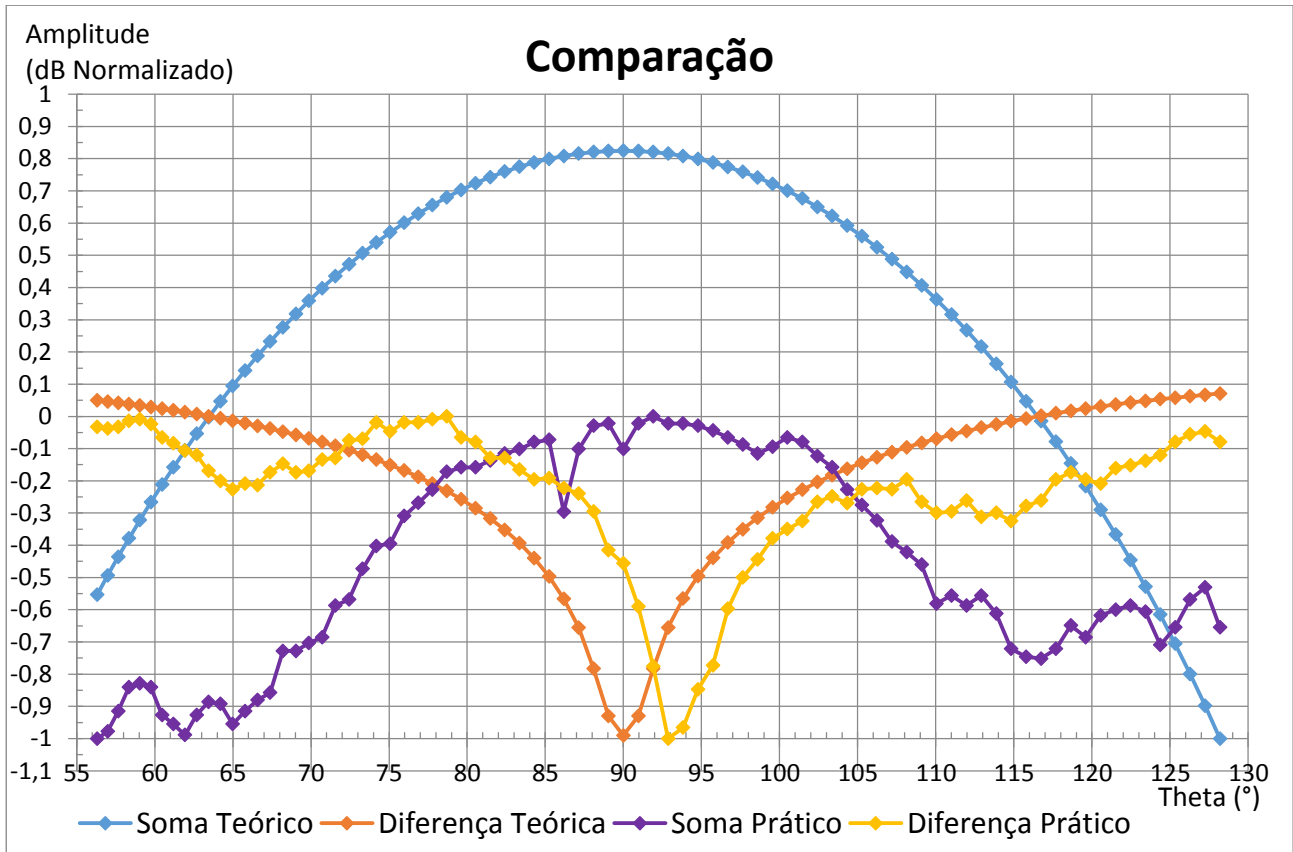


Figura 51: Comparação das curvas teóricas e práticas

5. Conclusões

Depois de concluída a fase inicial de revisão bibliográfica e o estudo sobre a teoria envolvida no conceito do sistema de radar monopulso, foi possível a montagem do sistema e a realização de medidas, podendo se comparar os resultados obtidos com os resultados teóricos.

Na primeira montagem, foi possível visualizar algumas das propriedades esperadas, como o fato da medida do padrão soma ser maior que a do padrão diferença, quando próximo do centro das antenas; e também o comportamento do padrão diferença, que conforme se afasta do centro, aumento o valor da potência medida.

Porém, devido as dimensões insuficientes da área disponível para a montagem do primeiro experimento, não foi possível observar o comportamento do padrão soma, que precisa de um deslocamento angular maior para ser possível visualizar o efeito da distancia sobre a potência.

Além disso, devido à mobília do laboratório, observaram-se efeitos típicos de reflexão, como valores fora da curva e até mesmo o surgimento de um nulo. Com todos esses fatores, foi decidido que um experimento em um local aberto seria necessário para melhor visualizar as propriedades do sistema.

Na montagem do segundo experimento, foi possível observar a interferência de outro fator, que foi a conexão de *Wi-fi* disponível para os alunos no último andar da universidade.

Depois de contornado esse fator, foi possível refazer a experiência e, sem a presença de fatores externos ao experimento, foi possível observar todas as propriedades esperadas do sistema de radar.

Com as medidas que foram realizadas, foi visto na prática o comportamento de ambos os padrões do sistema de radar monopulso. Visto todas essas considerações, o projeto atingiu seu objetivo, que era montar e estudar esse tipo de radar.

