



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PROJETO DE UM SISTEMA VERIFICADOR DE
POLARIZAÇÃO DE ANTENAS**

Maria Leticia Nóbrega Batista

Campina Grande – PB.

Julho de 2011

MARIA LETICIA NÓBREGA BATISTA

**PROJETO DE UM SISTEMA VERIFICADOR DE
POLARIZAÇÃO DE ANTENAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento parcial às exigências para obtenção do Grau de Engenharia Eletricista.

Área de concentração: Antenas e Microondas

Professor Rômulo Raimundo Maranhão do Valle

Universidade Federal de Campina Grande

Orientador, UFCG

Campina Grande – PB

Julho de 2011

Dedicatória

Aos meus pais, Luciano Figueiredo e Maria Zoetânia, que, incondicionalmente, fazem das conquistas as suas metas. Aos meus irmãos, Maria Stefania e Joaquim Aprigio, e a todos os meus amigos, pelo apoio intelectual e emocional.

Agradecimentos

À Deus por todas as oportunidades cedidas, por seu imenso amor e sua infinita graça.

Aos meus queridos pais, Luciano Figueiredo e Maria Zoetânia, por sempre acreditarem em mim e por todo investimento.

Ao professor Rômulo Valle pela oportunidade, confiança, orientação e todo conhecimento transmitido, desde os tempos de graduação.

Aos amigos e companheiros do LIEC, em nome de José Maurício, a quem agradeço pelo companheirismo, amizade e constante parceria na troca de idéias.

Aos amigos e companheiros do LEMA, por todo o conhecimento partilhado.

Aos colegas de curso, em especial aos sobreviventes do 2006.1.

Aos técnicos Simões e Galba pela indispensável ajuda.

À UFCG por toda a formação e estrutura técnica proporcionada.

À querida Adail, eternamente grata e fã.

E a todos que a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Sumário

Dedicatória	iii
Agradecimentos.....	iv
Lista de Tabelas.....	vii
Lista de Figuras	viii
CAPÍTULO 1 – Introdução	1
1.1 Estado da Arte	1
1.2 Objetivos	1
1.3 A Organização do Trabalho	2
CAPÍTULO 2 – Conceito de Ondas Eletromagnéticas	3
Apresentação do capítulo.....	3
2.1 Equações de Maxwell	3
2.2 Ondas Planas	4
CAPÍTULO 3 – Polarização de Ondas Eletromagnéticas	6
Apresentação do capítulo.....	6
3.1 Ondas Polarizadas	6
3.2 Ondas Completamente Polarizadas	8
3.3 Elipse de Polarização.....	10
3.4 Polarização em Antenas	12
3.5 Tipos de Polarização	13
3.5.1 Polarização Linear	13
3.5.2 Polarização Circular	13
3.6 Métodos para a Medição de Polarização Eletromagnética.....	14
3.6.1 Método da Componente Linear	14
3.6.2 Método da componente linear adaptado.....	16
CAPÍTULO 4 – Antenas	18
Apresentação do capítulo.....	18
4.1 Antenas planares de microfita.....	18
4.2 Antenas do tipo quasi-Yagi.....	19
4.2.1 Aspectos teóricos.....	20
4.3 Conclusão	21
CAPÍTULO 5 – Concepção do projeto	22
Apresentação do capítulo.....	22

5.1	Fluxograma do projeto	22
5.2	Simulação	24
5.3	Substrato utilizado	24
5.4	Projeto de uma antena quasi-Yagi	24
5.4.1	Linha de microfita	25
5.4.2	Divisor de potência.....	26
5.4.3	Balun	27
5.4.4	Driver	27
5.4.5	Diretor	27
5.5	Características da antena	27
5.7	Modelo Simulado	30
5.8	Modelo do arranjo	31
5.9	Modelo fabricado	34
5.10	Conclusão	38
CAPÍTULO 6 – Polarização.....		39
Apresentação do capítulo		39
6.1	Introdução	39
6.2	Realização do experimento	39
6.3	Conclusão	41
CAPÍTULO 7 – Considerações Finais		42
7.1	Conclusões	42
7.2	Sugestões para trabalhos futuros	42
Bibliografia.....		44
ANEXO.....		46

Lista de Tabelas

Tabela 1 – As equações de Maxwell	3
Tabela 2 – Ângulos de polarização para diferentes estados de polarização.	11
Tabela 3 – Valores dos parâmetros do projeto da antena QY.	29
Tabela 4 – Valores finais dos parâmetros do arranjo de antenas da Figura 19.	32
Tabela 5 – Valores obtidos nas medições.....	41

Lista de Figuras

Figura 1 – Alguns padrões de polarização (Kraus, 1950)	6
Figura 2 – Comportamento espacial dos campos elétricos e magnéticos de uma onda plana para um... 7	7
Figura 3 – Diagrama de radiação de campo para o plano E, e o plano H.	8
Figura 4 – Sequência espacial dos vetores campo elétrico (Hellmann, 2001).	9
Figura 5 – Localização dos tipos de polarização na Esfera de Poincaré (Kraus, 1950).	9
Figura 6 – Sentido de propagação da onda EM.....	10
Figura 7 – Representação da elipse de polarização.	11
Figura 8 – Esquema para a medição da razão axial usando o método da componente linear (Kraus, 1950).....	15
Figura 9 – Circuito compensador de fase (Kraus, 1950).	16
Figura 10 – Antena planar do tipo patch.	18
Figura 12 – Ilustração de uma antena quasi-Yagi.	21
Figura 13 – Fluxograma para <i>design</i> de antenas.	23
Figura 14 – Representação de uma linha de microfita.	25
Figura 15 – Dimensões da antena quasi-Yagi.	29
Figura 16 – Primeiro modelo simulado.	30
Figura 17 – Parâmetro $S_{1,1}$ do primeiro modelo simulado.	30
Figura 18 – Impedância do primeiro modelo simulado.....	31
Figura 19 – Modelo final da antena.	31
Figura 20 – Parâmetros $S_{1,1}$ e $S_{2,2}$ do arranjo final de antenas simulado.	33
Figura 21 – Impedância apresentada pelas antenas em 2.4GHz.....	33
Figura 22 – Diagrama de radiação 1D: (a)Antena 1 e (b)Antena 2.....	34
Figura 23 – Modelo final fabricado.....	35
Figura 24 – Vista posterior do modelo fabricado (plano de terra truncado).	35
Figura 25 – Analisador de Rede.....	36
Figura 26 – Parâmetros $S_{1,1}$ e $S_{2,2}$ da antena fabricada.	36
Figura 27 – (a)Impedância característica das antenas em 2.4GHz (b)Zoom.....	37
Figura 29 – Diagrama de radiação 1D (Plano E) : (a)Antena 1 e (b)Antena 2.....	38
Figura 30 – Analisador de espectro (Agilent Technologies®).	40
Figura 31 – Esquema da montagem para a realização das medições.	40

CAPÍTULO 1 – Introdução

1.1 Estado da Arte

Nos dias atuais, diversas aplicações dos fenômenos eletromagnéticos podem ser encontradas em nosso dia-a-dia. Tais aplicações são de fundamental importância, sobretudo nos meios de comunicação, incluindo as antenas, a telefonia móvel, os satélites ou até mesmo as fibras ópticas. Esses sistemas suportam ondas eletromagnéticas que são caracterizadas, dentre outras propriedades, por sua polarização. Em tais sistemas, a polarização de ondas eletromagnéticas constitui-se um parâmetro de grande relevância, pois em suma, a transmissão de um sinal entre duas antenas, é inevitavelmente afetada pela relação entre os tipos de polarização que as caracteriza, sendo fator determinante na qualidade da transmissão do sinal e consequentemente do sinal que será recebido.

Por outro lado é visível a crescente utilização de equipamentos de RF no mais diversos setores de trabalho. Tais equipamentos podem ser alvo de interferências eletromagnéticas providas de um outro equipamento que pode estar emitindo ondas EM necessárias para os seus fins de uso, mas que podem interagir de forma indesejável com os demais aparelhos. Assim, caso conheçamos a direção de propagação de uma onda EM a identificação das propriedades do campo elétrico irradiado dentre elas o padrão de polarização, poderá tornar facilitado o processo de detecção, correção e minimização da interferência.

1.2 Objetivos

O trabalho que será apresentado tem por objetivo um estudo detalhado acerca da polarização de uma onda eletromagnética, fazendo uma abordagem de cunho teórico e experimental a respeito do tema.

Nesse contexto será projetado e avaliado o desempenho de um sistema experimental para geração de ondas eletromagnéticas polarizadas, na banda de frequências de microondas, assim como proposta uma metodologia para a constatação da polarização da onda para o caso linear. Proceder-se-á o estudo experimental em laboratório com a coleta de dados de medições, para fins de comparação dos resultados obtidos nas etapas anteriores. Prevê também, nas várias etapas de execução, a simulação computacional com a estimação de vários de seus parâmetros.

Dessa forma, é possível identificar os seguintes objetivos específicos para o trabalho:

- Análise dos conceitos de ondas eletromagnéticas;
- Estudo acerca da polarização de ondas eletromagnéticas;
- Apresentação do método para a medição da polarização eletromagnética;
- Simulação do arranjo de antenas que será utilizado;
- Projeto, montagem e testes de uma bancada para a constatação da polarização eletromagnética.

1.3 A Organização do Trabalho

No capítulo 1 são apresentadas visões gerais sobre o trabalho, algumas motivações, os objetivos em relação ao tema apresentado e também toda a sua organização.

No capítulo 2 são abordados conceitos gerais sobre a teoria eletromagnética, onde são apresentadas as equações de Maxwell, o conceito de ondas planas, notações vetoriais e um estudo do conceito de polarização de ondas eletromagnéticas, bem como as suas formas de representação.

No capítulo 3 as principais características sobre polarização são apresentadas e também a análise do método para a obtenção de medidas práticas de polarização.

O capítulo 4 é dedicado à escolha dos tipos de antenas que serão utilizadas, o funcionamento de uma antena do tipo “quasi-Yagi”, as suas principais características de projeto e explanadas algumas modificações introduzidas neste modelo de antena.

O capítulo 5 trata da construção do conjunto de antenas estudado. São apresentados todos os passos que foram seguidos para o *design* do arranjo de antenas no CST em forma de fluxograma, bem como os resultados obtidos na simulação do mesmo. É descrita também uma avaliação do projeto fabricado em comparação com os resultados esperados na simulação

No capítulo 6 são apresentados os resultados obtidos durante a fase de medições para a parte da polarização, e o procedimento que foi seguido para obtenção de tais dados.

Por fim, o capítulo 7 apresenta as conclusões com relação aos resultados encontrados nas simulações e nas medições, assim como comentários em relação ao cumprimento dos objetivos propostos. As contribuições científicas do trabalho são destacadas neste capítulo, assim como propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 – Conceito de Ondas Eletromagnéticas

Apresentação do capítulo

Aqui será apresentado um estudo resumido das equações de Maxwell, das ondas planas, uma abordagem teórica sobre os conhecimentos básicos da teoria eletromagnética. A partir daí será dado um enfoque na polarização de ondas eletromagnéticas.

2.1 Equações de Maxwell

Por volta de 1864, James C. Maxwell aprofundou os seus conhecimentos dos campos da eletricidade e do magnetismo, dando origem às Equações de Maxwell - equações matemáticas que descrevem o comportamento dos campos \vec{E} e \vec{H} constituintes, dentre outras, das ondas de rádio, em muitos casos consideradas ondas transversais e que possuem diversas propriedades entre elas a polarização (orientação do vetor campo elétrico).

Em 1888, Heinrich Hertz em uma série de experimentos demonstrou como uma onda eletromagnética pode ser gerada, propagada e detectada. E é claro que somente no século XX surgiram inúmeras aplicações para o eletromagnetismo; incluindo a distribuição residencial da energia elétrica; rádio, televisão, radares, etc. A teoria de Maxwell unificou a eletricidade e o magnetismo; ela consolidou todos os resultados já conhecidos previstos tanto teóricos experimentalmente por outros cientistas. A equação da onda eletromagnética pode ser obtida, dessas quatro equações após o estabelecimento das características do meio de propagação. Tais equações são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 – As equações de Maxwell

FONTES ELÉTRICAS	FONTES MAGNÉTICAS
$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + j\omega \epsilon \vec{E}$	$\nabla \times \vec{H} = j\omega \epsilon \vec{E}$
$\nabla \times \vec{E} = -j\omega \mu \vec{H}$	$\nabla \times \vec{E} = -j\omega \mu \vec{H}$
$\nabla \cdot \vec{H} = 0$	$\nabla \cdot \vec{B} = \rho_m$
$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v$	$\nabla \cdot \vec{D} = 0$

Como dito anteriormente, a onda eletromagnética é composta de campos elétrico e magnético, relacionados pelas equações de Maxwell. Se o campo elétrico varia no tempo, o campo magnético também será variável. Para o caso da onda plana, tanto o campo elétrico quanto o campo magnético são em qualquer ponto normais a direção de propagação da onda. Isto significa que os campos estão em um plano que é transversal ou normal à direção de propagação. Assim, este tipo de onda eletromagnética não tem componente de campos elétrico ou magnético na direção de propagação. Se as amplitudes de \vec{E} e \vec{H} têm a mesma magnitude ao longo de qualquer plano transversal à frente de onda a mesma será uma onda plana uniforme. A orientação na qual aponta o vetor campo elétrico quando a onda se propaga é chamada de polarização da onda.

