



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC

REINILSON CÂMARA FILHO

**Projeto, construção e caracterização de uma antena corneta para
comunicação via satélite**

Santo André

2019

REINILSON CÂMARA FILHO

**Projeto, construção e caracterização de uma antena corneta para
comunicação via satélite**

Relatório apresentado à Universidade Federal do ABC como requisito parcial para obtenção do título de bacharel no curso de Engenharia de Informação, sob orientação do Prof. Doutor Marcelo Bender Perotoni.

Santo André

2019

Dedicatória

Dedico este trabalho à Universidade Federal do ABC pela excelência em seu corpo docente e cursos e à minha família e amigos, que tanto incentivaram e apoiaram meu crescimento pessoal e profissional.

Agradecimentos

À Deus, por me dar força e coragem nos momentos difíceis;

Aos meus pais, pelo grande incentivo sempre;

Ao meu professor orientador Marcelo Perotoni, por toda a paciência, auxílio e cooperação oferecidos ao longo desse 1 ano de realização do trabalho;

Aos demais professores do curso pelo conhecimento transmitido durante os anos de graduação;

Aos colegas e amigos de graduação pelo apoio e momentos de descontração;

A todas as pessoas que, de alguma forma colaboraram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos;

“É mais fácil obter o que se deseja com um sorriso do que à ponta da espada.”

(William Shakespeare)

RESUMO

Reinilson Câmara Filho. **Projeto, construção e caracterização de uma antena corneta para comunicação via satélite.** Trabalho graduação (Engenharia de Informação). Universidade Federal do ABC. Santo André, 2019.

A comunicação via satélite é essencial nas mais variadas aplicações. Para que a comunicação seja feita de maneira satisfatória a modelagem correta de uma antena para esse tipo de aplicação é fundamental. Com este enfoque, o presente trabalho propõe-se projetar, simular (com o auxílio do *software Feko*), construir, analisar e medir uma antena corneta piramidal, muito utilizadas para comunicação com satélites, devido às suas características como pequenas dimensões físicas e a largura estreita do feixe que produzem. A principal premissa do projeto é que a antena construída apresentasse o valor do S_{11} menor que -10 dB para a faixa de frequência entre 5 GHz até 8.2 GHz, espectro de frequência abarcado na banda C. Dessa forma, foi feito o dimensionamento (com o auxílio do *software Matlab*), simulações, protótipo, estudo de acoplamento até chegar na estrutura final que foi mensurada no *Vector Network Analyzer* (VNA) atingindo a premissa do projeto, demonstrando a viabilidade da construção de uma antena corneta piramidal.

Palavras-chave: Antenas, Antena Corneta, Comunicação Satelital.

ABSTRACT

Reinilson Câmara Filho. **Design, construction and characterization of a horn antenna for satellite communication.** Graduation work (Information Engineering). Federal University of ABC. Santo André, 2019.

Satellite communication is essential for a wide range of applications. For the communication link to be established in a satisfactory way, the correct modeling of an antenna for this type of application is fundamental. With this approach, the present work proposes to design, with the help of Feko software, to construct, analyze and measure a pyramidal horn antenna, widely used for satellite communication, due to its characteristics as small physical dimensions and narrow beam width produce. The main premise of the project is that the antenna should present an S11 smaller than -10 dB for the frequency range from 5 GHz to 8.2 GHz, frequency spectrum encompassed in band C. Thus, Matlab software, full-wave simulations, prototyping and coupling study are investigated until reaching the final structure that was measured in the Vector Network Analyzer (VNA) reaching the premise of the project, demonstrating the feasibility of the antenna construction studied.

Keywords: Antennas, Antenna Horn, Satellite Communication.

SUMÁRIO

1. Introdução	14
1.1. Objetivos	15
1.1.1. Objetivo Geral.....	15
1.1.2. Objetivos Específicos	15
2. Fundamentação Teórica	15
2.1. Princípios das Antenas.....	15
2.2. Parâmetros Fundamentais	19
2.2.1. Impedância de Entrada	19
2.2.2. Diagrama de Irradiação.....	19
2.2.3. Intensidade de Irradiação e Resistência de Irradiação	21
2.2.4. Densidade de Potência	23
2.2.5. Diretividade e Ganho	24
2.2.6. ROE - Razão de Onda Estacionária	25
2.2.7. Largura de Banda.....	26
2.2.8. Parâmetro S	26
3. Materiais e Métodos	28
3.1. Antena Corneta.....	28
3.2. Cornetas de Modo Puro (lisas).....	28
3.3. Antenas Cornetas Piramidais.....	29
3.4. Métodos de Acoplamento.....	30
3.5. Dimensionamento	32
3.6. Análise por Software de Simulação.....	35

3.6.1. Simulação Guia de onda.....	36
3.6.2 Simulação Antena Corneta.....	43
3.7. Experimentação Prática.....	46
4.Resultados e Discussão	52
4.1. Medição do S_{11}	52
4.1.1. Comparação entre o S_{11} Medido e Simulado	53
5. Conclusão.....	55
Referências Bibliográficas	56
Apêndice	57
Apêndice I – Desenho 2D da Estrutura da Antena	57
Apêndice II – Desenho 2D da Conexão entre Antena e Transição Coaxial Guia de Onda.....	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1. Equivalente de Thevenin para um modelo de transmissão.....	16
Figura 2. 2. Equivalente de Thevenin para um sistema de antenas.....	17
Figura 2. 3. Modelagem das componentes resistivas, indutivas e capacitivas presentes em uma antena.. ..	18
Figura 2. 4. Resposta em frequência para uma antena ideal.....	18
Figura 2. 5. Representação do diagrama de irradiação.....	21
Figura 2. 6. Esfera de determinação do elemento de ângulo sólido e potência irradiada.	22
Figura 2.7. Dependência da resistência de irradiação com o comprimento relativo para uma antena dipolo.....	23
Figura 2. 8. Gráfico de representação do S_{11}	27
Figura 3. 1. Tipos comuns das antenas corneta.....	28
Figura 3. 2. Geometria referente a uma antena corneta piramidal.	29
Figura 3. 3. (a) Linhas de campo provenientes do radiador presente dentro do guia; (b) Representação do campo em relação a distância do radiador; (c) guia de ondas com ajustes de localização do curto.	31
Figura 3. 4. Acoplamento para um cabo coaxial e um guia de ondas retangular com monopolo em forma de gota.	31
Figura 3. 5. Acoplamento indutivo (loop).....	32
Figura 3. 6. Molde em papelão para as dimensões obtidas no Matlab.....	35
Figura 3. 7. Modelo tridimensional construído na interface do FEKO.	36
Figura 3. 8. Valores do S_{11} simulado para um acoplamento indutivo ou em loop.	37
Figura 3. 9. Cabo RGC 11 empregado no acoplamento em loop.....	37
Figura 3. 10. Protótipo do acoplamento em loop projetado.	38
Figura 3. 11. Guia de onda WR137 utilizado no presente trabalho.	39
Figura 3. 12. Gráfico do parâmetro S_{11} obtido para simulação do acoplamento utilizado.	39
Figura 3. 13. Padrão de irradiação da transição para frequência de 5 GHz.	40