6. Referências Bibliográficas

- [1] LOTHES, R. N., SZYMANSKI, M. B., WILEY, R. G. Radar Vulnerability to Jamming. London: Artech House Publisher, 1990.
- [2] SEDRA, A. S., SMITH, K. C. Microeletrônica. (4º Ed.) São Paulo, Makron Books, 2000.
- [3] Henri Shinichi de Souza Okajima - Desenvolvimento de um Demodulador Digital e de um Ambiente de Simulação para Sistema de Telemédidas
- [4] Bonefacic, D., Jancula, J. e Majurec, N. - Model of a Monopulse Radar Tracking System for Student Laboratory
- [5] Skolnik – Introduction to Radar Systems
- [6] <http://aviacaogeral.com>. Acessado em 23/03 às 14:30 horas.
- [7] Pozar, D. M. – Microwave Engineering 3rd Ed.
- [8] Massambani, O. - Departamento de Ciências Atmosféricas IAG-USP Universidade de São Paulo
- [9] <http://www.microwaves101.com>. Acessado em 23/03 às 14:00 horas.
- [10] IEEE Standard for Letter Designations for Radar-Frequency Bands
- [11] Hagos, M. G. – S-Band Monopulse Radar Receiver Design and Implementation
- [12] <http://www.cst.com/>. Acessado em 25/03 às 23:00 horas.
- [13] Balanis, C.A. – Antenna Theory 3rd Ed.
- [14] Lorenzo Lo Monte, Russell Vela - Rediscovering Monopulse Radar with Digital Sum-Difference Beamforming
- [15] George M. Kirkpatrick - Development of A Monopulse Radar System
- [16] DeJean, G.R. - The Use of a Microstrip Yagi Array as a Solution for Beam Steering Applications
- [17] http://mantel.en.ec21.com/company_info.jsp . Acessado em 20/06 às 17:00

Anexo A: Valores coletados na primeira montagem

Theta (°)	Valor Soma (dBm)	Valor Diferença (dBm)
172,030	-42,3	-46,6
173,911	-42,6	-51,1
175,806	-42,1	-49,7
178,472	-41,7	-49,2
178,854	-41,7	-49,2
179,236	-41,9	-50,7
179,618	-41,9	-54,1
180	-42	-57,8
180,3819662	-41,7	-62,9
180,5729387	-41,6	-65,8
180,7638985	-41,5	-67,5
180,9548413	-41,7	-72,5
181,1457628	-41,7	-66
181,336659	-41,8	-62,2
181,5275254	-41,8	-59,8
181,9091524	-41,8	-56,4
182,29061	-42	-55,2
182,6718646	-42,4	-57,1
183,4336304	-42	-59,5
184,3841003	-42,1	-58,6
185,3321589	-42,6	-64,7
186,2772985	-42,7	-72,2
186,8427734	-42,2	-58,1
187,2190208	-41,5	-53,6
189,833564	-43,2	-56,7

Anexo B: Valores coletados na segunda montagem

Ângulos (Central 180º)	Medida do padrão SOMA (em dBm)	Medida do padrão Diferença (em dBm)
146,310	-48,2	-39,6
146,976	-47,8	-39,7
147,653	-46,7	-39,6
148,339	-45,4	-39,2
149,036	-45,2	-39,1
149,744	-45,4	-39,4
150,461	-46,9	-40,3
151,189	-47,4	-40,7
151,928	-48	-41,2
152,676	-46,9	-41,5
153,435	-46,2	-42,6
154,204	-46,3	-43,3
154,983	-47,4	-43,9
155,772	-46,7	-43,5
156,571	-46,1	-43,6
157,380	-45,7	-42,7
158,199	-43,5	-42,1
159,027	-43,5	-42,7
159,864	-43,1	-42,6
160,710	-42,8	-41,8
161,565	-41,2	-41,7
162,429	-40,9	-40,5
163,301	-39,4	-40,4
164,181	-38,3	-39,3
165,069	-38,2	-39,9
165,964	-36,9	-39,3
166,866	-36,3	-39,3
167,775	-35,7	-39,1
168,690	-34,9	-38,9
169,611	-34,7	-40,3
170,538	-34,7	-40,6
171,469	-34,4	-41,7
172,405	-34,1	-41,7
173,346	-33,9	-42,5
174,289	-33,6	-43,2
175,236	-33,5	-43,1
176,186	-36,7	-43,8
177,138	-33,9	-44,2
178,091	-32,9	-45,5

179,045	-32,8	-48,4
180,000	-33,9	-49,4
180,955	-32,8	-52,8
181,910	-32,5	-57,8
182,865	-32,8	-64,2
183,819	-32,8	-63,2
184,774	-32,9	-59,8
185,729	-33,1	-57,7
186,684	-33,4	-53
187,639	-33,7	-50,5
188,594	-34,1	-49,1
189,548	-33,8	-47,5
190,503	-33,4	-46,8
191,458	-33,6	-46,2
192,413	-34,2	-44,8
193,368	-34,7	-44,4
194,323	-35,7	-44,9
195,277	-36,4	-43,9
196,232	-37,1	-43,8
197,187	-38,1	-43,9
198,142	-38,6	-43,2
199,097	-39,2	-44,8
200,052	-41,1	-45,6
201,007	-40,7	-45,5
201,961	-41,2	-44,7
202,916	-40,7	-45,9
203,871	-41,6	-45,6
204,826	-43,4	-46,2
205,781	-43,8	-45,1
206,736	-43,9	-44,7
207,690	-43,4	-43,2
208,645	-42,2	-42,7
209,600	-42,8	-43,2
210,555	-41,7	-43,5
211,510	-41,4	-42,4
212,465	-41,2	-42,2
213,419	-41,5	-41,9
214,374	-43,2	-41,5
215,329	-42,3	-40,6
216,284	-40,9	-40,1
217,239	-40,3	-39,9
218,194	-42,3	-40,6