2.2 Ondas Planas

Quando, tanto o campo elétrico quanto o campo magnético são em qualquer ponto normais a direção de propagação da onda, isto significa que os campos estão em um plano transversal ou normal a direção de propagação da onda. Essa onda é chamada Transversal Eletromagnética (TEM), também conhecida pelo nome de onda plana uniforme. Uma onda plana é aquela em que a frente de onda é uma superfície equifásica, isto é, possui fase constante. Assim, caso as amplitudes de \vec{E} e \vec{H} possuam a mesma magnitude ao longo de qualquer plano transversal na frente de onda a mesma será uma onda plana uniforme. O campo elétrico, solução da equação de onda plana é dado por

$$\vec{E}(z,t) = E_0 \cos(\omega t - \beta z) \vec{x} \quad [\text{V/m}] \quad (2.1)$$

Onde,

$\omega = 2\pi f$: frequência angular (*rad/s*)

f = frequência de onda (*Hz*)

β = constante de fase (*rad/m*)

λ = comprimento de onda (*m*)

Como a direção do campo elétrico é a do eixo x , a intensidade de campo magnético para a propagação na direção z , é dada por:

$$\vec{H}(z,t) = \frac{E_0}{\eta} \cos(\omega t - \beta z) \vec{y} \quad [\text{A/m}] \quad (2.2)$$

Onde,

$$\eta = \text{impedância intrínseca do meio} = \sqrt{\mu/\varepsilon} \Omega$$

ε = permissividade elétrica [F/m]

μ = permeabilidade magnética [H/m]

No espaço livre, a impedância intrínseca é:

$$\eta = \sqrt{\mu/\varepsilon} \Omega \quad (2.3)$$

Assim, a expressão para a intensidade do campo magnético é a expressão para a intensidade do campo elétrico dividida por uma constante η ; a impedância intrínseca do meio

$$H_y(z,t) = \frac{E_x(z,t)}{\eta} \text{ A/m} \quad (2.4)$$

Na prática, uma onda plana uniforme não existe fisicamente, pois ela teria que ter energia infinita; entretanto sua conceituação é de fundamental importância para o eletromagnetismo, pois serve como modelo para ondas em campos distantes, onde a superfície equipotencial torna-se tão grande que pode ser considerada plana. Tal situação é importante para comunicações via rádio, pois as ondas que chegam ao receptor pelo transmissor são basicamente ondas planas (Sadiku, 2004).

CAPÍTULO 3 – Polarização de Ondas Eletromagnéticas

Apresentação do capítulo

O capítulo é dedicado à apresentação da teoria básica necessária ao entendimento da fundamentação da polarização de ondas eletromagnéticas. Nele também será apresentado o método escolhido para a verificação de polarização de antenas.

3.1 Ondas Polarizadas

A polarização de uma antena é um dos parâmetros de caracterização dos mais importantes no seu uso como irradiador, pois conforme definição (IEEE., Standard Test Procedures for Antennas 149, 1979), é uma propriedade da radiação eletromagnética em uma frequência, que descreve a forma e orientação do “locus” da extremidade do vetor campo (\vec{E} ou \vec{H}) como uma função do tempo quando a onda se propaga. Na prática, quando apenas ondas planas ou localmente planas são consideradas, é suficiente especificar a polarização do vetor campo elétrico E .

A hipótese de se tratar com ondas planas, faz com que as avaliações sobre polarização sejam efetuadas na região de campos distantes e aí, o campo irradiado pela antena é observado em uma pequena região (Balanis, 1997). Somente em poucos casos, a polarização do campo irradiado pode ser deduzida de forma simples: por exemplo, o caso da antena dipolo linear que gera um campo polarizado linearmente e a antena helicoidal que pode gerar uma polarização circular. Na Figura 1 são apresentados os três tipos de polarização.

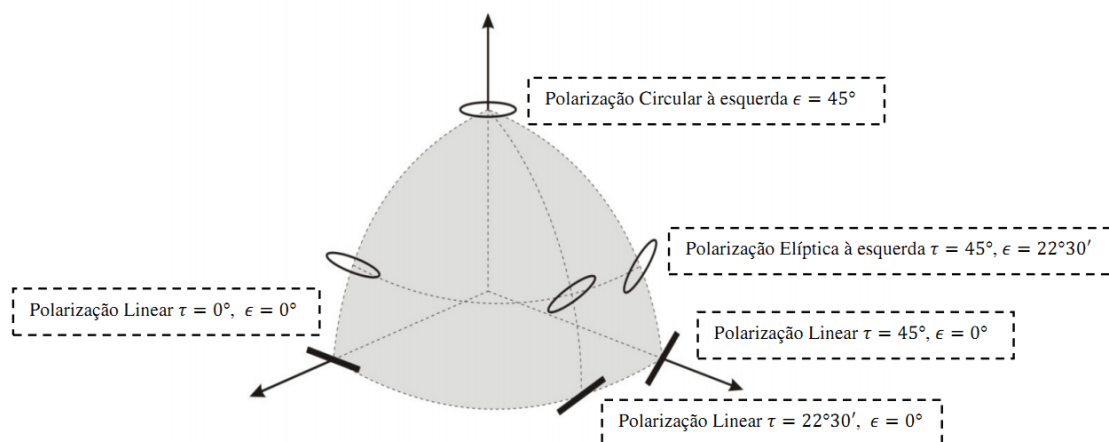


Figura 1 – Alguns padrões de polarização (Kraus, 1950)

Uma onda eletromagnética, se propagando em uma determinada direção é dita ser completamente polarizada quando as componentes do campo elétrico apresentam amplitudes máximas constantes, ou ao menos variam lentamente com o tempo.

A polarização de onda é definida no plano que contém o vetor campo elétrico. Ela se apresenta em forma de esboço gráfico construído a partir da posição do vetor \vec{E} instantâneotendo como referência um plano de observação. Uma onda é linearmente polarizada quando o vetor campo elétrico \vec{E} se move em uma linha de inclinação constante no espaço. Um exemplo deste caso é a onda polarizada horizontalmente quando \vec{E} é paralelo a superfície de referência, ou verticalmente quando \vec{E} se apresenta vertical.

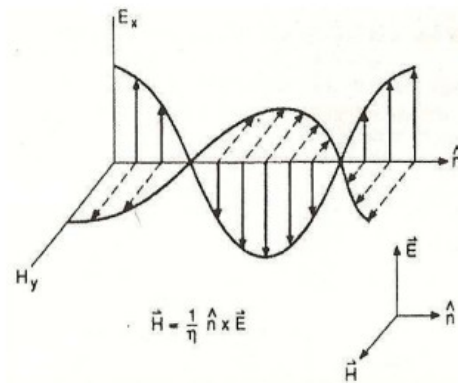


Figura 2 – Comportamento espacial dos campos elétricos e magnéticos de uma onda plana para um instante fixo de tempo (Kraus, 1950).

Os planos que contém os vetores elétrico e magnético são os planos de polarização. O plano de polarização é perpendicular à direção de propagação da onda plana. A direção do vetor campo elétrico da onda é quem define o tipo de polarização.

Uma antena do tipo dipolo produz uma polarização linear, visto que o vetor campo elétrico gerado pelo processo de oscilação é paralelo ao elemento radiante. Antenas que têm correntes elétricas fluindo ao longo de um fio reto tais como as antenas dipolo ou Yagi-Uda produzem polarizações lineares (Stutzman, 1992).

A intensidade dos campos na região de campos distantes plotada em função da variável angular é conhecida como diagrama de radiação, como pode ser observado na Figura 3. Note que é máximo na direção perpendicular ao dipolo, e mínimo na sua direção.

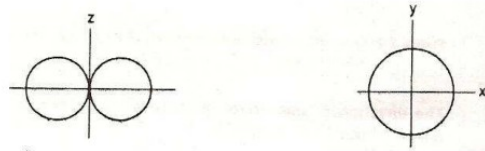


Figura 3 – Diagrama de radiação de campo para o plano E, e o plano H.

Nesses diagramas, é representada a distribuição de energia nos planos elétricos e magnéticos tendo como referência a terra.

3.2 Ondas Completamente Polarizadas

Uma onda é dita completamente polarizada quando as componentes do campo elétrico se propagando em uma determinada direção apresentam amplitudes máximas constantes, ou ao menos variarem lentamente com o tempo.

Os perfis de polarização completa conhecidos são linear, circular e elíptica. Todos possuem como origem, a elipse de polarização caracterizada pela Equação 3.1 (Nascimento, 2011).

$$\frac{E_h^2}{e_h^2 \text{sen}^2(\varphi)} + \frac{E_\vartheta^2}{e_\vartheta^2 \text{sen}^2(\varphi)} - 2 \cdot \frac{E_h E_\vartheta \cos(\varphi)}{e_h e_\vartheta \text{sen}^2(\varphi)} \quad (3.1)$$

Na Equação 3.1, e_h e e_ϑ são as amplitudes dos campos elétricos nas direções, horizontal e vertical respectivamente.

Caso essas componentes apresentem amplitudes distintas e sejam defasadas de um ângulo Ψ qualquer, a figura descrita será uma elipse centrada na origem dos sistemas de coordenadas, que sofrerá uma rotação. Caso a defasagem entre as componentes de campo elétrico seja de $\pm 90^\circ$ e apresentem amplitudes idênticas, a elipse transformar-se-á em um círculo centrado na origem.

A equação que descreve o caso particular para a polarização circular é descrita pela Equação 3.2.

$$E_h^2 + E_\vartheta^2 = e_0^2 \quad (3.2)$$

Onde, e_0 representa o raio da circunferência, formada a partir da extremidade do vetor campo elétrico resultante.

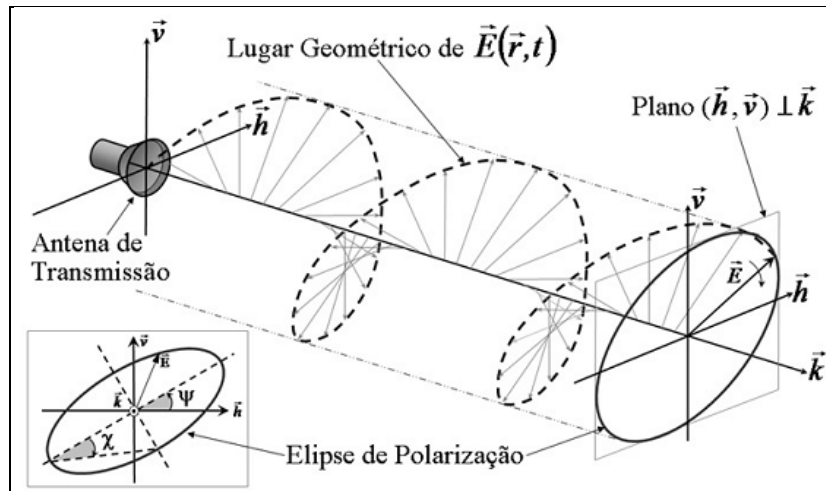


Figura 4 – Sequência espacial dos vetores campo elétrico (Hellmann, 2001).

Para o caso que a defasagem entre os campos seja um múltiplo de $n\pi$, independente da amplitude de ambos, ou mesmo tendo-se apenas uma componente de campo elétrico, seja ela vertical ou horizontal, a polarização resultante será linear, como descrito na Equação 3.3.

$$E_v = \pm m E_h \quad (3.3)$$

Uma ferramenta essencial para representar os tipos de polarização total é a esfera de Poincaré, como mostrado na Figura 5. Uma onda eletromagnética pode ainda ser parcialmente polarizada ou despolarizada. Ela é dita parcialmente polarizada quando as componentes de campo elétrico da onda plana e a diferença de fase entre elas, não são constantes no domínio temporal, ou caso os parâmetros de Stokes definam um ponto na esfera de Poincaré que seja interior a esta. Já a onda dita despolarizada é aquela em que os parâmetros de Stokes definem um ponto que está localizado no centro da esfera de Poincaré.

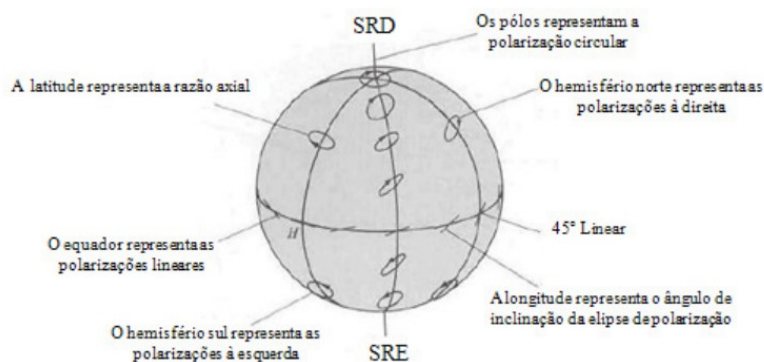


Figura 5 – Localização dos tipos de polarização na Esfera de Poincaré (Kraus, 1950).

Resumindo:

- Os estados de polarização linear correspondem ao equador da esfera.
- Os estados de polarização circular correspondem aos pólos da esfera.
- Estados com polarizações ortogonais correspondem a pontos opostos sobre um mesmo diâmetro.
- Estados de mesma elipticidade correspondem a um plano paralelo ao equador.