Figura 3. 14.	<i>Padrão de irradiação da transição para frequência de 6.15 GHz.</i>	41
Figura 3. 15.	<i>Padrão de irradiação da transição para frequência de 8 GHz.</i>	41
Figura 3. 16.	<i>Gráfico obtido para o S_{11} da antena simulada.</i>	43
Figura 3. 17.	<i>Padrão de irradiação da antena para frequência de 5 GHz.</i>	44
Figura 3. 18.	<i>Padrão de irradiação da antena para frequência de 6.15 GHz.</i>	44
Figura 3. 19.	<i>Padrão de irradiação da antena para frequência de 8 GHz.</i>	45
Figura 3. 20.	<i>Chapa de aço carbono utilizada no projeto.</i>	47
Figura 3. 21.	<i>Chapa de aço carbono após o corte.</i>	48
Figura 3. 22.	<i>Chapa de aço carbono após a dobra.</i>	49
Figura 3. 23.	<i>Carcaça da antena piramidal pronta.</i>	50
Figura 3. 24.	<i>Conexão entre antena e transição coaxial guia de onda.</i>	51
Figura 4. 1.	<i>Medição do S_{11}.</i>	52
Figura 4. 2.	<i>Gráfico obtido como resultado da medição do S_{11}.</i>	53
Figura 4. 3.	<i>S_{11} medido versus simulado.</i>	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dimensionamento em milímetros do guia de onda e da antena corneta. 34

Tabela 2. Resultados obtidos para o ganho e Side lobe level da transição utilizada.... 41

Tabela 3. Resultados obtidos para o ganho e Side lobe level da antena projetada. 45

LISTA DE SIGLAS

EWA	Electromagnetic Waves and Antennas
FEKO	FE Idberechnung für Körper mit beliebiger
GHz	Giga-Hertz
FNBW	First Null BeamWidth
HPBW	Half Power BeamWidth
ROE	Razão de Ondas Estacionárias
SWR	Standing Wave Ratio
SLL	Side Lobe Level
VNA	Vector Network Analyzer

1. Introdução

O mundo nunca esteve tão conectado como atualmente. Somos capazes de ter uma conversa, ou tomar conhecimento de um acontecimento, através de pessoas que estão em lados opostos do globo terrestre, de uma maneira prática, eficiente e rápida. Diversos são os meios usados para permitir a transmissão de informação como, por exemplo, cabos coaxiais, fibras óticas, micro-ondas e satélite. Cada meio possui sua respectiva topologia, estrutura e teoria que permite o seu funcionamento. Um ambiente de transmissão amplamente utilizado para interligar todo o planeta é o meio de transmissão via satélite.

Com a vantagem de ser capaz de interligar qualquer parte do mundo quase em tempo real, o satélite ganhou grande destaque nos meios de transmissão físico, passando a ser um dos mais importantes meios de transmissão de dados. Como os satélites são capazes de cobrir praticamente qualquer área do globo terrestre, são a melhor opção para atingir locais de difícil acesso como fazendas, pequenas cidades e até mesmo barcos e caminhões.

Um satélite é basicamente um elemento comum de interligação das estações terrenas de transmissão, atuando como um ponto de repetição. Quando os mesmos são colocados em uma órbita circular em torno da terra são denominados satélites geoestacionários. Pois como a sua velocidade de rotação é a mesma do planeta Terra, para um observador no solo o satélite comporta-se como se estivesse estacionário em um determinado ponto no espaço.

Para a comunicação com o satélite as estações terrenas costumam utilizar antenas do tipo fixas. Entre os diversos modelos de antenas, a comunicação por satélite emprega especialmente antenas do tipo corneta e refletora. As antenas cornetas são postas na estrutura do satélite principalmente devido às suas pequenas dimensões físicas e a largura do feixe que produzem, sendo adequadas à cobertura global.

O presente trabalho está formatado em quatro capítulos básicos englobado todo o estudo, projeto e construção de uma antena do tipo corneta piramidal. Os capítulos estão divididos em: Fundamentação teórica, materiais e métodos, análise dos resultados e discussões, e conclusão. O primeiro capítulo, fundamentação teórica, busca apresentar os conceitos básicos utilizados para embasar teoricamente o projeto da respectiva antena. O segundo capítulo, materiais e métodos, expõem os procedimentos aplicados para o dimensionamento da antena, os materiais e processos empregados em sua respectiva construção, simulação, além da validação dos resultados. O terceiro capítulo, análise dos resultados e discussão, busca inferir conclusões críticas dos resultados obtidos nas medições. Por fim, o último capítulo, conclusão, traz uma perspectiva global do trabalho elaborado, projetando hipóteses para trabalhos futuros.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

O principal objetivo do respectivo trabalho é estudar, projetar e construir uma antena do tipo corneta piramidal. De forma que a faixa de S_{11} abaixo de -10 dB esteja centrado na frequência de 6 GHz, a frequência mais baixa da faixa esteja em torno de 5 GHz e a frequência de alta esteja em torno de 8.2 GHz, espectro de frequência abarcado na banda C. Para mensurar esses valores será utilizado o *Vector Network Analyzer* (VNA) em conjunto com a antena construída.

1.1.2. Objetivos Específicos

Além disso, o presente trabalho buscará empregar uma metodologia de projeto eficiente. Construir uma antena baseando-se no seu projeto e simulação. Realizar simulações para mensurar os valores das grandezas de impedância, diagrama de irradiação e ganho. Além de realizar as medições do projeto com o auxílio dos equipamentos do laboratório, possibilitando um maior conhecimento dos mesmos.

2. Fundamentação Teórica

2.1. Princípios das Antenas

Pode-se simplificar a aplicação de uma antena como um aparelho responsável pela transição de dispositivos guia de onda ou linhas de transmissão para o espaço livre. Conforme a aplicação da mesma, é capaz de ter o transporte de energia

eletromagnética por meio de uma fonte de informação que será irradiada na antena, como também da antena para um receptor, caracterizando, assim, as duas formas fundamentais de emprego das antenas, transmissoras e receptoras.

Com a finalidade de simplificar a representação de um modelo de transmissão empregando uma antena utiliza-se o equivalente de Thevenin, a Figura 2.1 traz a representação das três principais partes desse sistema, antena, linha de transmissão e fonte ou receptor.

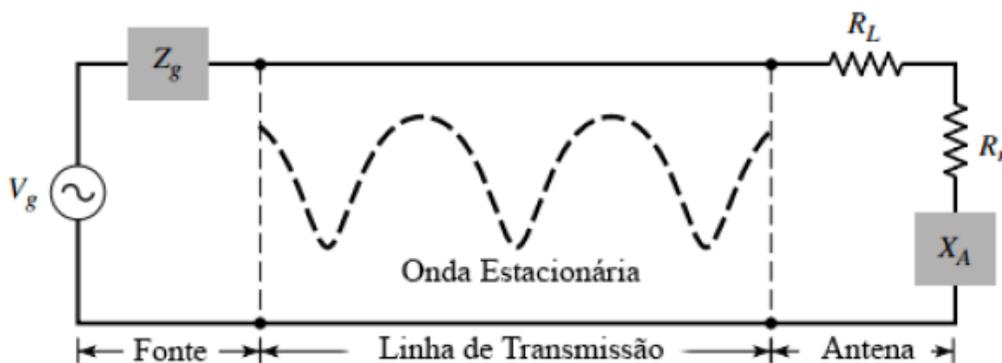


Figura 2. 1. Equivalente de Thevenin para um modelo de transmissão

Fonte: Retirado do Balanis (2005).