3.3 Elipse de Polarização

O IEEE estabelece que o sentido de rotação do campo polarizado, caso a figura determinada pela extremidade do vetor campo elétrico no plano perpendicular a direção de propagação seja uma elipse ou circunferência, poderá ser à direita ou à esquerda (IEEE., Standard Test Procedures for Antennas 149, 1979) (IEEE., Standard definitions of Terms for Antennas 145, 1993). Essa definição toma o observador como ponto de referência para o afastamento da onda, ilustrado pela Figura 6.

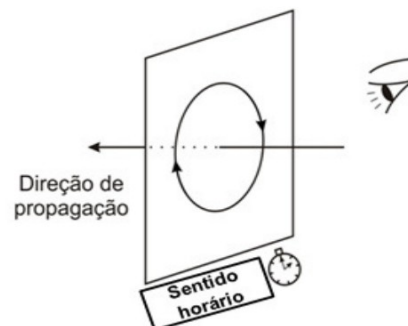


Figura 6 – Sentido de propagação da onda EM.

Para a determinação do sentido de polarização, deve-se calcular o ângulo que define um círculo na esfera de Poincaré, através de um ponto de referência. Para tal é necessário o cálculo do ângulo auxiliar γ , ilustrado pela Figura 7 e representado pela Equação 3.4:

$$\gamma = \text{tg}^{-1} \left(\frac{E_{\text{eixo maior}}}{E_{\text{eixo menor}}} \right) \quad (3.4)$$

Logo em seguida é calculado o ângulo que está relacionado com a excentricidade da elipse de polarização, também visto na Figura 3 e dado pela Equação (3.5).

$$\epsilon = \text{arcsen}[\text{sen}(2\gamma) \cdot \text{sen}(\psi)] \quad (3.5)$$

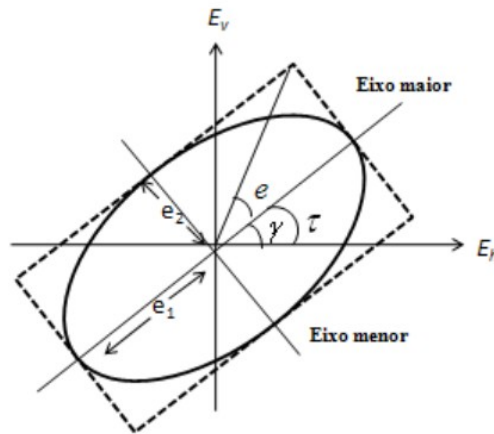


Figura 7 – Representação da elipse de polarização.

Assim, a polarização é orientada para a direita quando, para um observador olhando na direção da origem da radiação, a ponta do vetor campo elétrico parece descrever uma elipse no sentido horário. Para a polarização orientada para a esquerda, ocorre justamente o oposto, ou seja, para esse mesmo observador, a ponta do vetor campo elétrico parece descrever uma elipse na direção contrária à dos ponteiros do relógio.

Então se $\varepsilon > 0$, em relação ao eixo E_h , a polarização é dita à esquerda, caso contrário $\varepsilon < 0$, à direita. Esse fenômeno pode ser observado na esfera de Poincaré. Nela pode-se observar que todas as polarizações no hemisfério superior são à direita, e que todas no hemisfério inferior são à esquerda, como é observado na Figura 1. Vale lembrar que para uma onda EM completamente polarizada o ponto na esfera de Poincaré está sobre sua superfície.

Tabela 2 – Ângulos de polarização para diferentes estados de polarização.

Ângulo	Estado de Polarização				
	Horizontal(h)	Vertical(v)	Linear em θ	Circular à direita (R)	Circular à esquerda(L)
Inclinação(γ)	0°	90°	θ	90° a 90°	90° a 90°
Elipticidade(ψ)	0°	0°	0°	-45°	45°

Devido à faixa de valores que estão compreendidos os ângulos γ e ψ , pode-se definir uma infinidade de combinações lineares de dois estados de polarização ortogonais, dando origem a uma base de polarização de referência.

O campo elétrico instantâneo associado a uma onda plana viajando na direção z pode ser decomposto em duas componentes x e y. Cada uma destas componentes pode ser expressa por:

$$\vec{E}(t, z) = E_1 \cos(\omega t - \beta z) \hat{x} \quad (3.6)$$

$$\vec{E}(t, z) = E_2 \cos(\omega t - \beta z + \delta) = E_2 \sin(\omega t - \beta z) \hat{y} \quad (3.7)$$

Onde,

E_1 e E_2 : são as amplitudes das componentes de campos elétricos nas direções x e y

β = constante de fase, $2\pi/\lambda$ (rad/m)

ω = frequência angular, $\omega = 2\pi f$ (rad/s)

δ = diferença de fase, entre as componentes x e y.

Através de arranjos matemáticos chega-se à Equação (3.8), que representa matematicamente a equação de uma elipse.

$$\frac{E_x^2}{E_1^2} + \frac{E_y^2}{E_2^2} = 1 \quad (3.8)$$

A polarização elíptica possui razão axial AR, definida por:

$$AR = \frac{E_{\text{máximo}}}{E_{\text{mínimo}}} = \frac{E_{\text{eixo maior}}}{E_{\text{eixo menor}}} \quad (3.9)$$

A componente de campo elétrico de maior amplitude corresponde na elipse de polarização ao eixo maior.

$$|AR| = \frac{OA}{OB} \geq 1 \quad (3.10)$$

A razão de polarização é um número que representa o estado de polarização de uma onda. Ela é a forma mais compacta e prática de se prever o estado de polarização.

Note que se $|AR| = \infty$ ou $|AR| = 0$, a elipse se degenera em uma linha, representando um caso especial da polarização linear.

Quando $|AR| = 1$ ou (0 dB) a polarização é perfeitamente circular, desde que as amplitudes de campo sejam iguais, e o defasamento (δ) entre os campos for 90° , que é um caso particular da polarização elíptica. Se as amplitudes forem diferentes, a polarização é elíptica.

3.4 Polarização em Antenas

A polarização de uma antena é a polarização da onda irradiada pela antena na transmissão. Entretanto todas as discussões a respeito de polarização de ondas se aplicam às antenas. Sabe-se também que as mesmas são recíprocas, ou seja, se comportam de forma similar na transmissão e na recepção.

Pode-se ainda, considerar a terra como plano de referência para a polarização de uma antena. A polarização da antena é encontrada excitando a antena com o transmissor e observando a polarização da onda por vários ângulos de observação do campo distante. Neste caso, são utilizadas duas antenas, e é claro uma funcionando como transmissora, e a outra como receptora (Machado, 2008).

Para uma maior eficiência do transmissor e receptor, ambas as antenas devem possuir a mesma polarização. Uma polarização não casada provoca uma queda no nível do sinal recebido (e, portanto, um aumento do ruído) (Batista, 2010).

3.5 Tipos de Polarização

3.5.1 Polarização Linear

Antenas que possuem correntes fluindo ao longo de um fio reto produzem polarização linear paralela ao fio, como exemplo pode-se citar a mais simples das antenas, a antena dipolo. Por exemplo, uma antena de abertura está polarizada linearmente na direção do campo da abertura. Em geral as antenas do tipo dipolo ou Yagi Uda produzem polarizações lineares que podem ser verticais ou horizontais dependendo da configuração espacial destas antenas (Stutzman, 1992).

3.5.2 Polarização Circular

Dois métodos são geralmente utilizados para gerar esse tipo de polarização o primeiro é aquele das antenas que produzem polarização circular por meio de sua estrutura física, ou seja, se a estrutura é helicoidal, ou espiral; isto determinará sua polarização. O segundo tipo pode ser obtido pela separação espacial de componentes ortogonais em fase e quadratura; ou seja, dois dipolos defasados de 90° elétricos podem gerar polarização circular. Em suma dois dipolos (polarização linear), porém defasados de 90° entre si; e caso os dipolos possuam o mesmo comprimento, os campos E_x e E_y possuem a mesma amplitude, caso posicionadas ortogonalmente geram uma polarização circular.

Existem várias fontes de erro que irão reduzir a polarização. Elas incluem erros na amplitude e na fase das componentes lineares, componentes que não são exatamente ortogonais e componentes que são polarizados elipticamente antes mesmo da polarização linear. Erros de fase podem ser causados por diferenças na alimentação das linhas (Stutzman, 1992).

3.6 Métodos para a Medição de Polarização Eletromagnética

A medida da polarização é uma característica da onda polarizada pela antena na região de campo distante; neste caso são utilizadas duas antenas, uma funcionando como transmissora e a outra funcionando como receptora.

Muitos são os métodos existentes para a medição da polarização eletromagnética. Como exemplo pode-se citar o Método da Componente Linear, Método da Polarização Padrão, Método da Componente Circular e o Método da Medição de Potência.

Ao longo deste trabalho será discutido e utilizado o Método da Componente Linear, ou melhor, uma adaptação do mesmo.

3.6.1 Método da Componente Linear

O método que será aqui discutido e utilizado trata-se do método da componente linear proposto por John D. Kraus (Kraus, 1950). Para a execução do mesmo são necessários dois dipolos de $\frac{1}{2}\lambda$ separados por uma distância que minimize o acoplamento eletromagnético entre ambos.

Neste arranjo os dipolos são postos em quadratura espacial, assim um dipolo (E_h) na horizontal e um outro (E_v) na vertical, como apresentado na Figura 8.

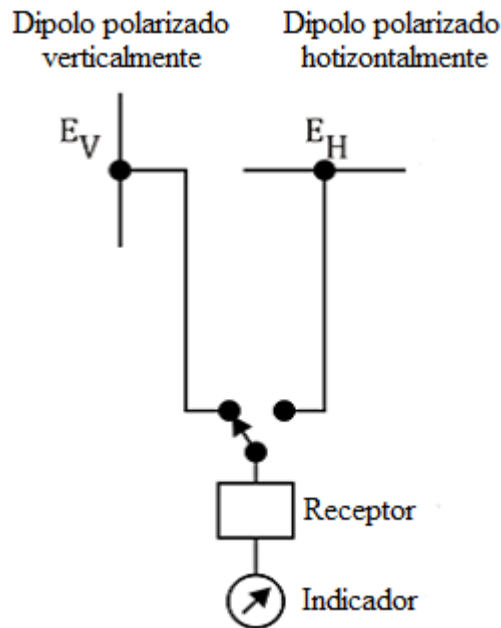


Figura 8 – Esquema para a medição da razão axial usando o método da componente linear (Kraus, 1950).

Essa parte do experimento consiste na obtenção da razão axial, dada pela equação 3.8, que é definida como a razão entre os eixos, maior e menor da elipse de polarização. Inicialmente, deve-se conectar o receptor aos terminais do dipolo horizontal, medindo assim a amplitude do campo elétrico E_x . Em seguida deve-se conectar o mesmo receptor, nas mesmas condições, aos terminais do dipolo vertical, anotando o valor de E_y . Portanto, a razão axial será dada pela Equação (3.9).

Após a determinação da razão axial, a segunda etapa do procedimento consiste em medir a diferença de fase entre os níveis de campo captados pelos dois dipolos, (ψ). É adotado como referência de fase o nível campo coletado pelo dipolo disposto na vertical. Para a realização desta etapa utilizaremos o modelo sugerido por John Kraus (Kraus, 1950), no qual o dipolo vertical deve ser conectado ao dipolo horizontal por meio de uma linha fendida casada (no modelo originalmente sugerido por John Kraus), ou por um circuito compensador de fase mostrado, ver Figura 9. Neste sistema, o deslocamento adequado na sonda é realizado de modo a encontrar uma distância d_0 associada ao defasamento do sinal que está se propagando através da linha. É utilizado ainda um atenuador com o objetivo de proteger os equipamentos de medição contra níveis de tensão que possam alterar os resultados obtidos na medição de forma significativa. A onda resultante é composta por dois campos, lembrando que neste caso o meio no qual a onda se propaga é considerado sem perdas ($\sigma=0$).

A equação do campo resultante é dada pela Equação (3.11).

$$E_R = E_1 e^{-j\beta z_1} + E_2 e^{-j\beta(z_1+d_0)} \quad (3.11)$$

Onde, β , E_R , E_1 , E_2 , z_1 e d_0 são respectivamente, a constante de fase, o campo elétrico resultante, o campo elétrico proporcional ao dipolo vertical, o campo elétrico proporcional ao dipolo horizontal, ao deslocamento equivalente e distância associada ao defasamento da linha.

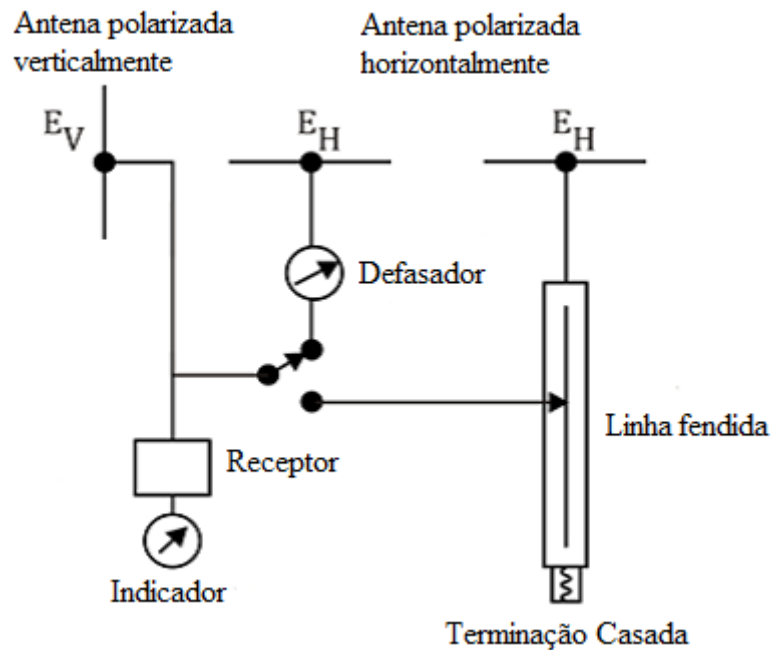


Figura 9 – Circuito compensador de fase (Kraus, 1950).

O campo elétrico captado pelo dipolo vertical será escolhido como referência em amplitude e fase, onde a diferença de fase possuirá um valor aproximado de βd_0 , onde $\beta = 2\pi/\lambda$. Assim, o valor do defasamento será dado pela Equação (3.12).

$$\psi = \beta d_0 \quad (3.12)$$

Para a determinação do sentido de rotação da elipse os valores dos campos obtidos anteriormente. Inicialmente, é obtido o ângulo (γ), que define o círculo na esfera de Poincaré (Figura 5), utilizando a Equação (3.4).

3.6.2 Método da componente linear adaptado

Neste método proposto, a linha fendida utilizada no modelo de Kraus, é substituída por um circuito de defasamento discreto. A substituição foi necessária tendo em vista que o sinal obtido nos terminais de saída da linha fendida é de natureza modulada e em baixa

frequência, enquanto que o sinal almejado possui características de sinais em alta frequência. A substituição foi realizada tendo como objetivo a verificação do comportamento do sinal recebido ao ser modificada a fase de recepção de forma intencional. A fase do sinal recebido é modificada com atrasos conhecidos, ao ser introduzido o circuito defasador (Nascimento, 2011). O circuito de atraso discreto que será utilizado é na prática, é formado por linhas de transmissão de diferentes comprimentos. Aqui serão utilizadas linhas de transmissão disponíveis no laboratório, linhas estas que já foram confeccionadas e testadas; para mais detalhes sobre as mesmas consultar a referência (Nascimento, 2011).

CAPÍTULO 4 – Antenas

Apresentação do capítulo

Neste capítulo serão apresentados, além de uma visão geral sobre as antenas de microfita, dois tipos de antenas Yagi: a clássica antena Yagi-Uda (YU) e a antena Quasi-Yagi (QY), uma derivação mais recente e impressa da primeira. Esta última tem sido muito utilizada em arranjos de antenas e sistemas de comunicação sem fio (Qian, Deal, Kaneda, & Itoh, 1998). Cada uma delas terá seus principais aspectos teóricos e de projeto analisados.

4.1 Antenas planares de microfita

Os estudos na área foram iniciados por Deschamps (1953), nos Estados Unidos da América, e quase na mesma época Gutton e Baissinot (1955) na França, de onde partiram as primeiras publicações sobre a antena de microfita. Porém, nenhuma publicação foi feita na literatura após o trabalho original de Deschamps em um período de 18 anos até que Byron (1970) propôs um radiador de fita condutora separada do plano de terra por um substrato dielétrico. Na sua configuração mais simples, a antena de microfita consiste em um patch radiante em um dos lados do substrato dielétrico, enquanto no outro lado existe um plano de terra (Capovilla, 2004). Essa geometria é mostrada na Figura 10.

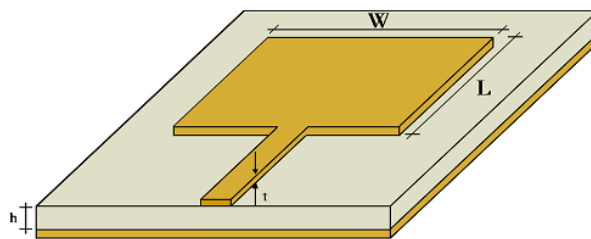


Figura 10 – Antena planar do tipo patch.

Teoricamente, uma antena patch pode assumir qualquer forma geométrica. Mas, convencionalmente são utilizadas as formas geométricas convencionais, como as retangulares, circulares e as do tipo gravata ou *bow-tie antennas*. O material condutor normalmente é o

cobre e em algumas aplicações em ondas milimétricas o ouro, devido a sua maior condutividade.

De acordo com Garg *et al*, 2001 as principais vantagens das antenas de microfita frente às outras antenas de microondas são:

- ^ Sustentação mecânica com pequeno peso e volume reduzido;
- Configuração de perfil plano fazendo com que possam ser adaptadas à superfície de montagem;
- Baixo custo de fabricação, diminuído pela produção em série;
- Facilmente construída com pequena espessura, o que não perturba a aerodinâmica de veículos aeroespaciais;
- Polarizações lineares ou circulares podem ser conseguidas, em alguns casos, pela simples troca da posição do ponto de alimentação;
- Na maioria dos casos não é necessária a confecção de cavidades externas;
- As antenas de microfita são compatíveis com projetos modulares, assim dispositivos de estado sólido podem ser conectados ou integrados diretamente na placa de substrato;
- As linhas de alimentação e circuitos de casamento podem ser fabricadas simultaneamente com a estrutura da antena.

Contudo, as antenas de microfita apresentam algumas desvantagens em relação as antenas convencionais de microondas, são elas:

- ^ Pequena largura de banda;
- ^ Perdas consideráveis, mesmo com baixo ganho;
- Possibilidade de excitação de ondas de superfície e conseqüente diminuição da eficiência;
- Radiações indesejáveis dos alimentadores, junções e possíveis circuitos de casamentos;
- Baixa capacidade de manuseio de potência, devido às próprias características da estrutura da microfita.

4.2 Antenas do tipo quasi-Yagi

Antenas planares são aquelas que podem ser fabricadas em um único plano, sendo tipicamente alimentadas por linhas de microfita, microlinha co-planar (Coplanar Stripline - CPS) ou guia de onda co-planar (Coplanar Waveguide - CPW). Elas apresentam várias vantagens sobre estruturas não-planares (Brianeze, 2008), dentre as quais:

- Menor tamanho, peso e conseqüentemente custo;
- Facilidade de conformação a diferentes contornos e formas;
- Facilidade de montagem e construção de arranjos.

A antena QY é uma antena planar que se baseia nos conceitos bem conhecidos da antena YU, mas de uma forma que contorna as limitações dessa estrutura clássica. Ela foi por acaso descoberta em 1997, na tentativa de substituir uma antena de fenda estreitada por um dipolo impresso (Juan, Guang, Lin, & Demin, 2007). Descobriu-se também que o refletor podia ser substituído pelo plano de terra truncado da antena. A antena resultante foi então chamada de quasi-Yagi, devido a suas semelhanças com a clássica antena YU.

No primeiro relato sobre essa nova estrutura foram apresentados uma largura de banda em perda de retorno de 11% e um ganho de 7 dB. Atualmente a antena QY é muito usada em arranjos para diversas aplicações, geralmente operando em frequências acima de 1 GHz.

4.2.1 Aspectos teóricos

Uma antena QY tem a mesma estrutura básica de uma antena YU, ou seja, é constituída por um arranjo de dipolos com um driver, diretores e refletores. Assim, como na antena YU, somente o driver é alimentado, enquanto os demais são elementos parasitas excitados por acoplamento mútuo. O funcionamento da antena QY, portanto, baseia-se na propagação de ondas de superfície no substrato, o que geralmente é um problema em outras antenas planares. A grande diferença da antena QY em relação à YU é que o refletor é substituído pelo plano de terra truncado, sob o substrato, atuando como um refletor ideal.

O comprimento do driver é o principal responsável por centrar a largura de banda da antena em uma frequência desejada. Ele é alimentado através de um balun impresso (Deal, Kaneda, Sor, Qian, & Itoh), dispositivo que tem a função de fazer a conversão de uma linha de transmissão desbalanceada para uma balanceada. Este balun especificamente apresenta uma grande largura de banda, o que é um dos principais fatores que garantem a banda larga da

antena QY. Os diretores e o plano de terra truncado têm as funções de direcionar o padrão de radiação na direção *end-fire* e refinar o casamento de impedância da antenna.

Um aspecto da antenna do tipo QY que é de fundamental interesse no projeto aqui desenvolvido é a facilidade na alimentação da mesma, que é feita sem a necessidade de um circuito auxiliar, uma vez que a mesma já possui uma estrutura para tal.

O esquema básica de uma antenna QY com seus principais componentes é apresentado na Figura 11.

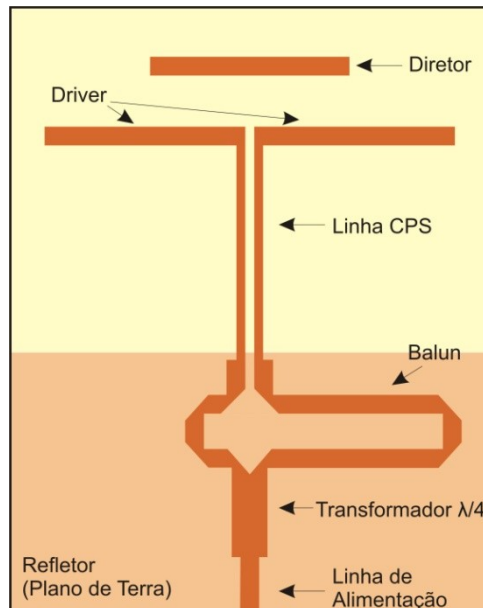


Figura 11 – Ilustração de uma antena quasi-Yagi.

4.3 Conclusão

O conhecimento dos fundamentos básicos que constituem uma antena é de suma importância para que a análise dos dados e a extração de informações sejam adequadamente realizadas.

Diversos tipos de antenas foram analisados em busca de um modelo que suprisse todas as necessidades do projeto aqui em desenvolvimento. Posteriormente, será mostrado que o modelo final escolhido utiliza como circuito de alimentação uma estrutura parcial de uma antena do tipo quasi-Yagi.

CAPÍTULO 5 – Concepção do projeto

Apresentação do capítulo

Uma antena é um dispositivo utilizado para radiar ou receber ondas de rádio, ou seja, é o dispositivo de transição entre o espaço livre e uma linha de transmissão. Além de possibilitar a transmissão ou recepção de energia eletromagnética, geralmente, também se requer que a antena otimize ou acentue a radiação de energia em algumas direções e as suprima em outras (Sadiku, 2004).

Assim, aqui serão apresentados alguns resultados obtidos da antena quasi-Yagi após várias tentativas de otimizações.

5.1 Fluxograma do projeto

Na Figura 12 é apresentado um fluxograma que serve como um rápido guia de projeto para *design* de antenas quasi-Yagi. Cada etapa deve ser realizada com cuidado e coerência para garantir um bom funcionamento do projeto final.

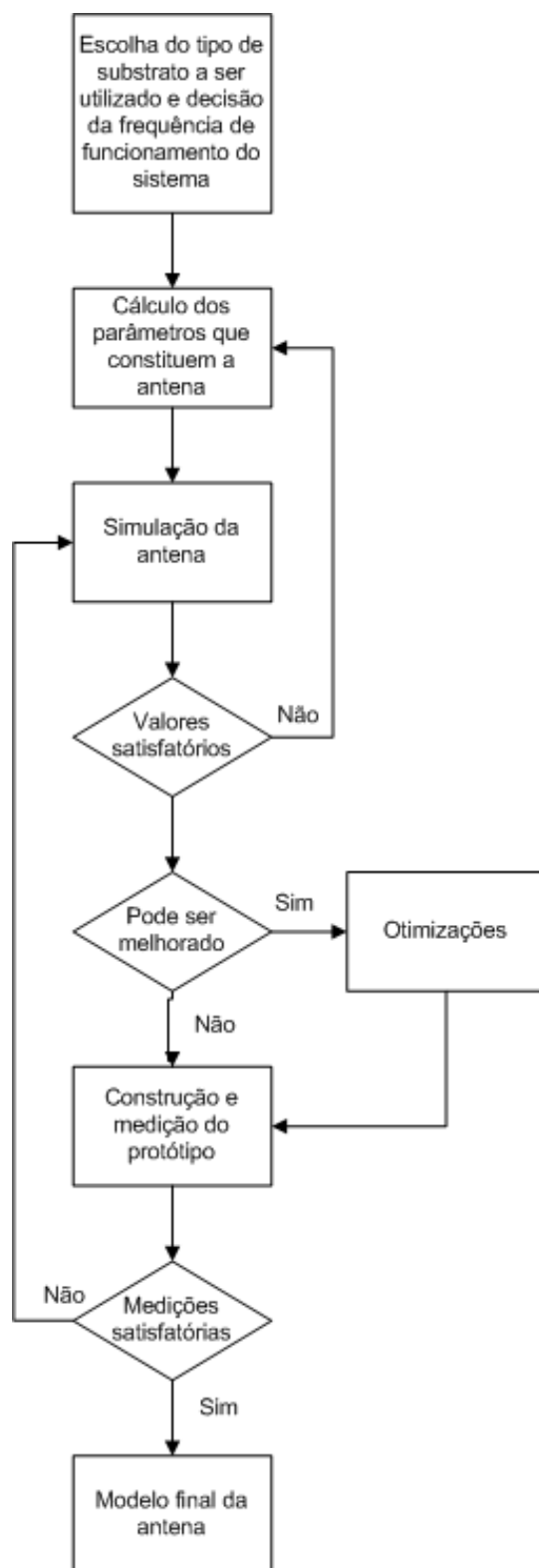


Figura 12 – Fluxograma para *design* de antenas.