A porção relativa à antena pode ser representada por meio de uma impedância interligada à linha de transmissão, sendo possível calcular a grandeza impedância por meio da razão matemática entre a tensão da fonte dividido pela corrente produzida através das ondas irradiadas sobre a superfície da antena [1].

Uma antena, assim como todo dispositivo real, apresenta perdas ôhmicas que ainda que sejam relativamente pequenas afeta na sua eficiência, sendo essas perdas quantificadas através da resistência R_L . Além disso, as antenas, assim como capacitores e indutores, apresentam comportamento reativo, ou seja, são capazes de armazenar energia e devolver para a fonte de alimentação. Representa-se essa reatância por X_A . A última variável presente na modelagem do equivalente de Thevenin para um sistema de antenas é a resistência de radiação R_r , sendo compreendida como um elemento teórico em que a potência dissipada é equivalente a potência irradiada pela

antena, sendo que esses valores dependem da geometria da antena. A Figura 2.2 demonstra essa modelagem.

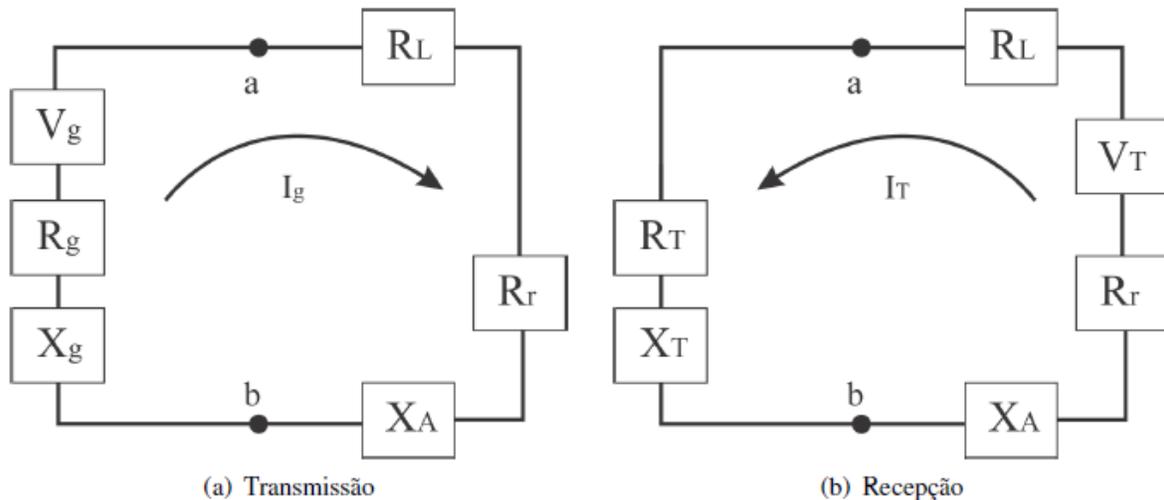


Figura 2. 2. Equivalente de Thevenin para um sistema de antenas.

Fonte: Adaptado de Balanis (2005).

O valor da potência que é efetivamente fornecido por meio de um gerador a uma antena depende dos valores das impedâncias do sistema, além da impedância presente no próprio gerador, representado respectivamente pelas grandezas R_L , R_r e X_A e, R_g e X_g , de forma que uma parcela da potência é efetivamente fornecida, e a outra parcela da potência é dissipada nas impedâncias do gerador. Além disso, da parcela que é entregue à antena ainda há uma parte que é dissipada devido a outras perdas, sendo que somente o restante da energia é irradiada através de ondas eletromagnéticas. Dessa forma, para obter a máxima potência irradiada precisa haver o casamento de impedância entre fonte/carga, linha de transmissão e antena [1].

É possível caracterizar uma antena qualquer devido ao fato do seu comportamento ser análogo ao de um circuito ressonante em série, conforme caracterizado na Figura 2.3. Para determinar a faixa de operação e sua respectiva largura de banda busca-se regiões próximas à frequência de ressonância, pois o sistema nessa região apresenta comportamento quase resistivo, dessa forma, as componentes capacitivas e indutivas são desconsideradas, conforme apresentado na Figura 2.4.

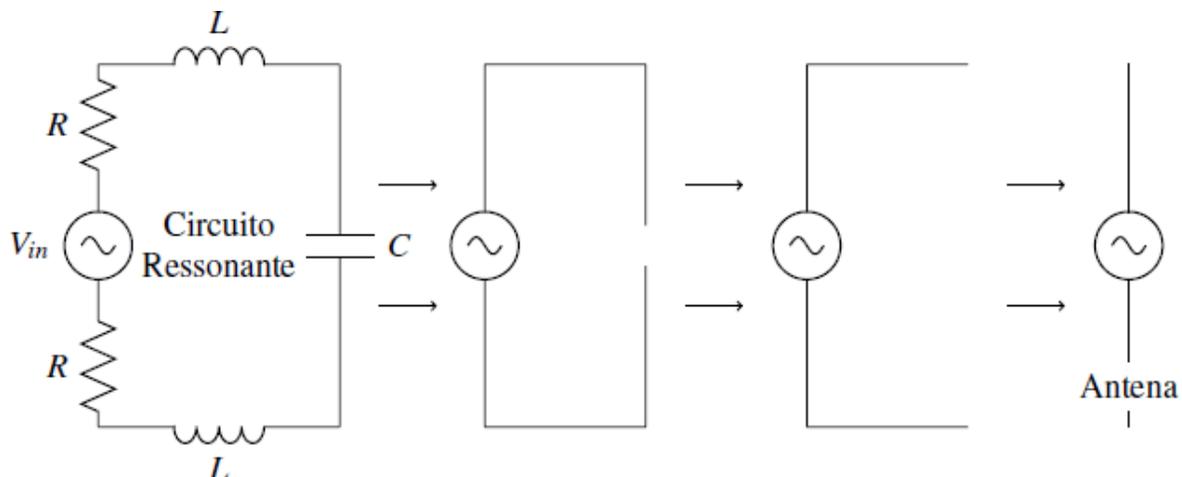


Figura 2. 3. Modelagem das componentes resistivas, indutivas e capacitivas presentes em uma antena.
Fonte: Adaptado de Carvalho e Badinhan (2011).

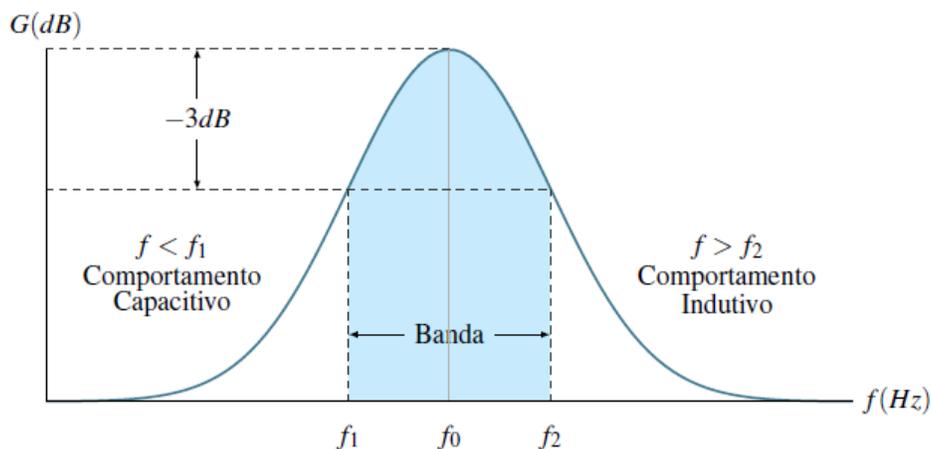


Figura 2. 4. Resposta em frequência para uma antena ideal.

Fonte: Adaptado de Carvalho e Badinhan (2011).

Para o projeto de uma antena múltiplos parâmetros devem ser considerados, dentre esses parâmetros vale destacar a impedância de entrada, o diagrama de diretividade e irradiação, a resistência de radiação, a densidade de potência, a diretividade, o ganho, a relação onda estacionária, a largura de banda e o parâmetro S. [2]

2.2. Parâmetros Fundamentais

2.2.1. Impedância de Entrada

Pode-se definir impedância de entrada como sendo a impedância sentida pela estrutura que está diretamente conectada à antena, por exemplo, linhas de transmissão, estruturas de acoplamento e balanceamento, além dos Baluns quando necessário. Sendo que é necessário o casamento de impedâncias entre a antena e o gerador para evitar dissipação de potência logo na entrada da estrutura.

2.2.2. Diagrama de Irradiação

O diagrama de irradiação demonstra graficamente o comportamento de uma antena quanto a sua irradiação no espaço. Apesar da irradiação ser tridimensional, o diagrama é comumente encontrado nos planos horizontal e vertical., sendo uma ferramenta gráfica imprescindível para o estudo das antenas. Os gráficos consistem em projeções normalizadas que dependem somente das coordenadas esféricas Θ e Φ . Há dois tipos básicos de gráficos para o padrão de irradiação são eles: o diagrama de campo e diagrama de potência. Ambos são usualmente normalizados no seu maior valor. Para ser obtida uma completa representação dos padrões de radiação faz-se necessário construir três gráficos. O primeiro apresentando a variação da intensidade normalizada de campo para a componente Θ e o segundo gráfico representando a componente Φ . E por fim, um terceiro gráfico para apresentar a variação de fase. [3]

Matematicamente os gráficos podem ser expressos pelas seguintes equações:

$$E_{\theta}(\theta, \phi)_n = \frac{E_{\theta}(\theta, \phi)}{E_{\theta}(\theta, \phi)_{max}} \quad [V m^{-1}] \quad (2.1)$$

$$E_{\phi}(\theta, \phi)_n = \frac{E_{\phi}(\theta, \phi)}{E_{\phi}(\theta, \phi)_{max}} \quad [V m^{-1}] \quad (2.2)$$

$$P(\theta, \phi)_n = \frac{S(\theta, \phi)}{S(\theta, \phi)_{max}} \text{ [Wm}^{-2}\text{]} \quad (2.3)$$

$$dB = 10 \log(P(\theta, \phi)_n) \quad (2.4)$$

Em que:

$E_\theta(\Theta, \Phi)$ = Componente Θ do campo elétrico;

$E_\phi(\Theta, \Phi)$ = Componente Φ do campo elétrico;

$P_\phi(\Theta, \Phi)$ = Vetor de Poynting ou densidade de potência;

O índice “n” aponta que as grandezas estão normalizadas.

É possível deduzir por meio dos diagramas de irradiação várias propriedades importantes no estudo de antenas, tais como: A largura lóbulo de meia potência, do inglês HPBW – *Half Power BeamWidth*, a largura de lóbulo de primeiros nulos ou Largura de Feixe de Primeiro Nulo, do inglês FNBW – *First Null BeamWidth*, além das propriedades de eficiência, diretividade, ganho, abertura efetiva e demais medidas, conforme representado na Figura 2.5.

Outro parâmetro fundamental retirado dos diagramas de irradiação são os lóbulos. Os lóbulos são divididos em lóbulo principal ou lóbulo maior e lóbulos secundários ou lóbulos laterais. O lóbulo principal aponta em que direção estar a maior intensidade de radiação da antena, sendo normalmente representado com o ângulo azimutal nulo. Os lóbulos restantes são denominados de lóbulos secundários. Os lóbulos também estão apresentados na Figura 2.5.

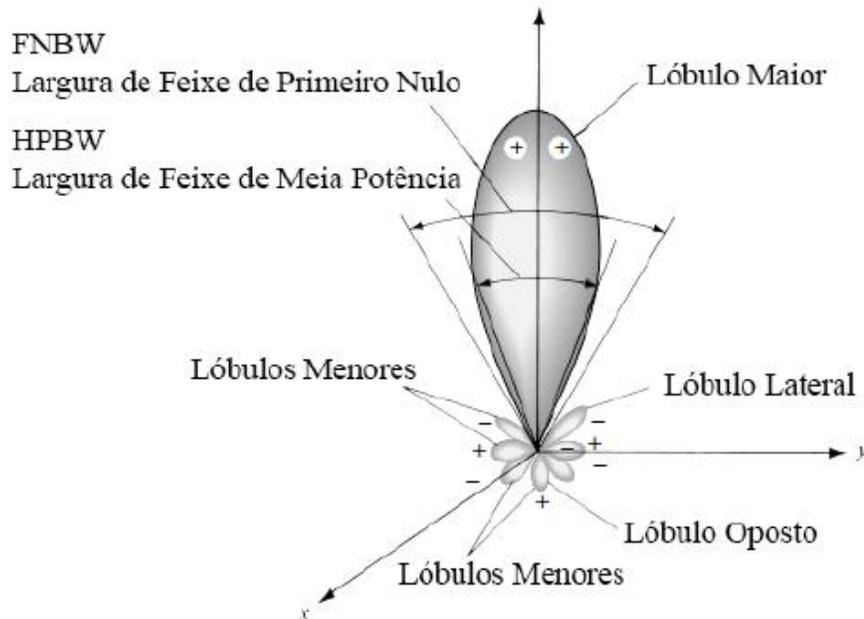


Figura 2. 5. Representação do diagrama de irradiação.

Fonte: Adaptado de Balanis (2005).

Por fim, também é possível definir com o auxílio do diagrama de irradiação se uma antena é considerada direcional ou omnidirecional. Basicamente uma antena dita direcional apresenta uma intensidade de irradiação maior para uma direção específica, são costumeiramente usadas no projeto de antenas parabólicas, comunicação via satélite e aplicação para detecção por radar. Já as antenas ditas omnidirecionais irradiam igualmente em um dos planos (já isotrópicas apresentam radiação tal como uma esfera, igual em todos planos). Antenas omnidirecionais são costumeiramente usadas em redes sem fio, ou em projetos que usam antenas dipolo ou monopolo, como por exemplo radiodifusão comercial.