Por meio da observação do fluxograma apresenta na Figura 12, tem-se uma visão global do processo de projeto e otimização da antena quasi-Yagi que aqui será apresentado.

5.2 Simulação

Como já foi referenciado, o software a usar neste projeto será o CST MICROWAVE STUDIO. Assim, será apresentada uma breve explicação do método utilizado pelo software.

O CST MWS utiliza o método FIT (Finite Integration Technique) como simulador eletromagnético. Este método numérico utiliza uma representação discreta das Equações de Maxwell de forma a resolvê-las a partir da conservação de carga e energia. Desta forma consegue obter-se uma convergência bastante estável (Rodrigues, 2010).

5.3 Substrato utilizado

Certamente, a permissividade elétrica do material a ser utilizado como substrato de uma antena de microfita é o parâmetro físico de maior influência em suas frequências de ressonância. Atualmente, uma variedade muito grande desses materiais para trabalhar na faixa de microondas, com baixas perdas e elevadas taxas de homogeneidade e isotropia, encontram-se à disposição dos projetistas. Em geral, o valor nominal da permissividade fornecida pelo fabricante não é exato o suficiente para o projeto de antenas com espessuras muito finas, necessitando quase sempre de um segundo protótipo para ajustar a antena à frequência desejada.

Neste trabalho, o substrato escolhido para a construção das antenas foi o FR-4, popularmente conhecido como fibra de vidro, foi escolhido como substrato, com $\epsilon_r = 4,3$ e espessura de 1,6 mm e $\tan\delta = 0,018$, principalmente devido a sua fácil aquisição e baixo custo.

5.4 Projeto de uma antena quasi-Yagi

Observando a Figura 11, observa-se que uma antena deste tipo é formada pelos seguintes componentes: linha de alimentação, transformados de $\lambda/4$, *balun*, linhas CPS (*stripline coplanar*), elemento refletor (plano de terra truncado), o *driver* (dipolo) e o diretor. O processo de otimização para cada componente é descrito a seguir. A antena aqui proposta será projetada para operar na faixa de 2.4GHz.

5.4.1 Linha de microfita

A impedância característica da linha de microfita padronizado para o casamento de impedância em grande parte dos sistemas é definida como $Z_0 = 50 \Omega$.

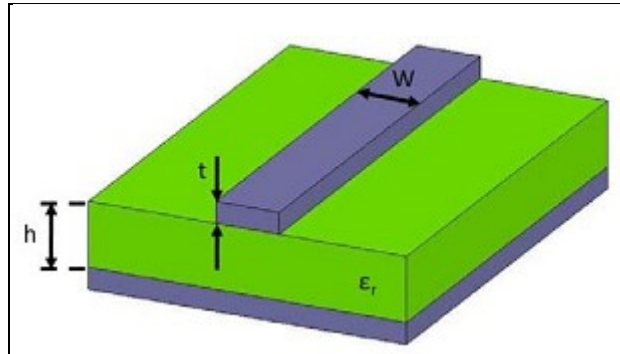


Figura 13 – Representação de uma linha de microfita.

Na Figura 13 pode-se observar a representação dos principais parâmetros de uma linha de microfita, onde:

- W é a largura da linha.
- h é a espessura do substrato.
- t é a espessura da metalização (linha e terra).
- ϵ_r é a constante dielétrica do substrato.

Utilizando a Equação (5.1), um valor de $w = 2.86 \text{ mm}$ é encontrado para a largura da linha de microfita.

$$\frac{w}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[\ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right] \right\} \quad (5.1)$$

Onde,

$$A = \frac{Z_0}{60} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{1/2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0,23 + \frac{0,11}{\epsilon_r} \right) \quad (5.2)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0(\epsilon_r)^{1/2}} \quad (5.3)$$

Para o cálculo do comprimento de onda utiliza-se a Equação (5.4), que para uma frequência de operação de 2.4GHz obteve-se um valor de $\lambda_0 = 12.5mm$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f}, \quad c = 3 \times 10^8 m/s \quad (5.4)$$

Para o comprimento de onda guiado no substrato, fornecido pela Equação (5.5), obteve-se um valor de $\lambda_g = 66.16 mm$.

$$\lambda_g = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_{eff}}} \cong \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (5.5)$$

onde ϵ_{eff} é a constante dielétrica efetiva do substrato dada pela Equação (5.6).

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w}\right)^{-1/2} \quad (5.6)$$

5.4.2 Divisor de potência

No projeto aqui apresentado, o divisor de potência foi utilizado como elo entre a linha de microfita e a CPS, necessário para alimentar a antena *quasi-Yagi*. Um transformador de $\lambda/4$ é usado para o casamento das impedâncias.

Realizando o casamento entre os 50Ω da linha de alimentação com os 25Ω das duas linhas posteriores em paralelo, temos uma impedância característica para a linha do transformador de $35,35 \Omega$. Para o cálculo da largura da linha do transformador utilizou-se a Equação (5.7), obtendo-se um valor de $\omega_t = 5,11 mm$ com comprimento de $l_t = 16,75 mm$.

$$\frac{w}{h} = \frac{8 \exp(A)}{\exp(2A) - 2} \quad (5.7)$$

Feito isso, existe a necessidade de se defasar uma das linhas em 180° , ou seja, uma das linhas deve ter um comprimento $\lambda_g/2$ maior que a outra, para se conseguir um acoplamento de modo ímpar na linha de microfita acoplada, sendo essa estrutura similar a um balun uniplanar (James, Hall, & Wood, 1981).

5.4.3 Balun

Uma defasagem de 180° deve ser introduzida entre as duas linhas de microfita na saída do divisor de potência para realizar uma alimentação balanceada para a linha de transmissão coplanar, ou seja, uma das linhas deve ter um comprimento $\lambda_g/2$ maior que a outra, para se conseguir um acoplamento de modo ímpar na linha de microfita acoplada. Essa estrutura similar a um *balun* uniplanar. O acoplamento de modo ímpar pode ser transmitido facilmente ao *driver* através de uma linha CPS, após o plano de terra truncado como refletor (Costa, 2006).

5.4.4 Driver

A largura do *driver* é de $\omega = 2.86 \text{ mm}$, mantendo o mesmo valor da linha de alimentação. O *driver* deve possuir comprimento inicial de $\lambda_g = 66.16 \text{ mm}$, para o acoplamento com a linha CPS em modo ímpar. As distâncias entre o *driver* e o plano de terra truncado e entre o *driver* e o diretor foram inicialmente de $\lambda_g/2 = 33,08 \text{ mm}$ e de $\lambda_g/8 = 8.27 \text{ mm}$, respectivamente.

5.4.5 Diretor

O comprimento do diretor é $\lambda_g/2 = 33,08 \text{ mm}$ e a largura é de $\omega = 2.86 \text{ mm}$. O diretor e o refletor possuem tanto a função de direcionar o padrão de irradiação, quanto de refinar o casamento de impedâncias da antena.

5.5 Características da antena

Um procedimento de medida simples para a medida da largura de faixa de operação, ou simplesmente, largura de banda de uma antena é definir uma banda de frequência na qual o

VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) ou coeficiente de onda estacionária, é menor que um determinado valor especificado, usualmente 2:1. Quando se utiliza um critério de radiação, costuma-se definir a largura de faixa de operação de um radiador entre os pontos de frequência nas quais as potências radiadas são metade da máxima potência radiada (Ribeiro & Kretly, 2004).

Assim, para garantir a funcionalidade do projeto de uma antena, o critério para análise da largura de banda adotado foi o valor usual de VSWR 2:1 ou $VSWR \leq 2$, pois nesse intervalo está garantido que pelo menos 90% da potência de entrada da antena será radiada. Essa consideração é equivalente a perda de retorno, ou seja, o parâmetro de espalhamento $S_{11} \leq -10$ dB (Salonen et al, 1999), consideração essa que será utilizada para análise das antenas simuladas e posteriormente fabricadas. A largura de banda é calculada a partir da Equação (5.8), em porcentagem.

$$BW(\%) = 100 \frac{f_2 - f_1}{f_0} \quad (5.8)$$

Onde,

BW = Largura de banda (*Bandwidth*);

f_2 = Máxima frequência de operação no qual $S_{11} \leq -10$ dB;

f_1 = Mínima frequência de operação na qual $S_{11} \leq -10$ dB;

f_0 = Frequência central de operação.

5.6 Dimensões da antena quasi-Yagi

A partir do modelo apresentado na Figura 14 e dos parâmetros da antena calculados anteriormente, pode-se resumir as dimensões na Tabela 3.

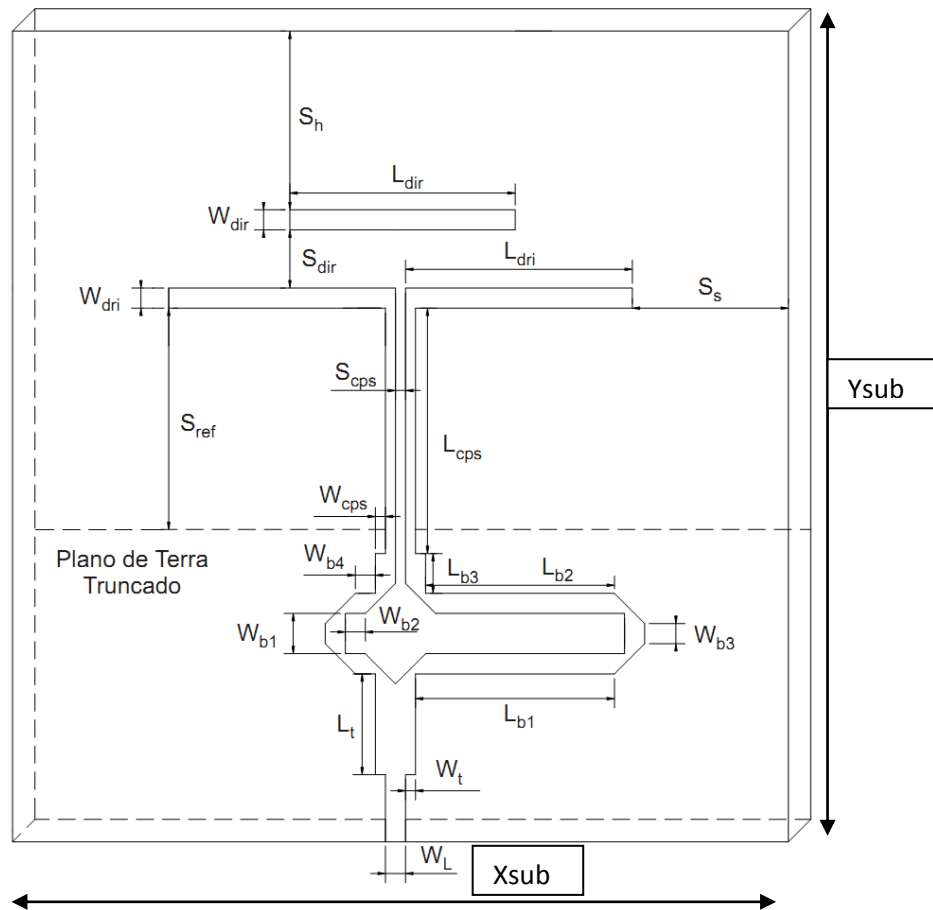


Figura 14 – Dimensões da antena quasi-Yagi .

Tabela 3 – Valores dos parâmetros do projeto da antena QY.

Parâmetro	Valor Teórico
$W_{dri} = W_{dir} = W_L$	2,86
W_t	1,27
W_{cps}	1,35
W_{b1}	5,40
$W_{b2} = W_{b3} = W_{b4}$	2,70
L_{dri}	30,50
L_{dir}	30,30
L_{b1}	26,75
L_{b2}	25,40
L_{b3}	5,35
L_{cps}	32,70
L_t	13,55
S_{dir}	7,80

S_{ref}	29, 50
S_{cps}	1, 35
S_h	24
S_s	21
X_{sub}	100
Y_{sub}	100

5.7 Modelo Simulado

Partindo dos valores calculados anteriormente e utilizando como software de simulação o CST Microwave Studio®, obteve-se o modelo apresentado na Figura 15.

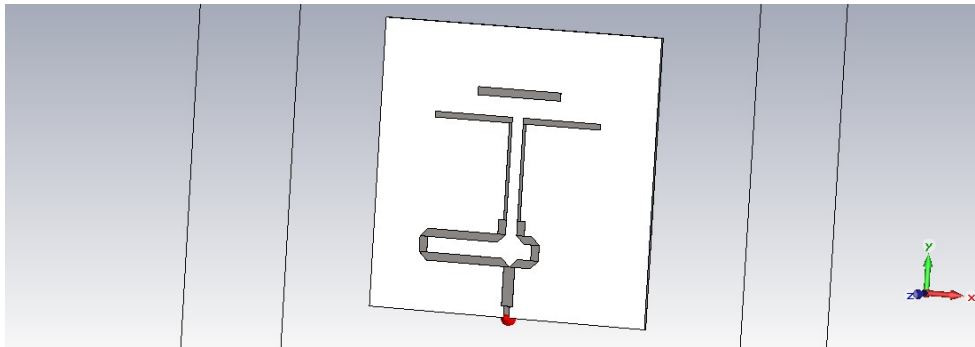


Figura 15 – Primeiro modelo simulado.