2.2.3. Intensidade de Irradiação e Resistência de Irradiação

A grandeza intensidade de irradiação é definida como o fluxo de energia por unidade de ângulo sólido por unidade de tempo, ou simplesmente potência irradiada por unidade de ângulo sólido, para uma direção específica. A Equação (2.5) expressa essa grandeza.

$$U(\theta, \phi) = \frac{dP_{irr}}{d\Omega} = \frac{r^2 dP_{irr}}{dS} = r^2 S_{rad} \quad [\text{W/sr}]$$

(2.5)

Em que:

$$S_{rad} = \frac{dP_{irr}}{dS} = \text{Densidade de Potência } [\text{W/m}^2];$$

$d\Omega$ = Diferencial de ângulo sólido [sr];

dS = Diferencial de área da superfície que envolve o irradiador [m^2].

Analisando-se a equação (2.5) pode-se inferir que a potência diferencial por ângulo sólido independe da distância do irradiador, possuindo igual valor independente da direção do espaço, visto que em campos distantes as componentes de campos magnético e elétrico são inteiramente transversais entre si com direção de propagação radial do vetor de Poynting.[4]

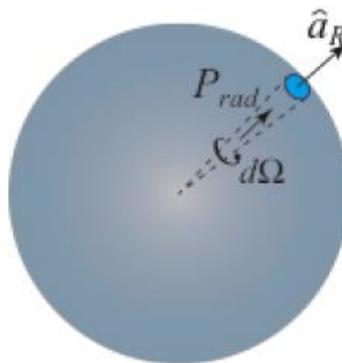


Figura 2.6. Esfera de determinação do elemento de ângulo sólido e potência irradiada.

Fonte: Reprodução de Fontana (2013).

Conforme apresentado anteriormente, o parâmetro de resistência de radiação é uma grandeza criada para representar o quanto de potência é efetivamente irradiado, devido ao fato que nem toda a potência fornecida pela fonte de alimentação é convertida em densidade de potência de onda eletromagnética. Dessa forma, pode-se deduzir que o quanto de energia eletromagnética uma antena irradia possui ligação

prática com a sua resistência de irradiação sendo que este parâmetro equivalente depende fundamentalmente da geometria da mesma. Na Figura (2.7) está apresentado o intervalo referente à resistência de radiação de um dipolo, resultando em uma resistência de valor igual a $73,13\Omega$ para dipolo de meio comprimento de onda ($l = 0,5\lambda$).

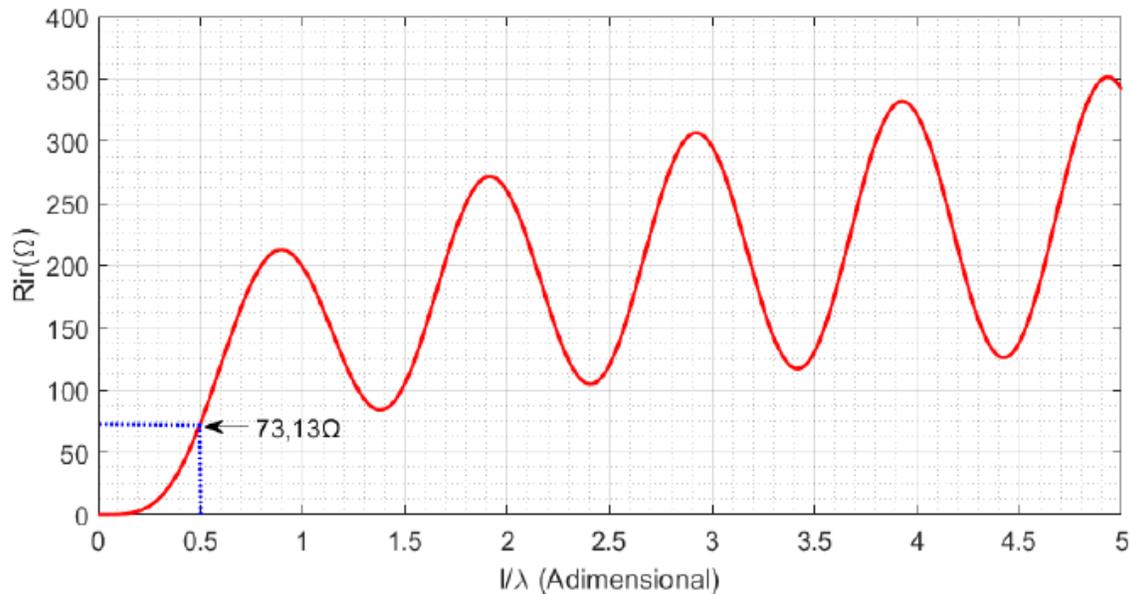


Figura 2. 7. Dependência da resistência de irradiação com o comprimento relativo para uma antena dipolo.

Fonte: Produção do próprio autor.

2.2.4. Densidade de Potência

É possível representar o teorema de Poynting através da notação fasorial [5] conforme expresso na Equação (2.6), em que está representado a dependência entre as componentes de densidade de potência, campo elétrico (\hat{E}) e campo magnético (\hat{H}). Outra possível interpretação para o Teorema de Poynting é que esse teorema expressa a densidade de potência média transportada através de uma onda eletromagnética.

$$\hat{P} = \frac{1}{2} \hat{E} \times \hat{H}^* \quad [\text{W/m}^2]$$

(2.6)

O cálculo da potência total através de uma superfície fechada é realizado pela da integração da componente normal do Vetor de Poynting, matematicamente

expresso na Equação (2.6), sobre a superfície, resultando em duas partes, uma parte real e outra parte imaginária. Para o projeto de antenas, considera-se apenas os efeitos de campos distantes, desconsiderando-se, portanto, os efeitos do campo reativo[1]. No campo próximo de uma antena há um predomínio da potência reativa armazenada através dos campos elétrico e magnético. Conforme se afasta da antena a componente reativa “some”, em detrimento da potência ativa que passa a predominar. Considera-se que a potência ativa dissipada devido a perdas ôhmicas e a potência que é efetivamente irradiada estão quantificadas na parte real da Equação (2.6). Por essa razão vários autores dividem a análise de antenas em regiões de acordo com a distância radial a partir da antena.

Além disso, por meio do teorema de Poynting é possível descrever o balanço de energia dos campos no espaço, conforme apresentado na Equação (2.7). Adaptando-se a equação para uma forma integral e acrescentando a contribuição da fonte, obtêm-se as considerações semelhantes com as obtidas para a Equação (2.6). Como a potência dissipada em decorrência da perda por calor em uma antena exerce pouca influência na análise pode-se despreza-la da parte real da equação, sobrando somente a potência do gerador, conforme mostrado na Equação (2.8). [5]

$$\oint_S \vec{P}_S \cdot \vec{d}_S = - \oint_V P_{diss} dV - j2\omega \oint_V (\omega_m - \omega_e) dV + P_g \quad (2.7)$$

$$P_{irradiada} = P_{irr} = \oint_S \vec{P}_S \cdot \vec{d}_S = P_g \quad [w] \quad (2.8)$$

2.2.5. Diretividade e Ganho

A grandeza quantificada através da diretividade pode ser definida como sendo a relação entre à intensidade de irradiação em uma dada direção pela a

intensidade de radiação média para todas as direções, conforme expresso na Equação (2.9).

$$D(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_{medio}} \Rightarrow \frac{U(\theta, \phi)_{max}}{U_o} \quad [\text{adimensional}]$$

(2.9)

Desenvolvendo a Equação (2.9), obtém-se:

$$U_{medio} = \frac{\int_0^\pi \int_0^{2\pi} U(\theta, \phi) \sin(\theta) d\theta d\phi}{\int_0^\pi \int_0^{2\pi} \sin(\theta) d\theta d\phi}$$

$$U_{medio} = \frac{\int_{4\pi} U(\theta, \phi) d\Omega}{4\pi} = \frac{P_{irr}}{4\pi}$$

$$D(\theta, \phi) = \frac{4\pi U(\theta, \phi)_{max}}{P_{irr}} \quad [\text{adimensional}]$$

2.2.6. ROE - Razão de Onda Estacionária

Denomina-se razão de ondas estacionárias (ROE) ou em inglês, *Standing Wave Ratio* (SWR), como à razão entre a máxima corrente pela mínima corrente, ou também a razão entre a máxima tensão pela mínima tensão, ao longo de uma linha de transmissão, conforme demonstrado na Equação (2.10)

$$ROE = SWR = \frac{VMáx}{Vmin} = \frac{IMáx}{IMín}$$

(2.10)

A razão de ondas estacionárias, ou SWR, representa, portanto, matematicamente o grau de descasamento entre a impedância da antena e a impedância característica da linha de transmissão.

Para o caso particular em que a SWR é igual a 1 tem-se que $Z_L=Z_0$, ou seja, a antena e a linha de transmissão possuem mesma impedância – caso ideal. Já quando a carga for um circuito aberto ou um curto-circuito essa relação tenderá ao infinito.

Quanto maior o valor da ROE, maior será o descasamento entre a linha e a antena, aumentando também a dissipação de potência. Logo, em um projeto de antenas sempre é desejável um baixo valor para ROE, exceto quando a linha é usada em aplicações específicas, como circuito sintonizado ou ressonante

2.2.7. Largura de Banda

Define-se o conceito de largura de banda de uma antena como o intervalo de frequência em que a transferência de energia seja minimamente eficaz. Para mensurar a largura de banda de uma antena define-se uma banda de frequência na qual a razão de onda estacionária (ROE) é menor do que um valor pré-estabelecido, normalmente o valor 2:1. Esse valor garante que ao menos 90% da potência entregue a antena será efetivamente irradiada. Ao se utilizar um critério de radiação, usualmente determina-se 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, ou seja, perda de retorno, quantificada por meio do parâmetro $S_{11} \leq -10\text{dB}$.

2.2.8. Parâmetro S

O parâmetro S representa o quanto de energia é refletida da antena, sendo também representado como o coeficiente de reflexão - como fator gama, ou também perda de retorno. Se S_{11} for igual a 0 dB, então toda a energia é refletida da antena e nada é irradiado. A Figura 2.7 apresenta um gráfico típico para o S_{11} .

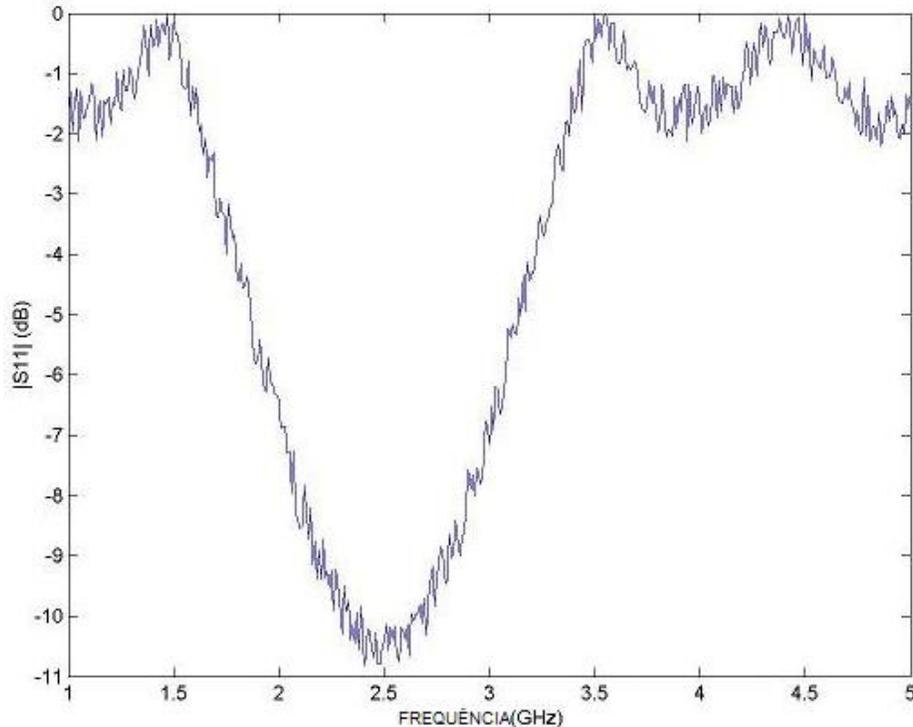


Figura 2. 8. Gráfico de representação do S11.

Fonte: Produção do próprio autor.

O gráfico apresentado na Figura 2.7 é tipicamente obtido utilizando o equipamento denominado *Vector Network Analyzer* (VNA). Além disso, continuando a análise da Figura 2.7 pode-se inferir que a antena do exemplo irradia melhor na faixa em torno da frequência 2,5 GHz, em que o valor de S11 equivale a -10 dB. Outra informação obtida por meio do gráfico é que na faixa de frequência de 1,5 GHz a antena irradia praticamente nada, pois o S11 está próximo de 0 dB, logo toda a energia entregue será refletida. A largura de banda da antena também pode ser obtida a partir do gráfico. Se a largura de banda é definida como a faixa de frequência em que S11 deve ser menor que -10 dB, então a largura de banda seria de aproximadamente 400 MHz, com a frequência de baixa em torno de 2.3 GHz e a frequência de alta em torno de 2.7GHz.

3. Materiais e Métodos

3.1. Antena Corneta

Considera-se antenas do tipo cornetas, em suas diversas formas, como antenas de abertura. Basicamente esse tipo de antena permite uma transição eficiente da propagação guiada para a propagação no espaço livre. Sua aplicação consiste basicamente nas áreas de comunicação via satélite, em que são utilizadas como radiadores sendo capazes de iluminar grandes áreas terrestres, rádio astronomia, em que são empregadas como alimentadores para refletores parabólicos além de serem utilizadas como instrumento de referência, em câmaras anecóicas para medidas de radiofrequência. Comumente há três tipos de cornetas que estão apresentados na Figura 3.1. Normalmente este tipo de antena opera na faixa de frequência de micro-ondas em função de suas pequenas dimensões e altos ganhos.