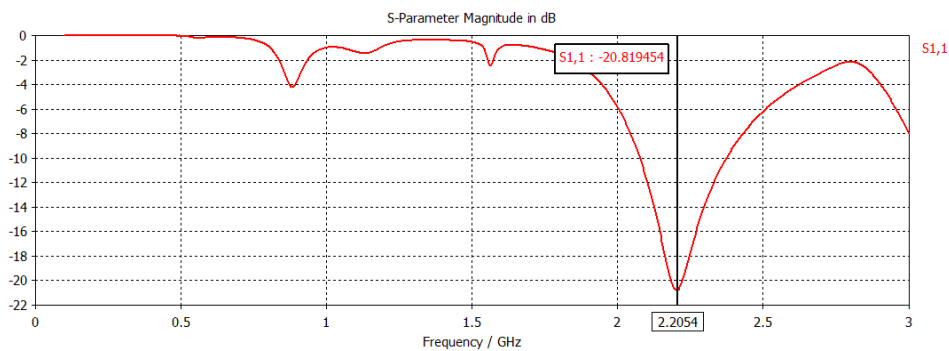


Figura 16 – Parâmetro $S_{1,1}$ do primeiro modelo simulado.

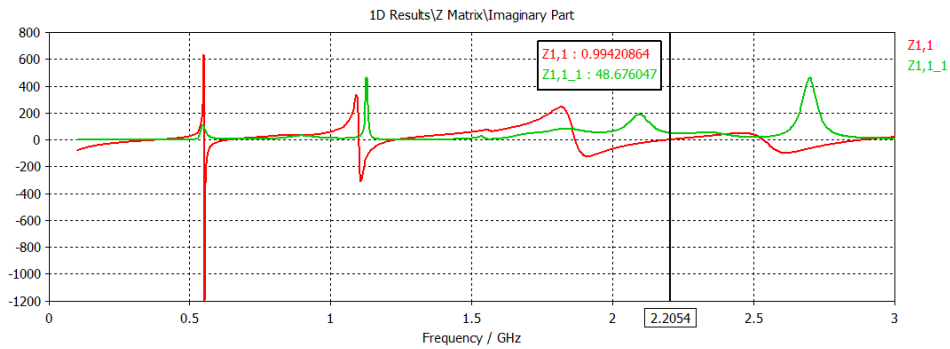


Figura 17 – Impedância do primeiro modelo simulado

Através da análise da Figura 16 e Figura 17 percebe-se a antenna projetada apresenta um bom funcionamento na frequência de 2.2GHz, com um bom valor do $S_{1,1}$ e valores de impedâncias bem próximas ao ideal, que é de 50Ω para a parte real e parte imaginária nula.

5.8 Modelo do arranjo

Para a aplicação a qual esse trabalho é proposto, é necessário um arranjo formado por duas antenas em quadratura, atendendo as necessidades para detecção de polarização. Assim, partiu-se do modelo apresentado acima apenas duplicando o número de antenas e fazendo com que um driver de uma das antenas fosse transladado à 90° em relação ao outro, para tal foi necessário a criação de um caminho alternativa para a manter comprimento de onda, caminho este, que pode ser observado na

Figura 18, entre a linha que liga o balun até o driver. Buscando uma melhor resposta do arranjo na faixa de 2.4GHz, a antenna foi submetida a sucessivas séries de otimizações. Assim, foi obtido o modelo apresentado na

Figura 18.

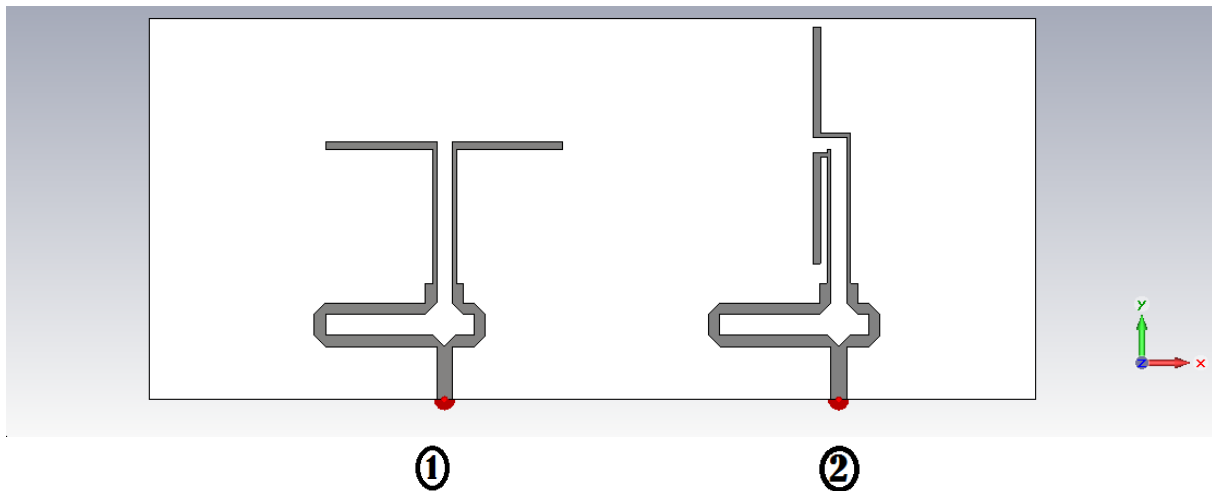


Figura 18 – Modelo final da antena.

Observando a antena mostrada na

Figura 18, percebe-se que a mesma não apresenta diretores dispostos em paralelo aos drivers, uma vez que foi observado que as respostas ($S_{1,1}$ e $S_{2,2}$) do arranjo proposto apresentava um resultado mais satisfatório na ausência dos diretores. Portanto, optou-se pela retirada dos mesmos. Ao observar o modelo final da antena percebe-se que a mesma não se trata mais de uma antena do tipo quasi-Yagi uma vez que sua estrutura foi modificada. Pode-se dizer que o modelo de antena final trata-se de um dipolo simples que é alimentado utilizando um sistema auxiliar para tal.

Observar que todos os chanfros são a 45° e a espessura de cobre utilizado para as trilhas foi de 0,035mm. A partir do modelo final apresentado na

Figura 18, pode-se resumir as novas dimensões na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores finais dos parâmetros do arranjo de antenas da Figura 18.

Parâmetro	Valor Teórico	Valor Final
W_{dri}	2,86	2,00
W_t	1,27	-
W_{cps}	1,35	1,80
W_{b1}	5,40	5,40
$W_{b2} = W_{b4}$	2,70	2,80
W_{b3}	2,70	5,40
L_{dri}	30,50	28,00
L_{dir}	30,30	-

L_{b1}	26,75	28,20
L_{b2}	25,40	25,40
L_{b3}	5,35	5,00
L_{cps}	32,70	34,00
L_t	13,55	13,50
S_{dir}	7,80	-
S_{ref}	29,50	33,86
S_{cps}	1,35	4,00
S_h	24,00	-
S_s	21,00	-
X_{sub}	100,00	225,00
Y_{sub}	100,00	96,75
Distância entre os centros das antenas	-	91,45

Os parâmetros cujos valores são representados por “-” são aqueles que constituíam alguma estrutura do modelo da estrutura da antena original, mas que foram retirados na concepção do modelo final.

Na Figura 19 é apresentado a resposta dos Parâmetros $S_{1,1}$ e $S_{2,2}$, do modelo final. Nesta, pode-se observar que o arranjo apresenta uma boa resposta para a frequência desejada de 2.4GHz, como bandas de frequência a -10dB bem satisfatórias.

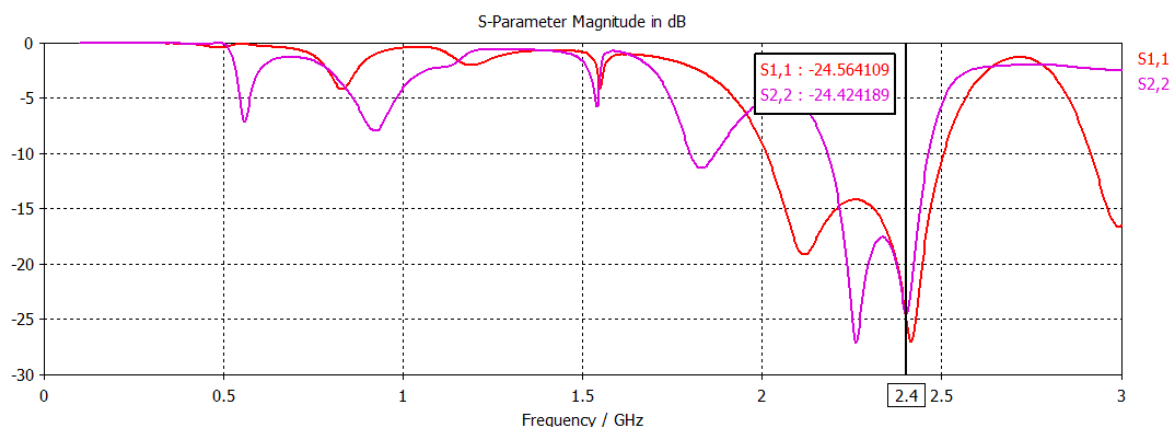


Figura 19 – Parâmetros $S_{1,1}$ e $S_{2,2}$ do arranjo final de antenas simulado.

Na Figura 20 é apresentada a curva de impedância característica para cada uma das duas antenas que constituem o modelo final do arranjo, resultados esses também satisfatórios uma vez que estão bem próximos do valor ideal, 50Ω.

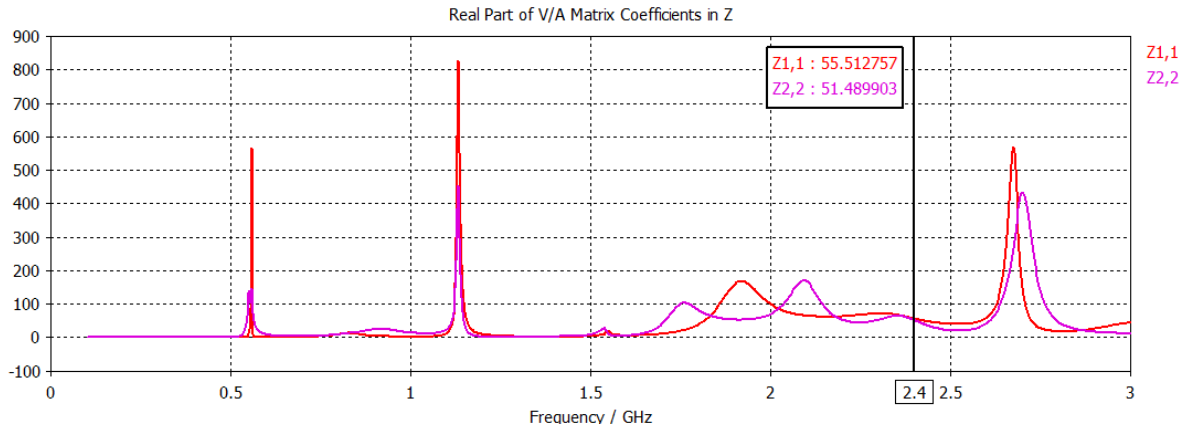


Figura 20 – Impedância apresentada pelas antenas em 2.4GHz.

Na Figura 21 são apresentados os diagramas de radiação das duas antenas que constituem o arranjo proposto simulado.

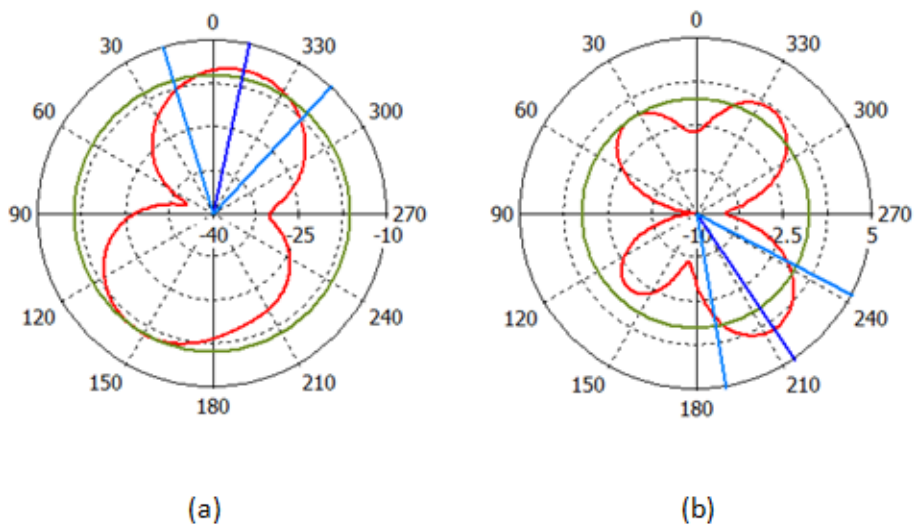


Figura 21 – Diagrama de radiação 1D: (a)Antena 1 e (b)Antena 2.

5.9 Modelo fabricado

Para validar os resultados de simulação, foi construído um protótipo do modelo final do arranjo que é apresentado na

Figura 18. Na Figura 22 é apresentado o protótipo construído.