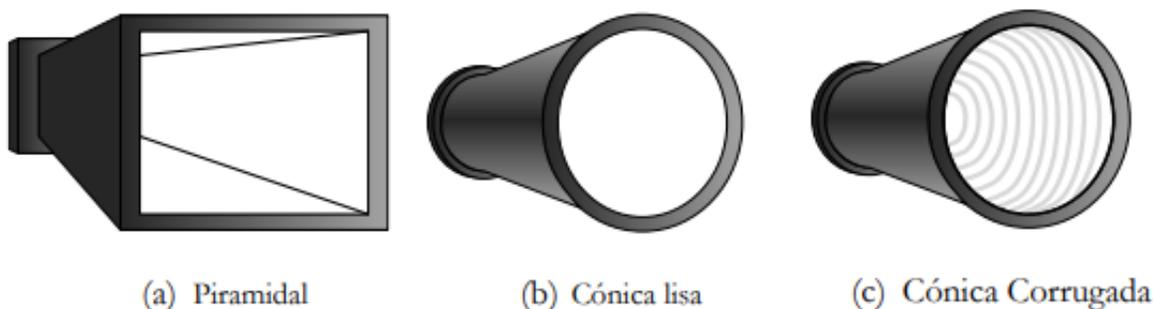


Figura 3. 1. Tipos comuns das antenas corneta.

Fonte: Adaptado de Dennis Roddy (2001).

3.2. Cornetas de Modo Puro (lisas)

Esses tipos de cornetas são caracterizados por radiarem um único modo. Os modelos mais utilizados para construir esse tipo de corneta são as cônicas e as piramidais. Uma das vantagens desse modelo é que possuem fácil dimensionamento, por meio de algumas expressões empíricas. Porém, esse tipo de corneta não apresenta características elétricas como baixo nível de polarização cruzada e além da simetria de feixe [7].

Pode-se dizer que o modo de operação presente no guia de onda provoca um campo de modo puro na abertura das antenas cornetas lisas. Dessa forma, a

caracterização da antena torna-se relativamente simples, porque apenas analisando o comportamento do modo fundamental no interior da corneta é possível inferir as suas características de radiação. Ademais, os modos puros que se propagam no interior dos guias e das cornetas, também denominados como modos transversais elétricos ou magnéticos (TE_{np} e TM_{np}), são facilmente caracterizados matematicamente [8].

3.3. Antenas Cornetas Piramidais

Antenas piramidais são comumente caracterizadas por apresentarem alto ganho, além de outras características, como por exemplo o baixo ROE, a largura de banda moderada e a construção relativamente fácil. Para realizar o projeto de antenas cornetas piramidais deve-se determinar as suas dimensões por meio do ganho, da frequência de operação e do guia de onda desejados. A Figura 3.2 apresenta a antena corneta e suas respectivas dimensões [9].

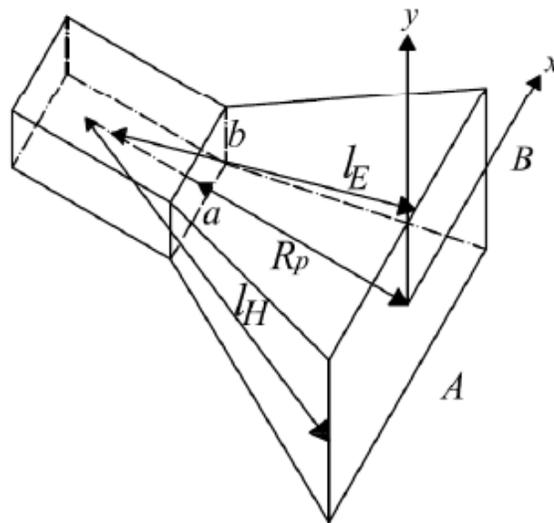


Figura 3. 2. Geometria referente a uma antena corneta piramidal.

Fonte: Adaptado de Marco Antonio Brasil Terada (2003).

O comprimento axial da antena é quantificado por meio da variável R_p , as aberturas da antena são quantificadas através das variáveis A e B , as dimensões do guia de onda são quantificadas por meio das variáveis a e b . Por fim, o comprimento da abertura a a um ponto de intersecção no interior do guia de onda é quantificado através das variáveis l_E e l_H . Logo, o projeto das antenas cornetas piramidais constitui-se na

determinação dos valores de A, B, l_H ou R_1 , l_E ou R_2 e essas variáveis estão relacionadas conforme apresentado na Equação (3.1) e na Equação (3.2).

$$l_H^2 = R_1^2 + \left(\frac{A}{2}\right)^2 \quad (3.1)$$

$$l_E^2 = R_2^2 + \left(\frac{B}{2}\right)^2 \quad (3.2)$$

3.4. Métodos de Acoplamento

Na conexão entre o cabo coaxial proveniente do *Vector Network Analyzer* (VNA) e o guia de onda é necessário haver um acoplamento para inserir ou retirar sinais. Na faixa de micro-ondas, são comumente usados três tipos básicos de acoplamento: capacitivo, indutivo e abertura.

O primeiro tipo de acoplamento é o capacitivo, apresentado na Figura 3.3, que basicamente é composto um radiador vertical inserido no final do guia de ondas. Frequentemente, esse radiador pode ser caracterizado como uma antena monopolo vertical com comprimento correspondente a um quarto do comprimento de onda da frequência de operação do sistema. Nas Figuras 3.3a e 3.3b estão representadas as linhas de campo elétrico para o modo mais comum de operação, pode-se notar também que há um curto (parede do guia) posicionado a uma distância correspondente a um quarto do comprimento de onda do monopolo. Já a Figura 3.3c representa um guia de ondas com a possibilidade de ajuste na posição do curto, de forma que seja possível adaptá-lo a diferentes frequências de operação.

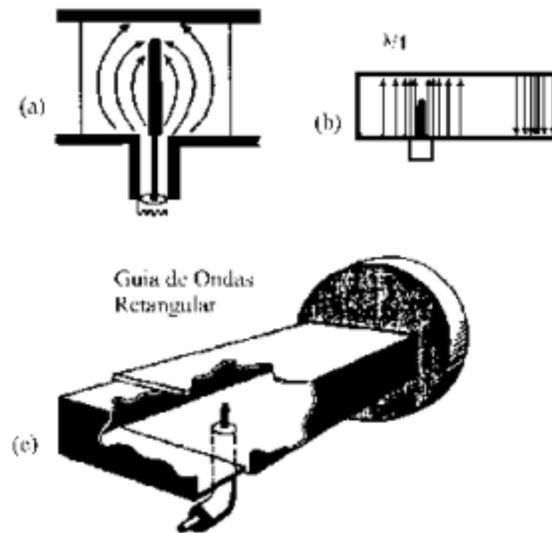


Figura 3. 3. (a) Linhas de campo provenientes do radiador presente dentro do guia; (b) Representação do campo em relação a distância do radiador; (c) guia de ondas com ajustes de localização do curto.

Fonte: Retirado de Antenas e Propagação (2003)

Há também a transição composta por um cabo coaxial e um guia de ondas retangular, realizando um acoplamento por intermédio de um monopolo em forma de gota, conforme apresentado na Figura 3.4. Utiliza-se um formato em forma de gota para o monopolo com a finalidade de aumentar a largura de faixa de operação do dispositivo.