A antena foi construída pelo processo de laser impresso, onde o desenho da antena com as dimensões otimizadas foi impresso a laser em papel tipo manteiga, sendo transferido para a placa utilizando um fresa térmica. Posteriormente, a placa com o *layout* impresso foi corroída com percloroeto de ferro. Por último, foram soldados os dois conectores do tipo SMA às linhas de alimentação das antenas.

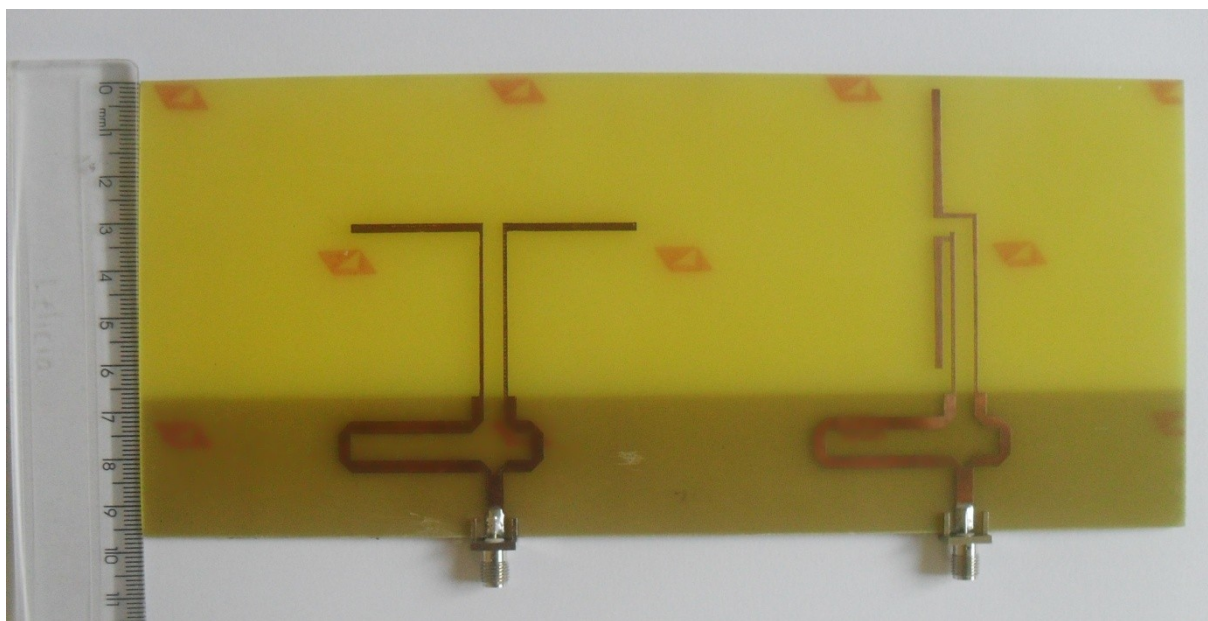


Figura 22 – Modelo final fabricado.

A vista posterior da antena que contém o plano de terra truncado que permite um correto funcionamento da estrutura de alimentação das antenas é apresentado na Figura 23.

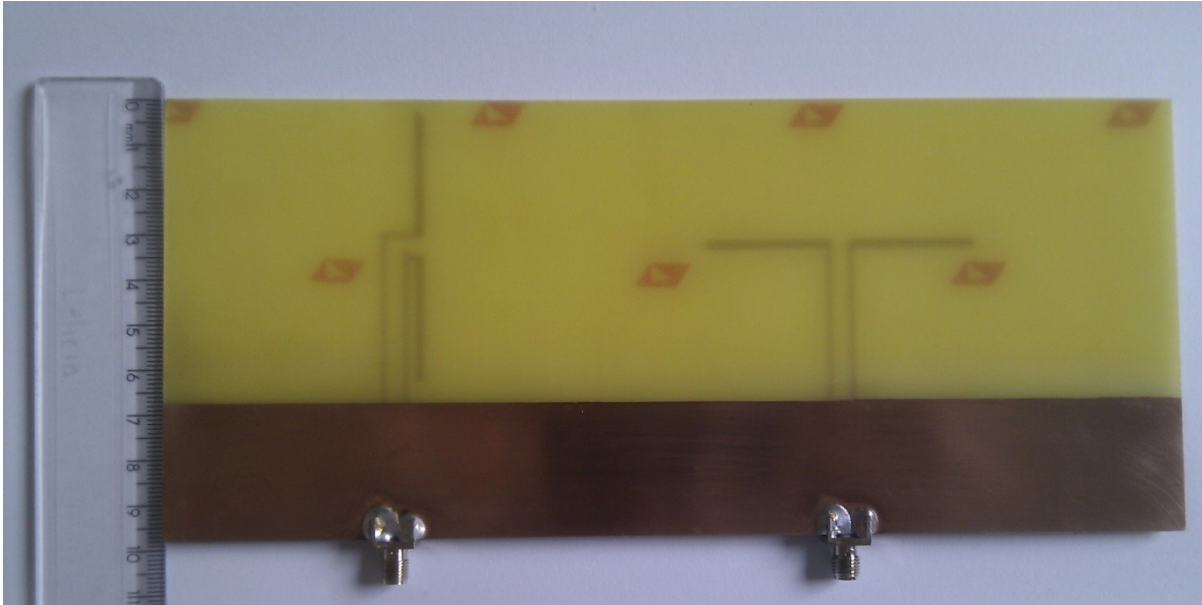


Figura 23 – Vista posterior do modelo fabricado (plano de terra truncado).

Na Figura 25 é apresentada a resposta dos Parâmetros $S_{1,1}$ e $S_{2,2}$ do modelo final. Nesta, pode-se observar que o arranjo apresenta uma boa resposta para a frequência desejada de 2.4GHz, como bandas de frequência a -10dB bem satisfatórias e bem semelhantes as respostas obtidas na simulação (Figura 19).

Para a realização das medições foi utilizado um Analisador de Rede da *Agilent Technologies*[®] (E5062A), apresentado na Figura 24.



Figura 24 – Analisador de Rede

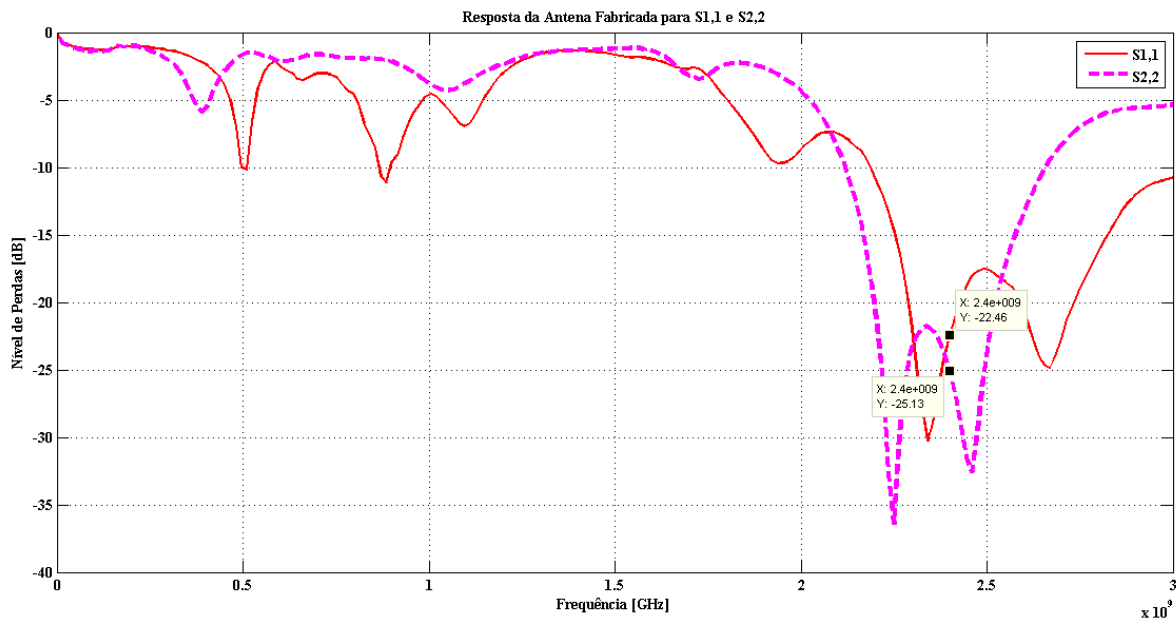
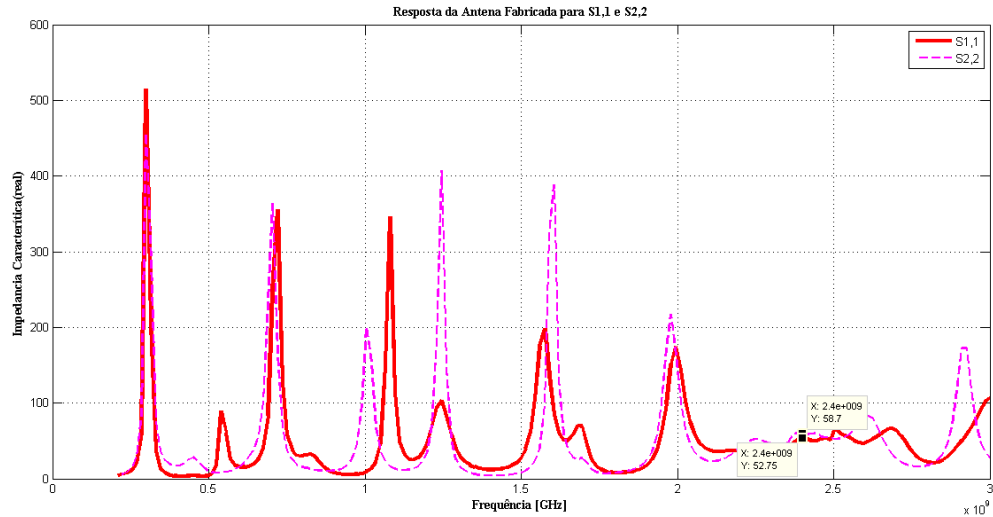
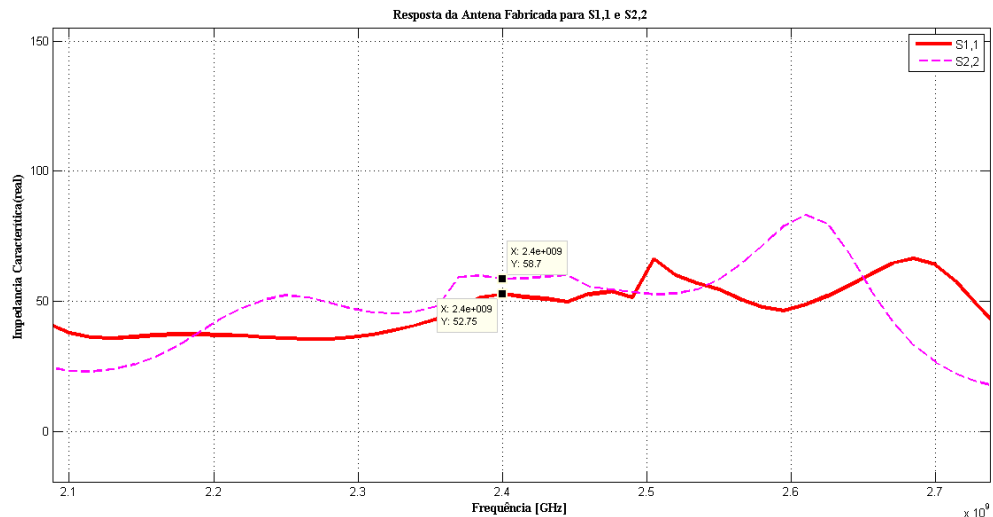


Figura 25 – Parâmetros S_{1,1} e S_{2,2} da antena fabricada.

Na Figura 26 é apresentada a curva de impedância característica para cada uma das duas antenas que constituem resultados esses satisfatórios uma vez que estão bem próximos do valor ideal, 50Ω e bem próximo daqueles obtidos na simulação.



(a)



(b)

Figura 26 – (a)Impedância característica das antenas em 2.4GHz (b)Zoom.

Para a obtenção do diagrama de cada antena separadamente utilizou-se uma estrutura girante e uma antena do tipo Log-periódica, ambas dispostas no LEMA(Laboratório de Eletromagnetismo e Microondas Aplicados). Na Figura 27 é apresentado o padrão de radiação obtido com a antena projetada.

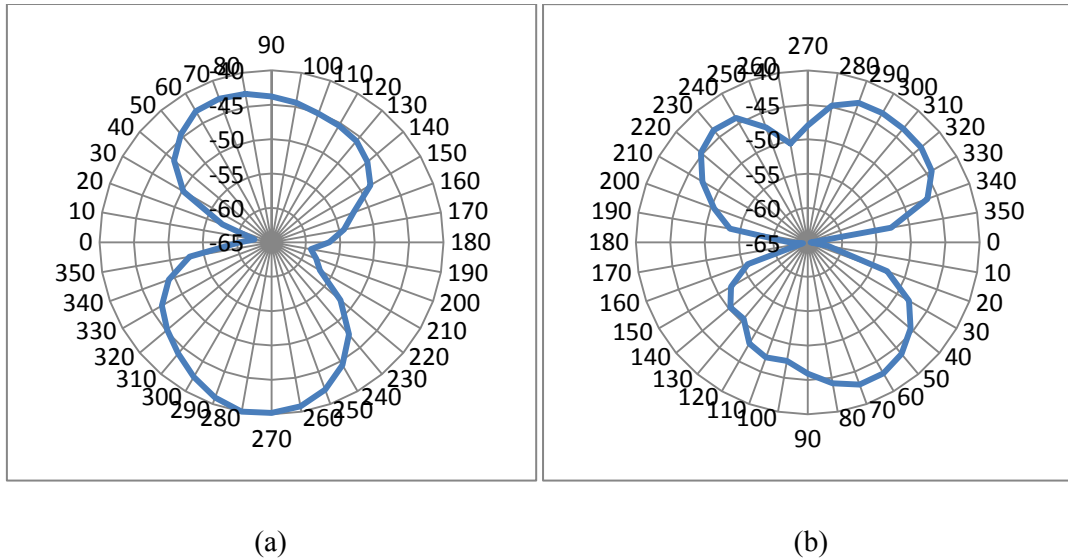


Figura 27 – Diagrama de radiação 1D (Plano E) : (a)Antena 1 e (b)Antena 2.

Nota-se claramente que cada antena é linearmente polarizada, com a predominância do campo elétrico paralelo ao driver.

5.10 Conclusão

Neste capítulo, foram apresentadas todas as etapas seguidas no processo de concepção de uma antena. As regras de projeto, o funcionamento do arranjo no processo de simulação, e sua construção também foram apresentadas, sendo discutidos os resultados fruto de medições e os simulados para a perda de retorno e para o diagrama de radiação. Como pôde ser observado através da análise desses parâmetros o arranjo proposto e fabricado atingiu de maneira satisfatória as necessidades para as quais foi projetado.

Medidas do padrão de irradiação também foram realizados e seus diagramas obtiveram resultados concordantes com aqueles fornecidos na simulação.

CAPÍTULO 6 – Polarização

Apresentação do capítulo

Aqui será apresentado o procedimento que foi seguido para a obtenção dos parâmetros que caracterizam a polarização de uma antena.

6.1 Introdução

Neste capítulo, são apresentados os resultados dos experimentos relativos ao estudo da detecção da polarização eletromagnética utilizando o modelo de arranjo de antenas aqui projetado e fabricado.

Para a medição da razão axial utilizou-se a antena proposta aqui no trabalho como receptora e uma antena Log-periódica disposta no LEMA na transmissão.

Para se determinar o tipo de polarização de uma antena é necessário a utilização de uma antena teste, chamada *sampling* (teste), onde esta deve possuir polarização linear. Aqui será utilizada como antena teste uma antena do tipo Log-periódica.

6.2 Realização do experimento

Inicialmente, para a verificação da resposta da fase da polarização da onda EM, foi realizada uma medição utilizando a antena projetada na recepção e a Log-periódica na transmissão. A idéia era a utilizar outros tipos de antenas na transmissão, como uma antena com polarização circular, por exemplo, mas não foi possível uma vez que não se tinha disponível no laboratório uma antena confiável com essa característica.

Para a montagem de todas as configurações de montagem, as antenas foram separadas por uma distância de 150,00cm (cerca de $9,1\lambda$) garantindo assim o funcionamento na região de campos distantes, e colocadas a uma distância de 115,00cm (cerca de $6,9\lambda$) do plano de terra (o chão). Tomando o cuidado de alinhar o centro da antena de microfita com o centro da antena Log-periódica.

Para a medição aqui proposta foi utilizado o analisador de espectro N1996A da *Agilent Technologies*[®], apresentado na Figura 28, disponível no laboratório.



Figura 28 – Analisador de espectro (Agilent Technologies®).

Na primeira montagem a antena transmissora foi colocada para transmitir na vertical, enquanto que a antena receptora foi disposta de forma perpendicular à bancada, de modo que o seu plano de terra truncado ficasse virado na direção da antena transmissora, conforme apresentado na Figura 29.

As medições são realizadas com cada uma das antenas separadamente. Na primeira etapa apenas a antena 1 no arranjo permanece ligada ao analisador e posteriormente esta é desligada e então a antena 2 é conectada.



Figura 29 – Esquema da montagem para a realização das medições.

Na segunda etapa a antena transmissora foi colocada em paralelo ao plano da terra. E posteriormente, rotacionada de 45° e 135° em relação ao plano da terra. Mantendo constante a posição da antena receptora ligada ao analisador de espectro.

Os resultados das medições após todo o processo são apresentados na Tabela 5 assim como a razão axial das mesmas.

Tabela 5 – Valores obtidos nas medições.

Tx(Log-Periódica) Posição em relação ao plano da terra	Rx (Arranjo projetado)		Razão Axial
	Valores obtidos em dBm		
	Antena 1	Antena 2	
Horizontal(0°)	-50,61	-59,00	1,165778
45°	-55,27	-51,58	1,071539
135°	-53,38	-57,69	1,080742
Vertical(90°)	-59,98	-53,70	1,116946

Observando os valores obtidos durante as medições e dispostos na Tabela 5, percebe-se uma boa resposta do sistema, uma vez que, os valores obtidos para a razão axial estão bem próximos dos valores teóricos (valor unitário).

6.3 Conclusão

Como previsto pela teoria apresentada no Capítulo 3, os valores da razão axial medida na primeira parte do experimento, apresentada na Tabela 5, foram bem próximos aos valores esperados teoricamente.

Foram testados os casos particulares da polarização eletromagnética, com o objetivo de comprovar a técnica exposta.

CAPÍTULO 7 – Considerações Finais

7.1 Conclusões

Este trabalho teve por objetivo projetar e avaliar o desempenho de um sistema experimental para geração de ondas eletromagnéticas polarizadas, na banda de frequências de microondas

Inicialmente partiu-se dos conceitos básicos relacionados à onda eletromagnética, à elipse de polarização, aos parâmetros que caracterizam essa elipse e às informações que podem ser extraídas a partir da mesma.

Objetivou também realizar um estudo das antenas planares especialmente as antenas do tipo dipolo simples e quasi-Yagi. Ao final, optou-se por um modelo adaptado da antena quasi-Yagi, dando origem a um arranjo formado por duas dessas antenas em quadratura.

A sua idealização foi baseada em otimizações para o atendimento de requisitos eletromagnéticos e foi feita a parte da simulação computacional com a estimação de vários de seus parâmetros. A antena proposta satisfaz às especificações de projeto e apresentou um funcionamento muito satisfatório na sua utilização, funcionamento este que foi possível através de um estudo experimental em laboratório com a coleta de dados de medições, para fins de comparação dos resultados obtidos nas etapas anteriores.

As comparações entre as previsões obtidas pelas simulações e os experimentos foram satisfatórias.

Embora o trabalho não apresente nenhuma simulação prática acerca da polarização, ele contém análises sobre a polarização de ondas eletromagnéticas e sobre os modelos utilizados nessa análise. Como exemplos são analisados os principais pontos da Esfera de Poincaré.

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como continuação deste trabalho sugere-se a técnica de fabricação do modelo desenvolvido utilizando o método da prototipagem, utilizando um fresa para a fabricação de circuito impresso.

Poder-se-á realizar novos estudos visando à maximização das características da antena proposta buscando principalmente a redução da área construída e aumento da banda passante utilizando o critério de -10dB.

Sugere-se também a verificação do método apresentado e proposto por Jobson Nascimento (Nascimento, 2011), buscando uma melhor caracterização do mesmo.

Além destes, outro possível trabalho futuro, este sim que já esta sendo posto em prática, será a confecção de um guia para o Laboratório de Antenas da UFCG visando à construção de experimento baseado em um sistema para a verificação da polarização em antenas. Na composição do experimento, a antena aqui proposta será utilizada tanto na transmissão quanto na recepção, eliminando assim o uso da antena log-periódica.

Bibliografia

- Balanis, C. (1997). *Antenna Theory: Analysis and design* . (2ed). John Wiley & Sons.
- Batista, M. L. (2010). *Concepção de uma tag RFID UHF passiva para a localização de pessoas*. Grenoble, França: Relatório de Estágio.
- Brianeze, J. (2008). Um Novo Tipo de Antena para Radar Aerotransportado: Yagi Tridimensional . Campinas.
- Capovilla, C. E. (2004). *Antenas planares aplicadas às comunicações móveis de últimas gerações utilizando elementos Quasi-Yagi*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas.
- Costa, F. C. (2006). Uma nova proposta de antenas Quasi-Yagi banda larga para comunicações sem fio. *Dissertação de Mestrado* . Natal.
- Deal, W. R., Kaneda, N., Sor, J., Qian, Y., & Itoh, T. (s.d.). A New Quasi-Yagi Antenna for Planar Active Antenna Arrays. *vol. 48 , 6 ed.*, pp. 910-917. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.
- Garg, R., Bhartia, P., Bahl, I., & Ittipiboon, A. (2001). *Microstrip Antenna Design Handbook*. Artech House.
- Grajek, P. R., Schoenlinner, B., & Rebeiz, G. M. (2004). A 24-GHz High-Gain Yagi–Uda Antenna Array. *vol. 52* , pp. 1257-1261. IEEE Transactions on Antennas and Propagation.
- Hellmann, M. (2001). *SAR Polarimetry tutorial*. (University of Technology) Consulté le 07 03, 2011, sur http://www.dpi.inpe.br/cursos/ser410/Basic_SAR_Polarimetric_and_Calibration_Tutorial.pdf
- IEEE. (1993). *Standard definitions of Terms for Antennas 145*.
- IEEE. (1979). *Standard Test Procedures for Antennas 149*.
- James, J. R., Hall, P. S., & Wood, C. (1981). *Microstrip Antenna - Theory and Design*. Peter Peregrinus.
- Juan, L., Guang, F., Lin, Y., & Demin, F. (2007). Optimization and Application of the Yagi-Uda Antenna for Meteor Burst Communication. pp. 669-672. IEEE 2007 International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies For Wireless Communications.
- Kraus, J. D. (1950). *Antennas*. McGraw – Hill book Company.
- Kuwahara, Y. (2005). Multiobjective Optimization Design of Yagi–Uda Antenna. *vol. 53* , pp. 1984-1992. IEEE Transactions on Antennas and Propagation.
- Machado, A. P. (2008). *Polarização de Ondas Eletromagnéticas*. Taguatinga – DF .
- Modaresi, M. (2005). Design and Fabrication of a High-gain Microstrip-fed Yagi-Uda Antenna. *Dissertação de Mestrado* . Stockholm: Royal Institute of Technology .

Nascimento, J. d. (2011). *Deteminação da polarização da onda eletromagnética de fontes desconhecidas pelo método da componente linear*. Campina Grande: Dissertação (Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande.

Qian, Y., Deal, W. R., Kaneda, N., & Itoh, T. (1998). *Microstrip fed quasi-Yagi antenna with broadband characteristics* (Vol. 34). Electron Lett.

Ribeiro, A. S., & Kretly, L. C. (2004). *Projeto de Circuitos Chaveadores com Diodos PIN para Antenas Quasi-Yagi Ativas Aplicados às Comunicações Móveis*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Departamento de Microondas e Óptica, DMO-FEEC-UNICAMP.

Rodrigues, J. F. (2010). ESTUDO COMPARATIVO, REALIZAÇÃO, TESTE E SIMULAÇÃO DE DUAS ANTENAS WI-FI CONSTITUÍDAS POR GUIAS DE ONDA COM FENDAS. (Dissertação para obtenção do Grau de Mestre), Universidade Técnica de Lisboa.

Sadiku, M. N. (2004). *Elementos de eletromagnetismo* (éd. 3). Porto Alegre: Bookman.

Salonen et al, P. (1999). The Third International Symposium. *A small planar inverted-f antenna for wearable applications* , pp. 95–100.

Stutzman, W. L. (1992). *Polarization in Eletromagnetic Systems*. Boston: Artech House.

Thiele, G. A. (1969). Analysis of Yagi-Uda-Type Antennas. *vol. Ap-17* , pp. 24-31. IEEE Transactions on Antennas and Propagation.

Uda, S. (1926). Wireless Beam of Short Electric Waves. pp.273-282. Japão: J.IEE.

Yagi, H. (1928). Beam Transmission of Ultra Short Waves. *vol. 16* , 715-741. Proceedings of the IEEE.

Yagi, H. (1997). Beam Transmission of Ultra Short Waves. *vol.85* , pp. 1864-1874. Proceedings of the IEEE.

ANEXO

As componentes do campo elétrico instantâneo associado a uma onda plana viajando na direção z são:

$$\vec{E}(t, z) = E_1 \cos(\omega t - \beta z) \hat{x} \quad (1)$$

$$\vec{E}(t, z) = E_2 \cos(\omega t - \beta z + \delta) = E_2 \sin(\omega t - \beta z) \hat{y} \quad (2)$$

De (1):

$$\cos(\omega t - \beta z) = \frac{E_x}{E_1} \quad (3)$$

De (2):

$$\sin(\omega t - \beta z) = \frac{E_y}{E_2} \quad (4)$$

Mas:

$$\sin^2(\omega t - \beta z) + \cos^2(\omega t - \beta z) = 1 \quad (5)$$

$$\frac{E_x^2}{E_1^2} + \frac{E_y^2}{E_2^2} = 1 \quad (6)$$

Que representa matematicamente a equação de uma elipse.