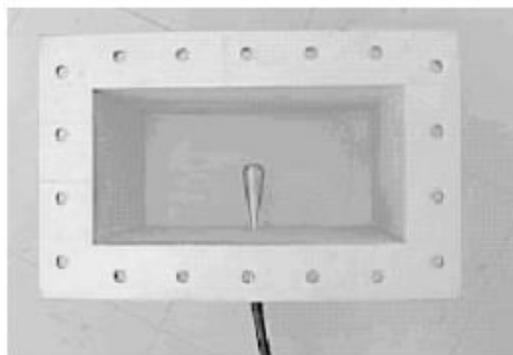


Figura 3. 4. Acoplamento para um cabo coaxial e um guia de ondas retangular com monopolo em forma de gota.

Fonte: Retirado de Antenas e Propagação (2003)

O último tipo mais comum de acoplamento é o acoplamento indutivo (ou acoplamento por loop), basicamente para ser feito é necessário um pequeno loop de fio condutor posicionado de forma que maximize o número de linhas de fluxo magnético. A Figura 3.5 apresenta o respectivo acoplamento juntamente com as linhas de campo magnético devido ao loop.

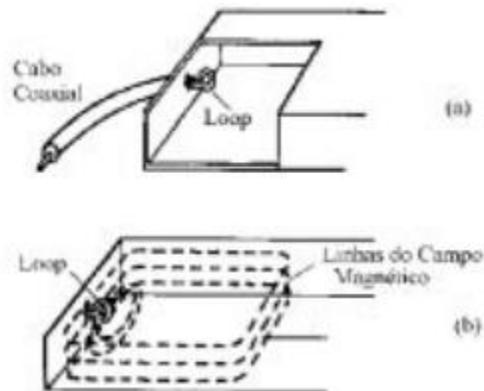


Figura 3. 5. Acoplamento indutivo (loop)

Fonte: Retirado de *Antenas e Propagação* (2003)

3.5. Dimensionamento

Como o presente trabalho possui a finalidade de projetar e construir uma antena corneta para comunicação via satélite adotou-se a banda C para o dimensionamento da antena. Escolheu-se essa faixa de frequência pois é a mais usada na transmissão via satélite para televisão no Brasil. Além de apresentar um espectro de frequência não tão alto, o que facilita nas medições no laboratório e nos materiais empregados na construção da mesma e ao mesmo tempo apresenta um espectro de frequência suficientemente grande, o que possibilita construir uma antena não tão pequena facilitando a construção mecânica da mesma.

Dessa forma, buscou-se dimensionar a antena corneta piramidal na frequência central de 6 GHz, a frequência de baixa (F_1) em 5.8 GHz e a frequência de alta (F_2) em 8.2 GHz, espectro abarcado na banda C. O ganho pretendido foi de 17 dBi. Logo, com o auxílio do software *Matlab*, os lados A e B que alcançarão o determinado ganho G, escolhido nesse caso 17 dBi, e também que se ajustará geometricamente com

um dado guia de onda de lados a e b , satisfazendo a condição de que R_1 seja igual a R_2 . Conforme demonstrado na Figura 3.6.

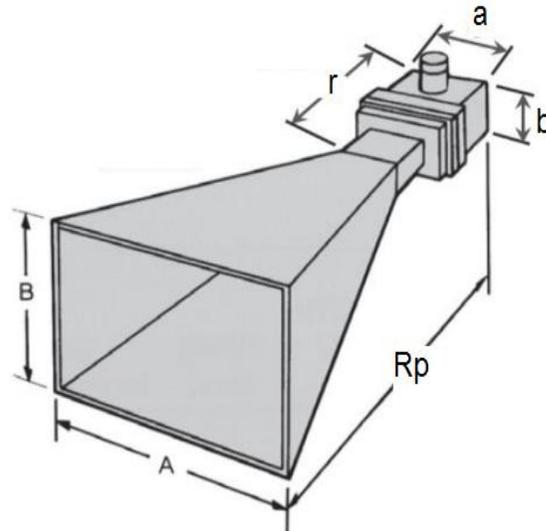


Figura 3.7. Variáveis do dimensionamento.

Para encontrar as dimensões ótimas utilizou-se um toolbox, *EWA* (*Electromagnetic Waves and Antennas*), desenvolvida pelo Professor Orfanidis, da Rutgers University. Esse toolbox basicamente calcula o termo F_1 por meio da Equação (3.3), F_2 por meio da Equação (3.4), A_0 utilizando a Equação (3.5) e por fim B_0 utilizando a Equação (3.6).

$$f_1(A, B) \equiv B - \left[\frac{b}{2} + \sqrt{\frac{b^2}{4} + \frac{\sigma_b^2}{\sigma_a^2} A(A - a)} \right] = 0 \quad (3.3)$$

$$f_2(A, B) \equiv AB - \frac{\lambda^2 G}{4\pi e} = 0 \quad (3.4)$$

$$A_0 = \lambda \sqrt{\frac{G}{4\pi e} \frac{\sigma_a}{\sigma_b}} \quad (3.5)$$

$$B_0 = \lambda \sqrt{\frac{G}{4\pi e} \frac{\sigma_b}{\sigma_a}}$$

(3.6)

A primeira premissa na elaboração do projeto consistiu em determinar os valores de um guia de onda qualquer com lados a e b , que possuísse o espectro de frequência desejado. Com auxílio do site *EverythingRF* [10] encontrou-se as respectivas dimensões a e b . Com base nos comprimentos encontrados, em função do comprimento de onda, aplicou-se a função `Hopt.m` do *toolbox EWA*, que retornou as dimensões ótimas da corneta para um ganho de 17dBi, F_1 em 5.8 GHz e F_2 em 8.2 GHz. Os resultados foram tabulados e apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Dimensionamento em milímetros do guia de onda e da antena corneta.

$a = 34.85$	$b = 15.79$	$r = 85.83$
$A = 220.30$	$B = 172.50$	$R_p = 266.40$

Por fim, com a finalidade de atestar que os valores encontrados através do dimensionamento feito pelo software *Matlab* seriam viáveis para a construção da corneta, montou-se um molde do projeto em papelão. O resultado está apresentado na Figura 3.8. Além disso, com o molde em papelão foi possível especular a melhor forma de construção, qual material utilizar e quanto desse material seria necessário para construção da mesma.



Figura 3. 8. Molde em papelão para as dimensões obtidas no Matlab.

3.6. Análise por Software de Simulação

É sugerido que para ser feito a análise do problema proposto no presente trabalho seja aplicado um software que seja capaz de avaliar o comportamento da antena no espaço tridimensional, inserindo um modelo que considera a não idealidade do projeto, para que, dessa forma, os resultados obtidos com a simulação sejam uma aproximação mais próxima do modelo real.

No presente trabalho utilizou-se o software FEKO - *FE Idberechnung für K örper mit beliebiger O berfläche* – traduzindo do alemão para o português - cálculos de campo envolvendo corpos de forma arbitrária - para realizar as simulações. Esse software é uma ferramenta especializada em simulação eletromagnética em três dimensões para componentes de alta frequência, como por exemplo antenas. Com FEKO foi capaz de modelar a antena corneta piramidal em ambiente tridimensional apresentando como resultado os diagramas horizontal, vertical e um diagrama de

irradiação tridimensional para determinada frequência. Além dos parâmetros de ganho, ROE e impedância. O software mencionado possui uma interface amigável para o usuário, sendo o modelo tridimensional e a interface do programa apresentado na Figura 3.9.

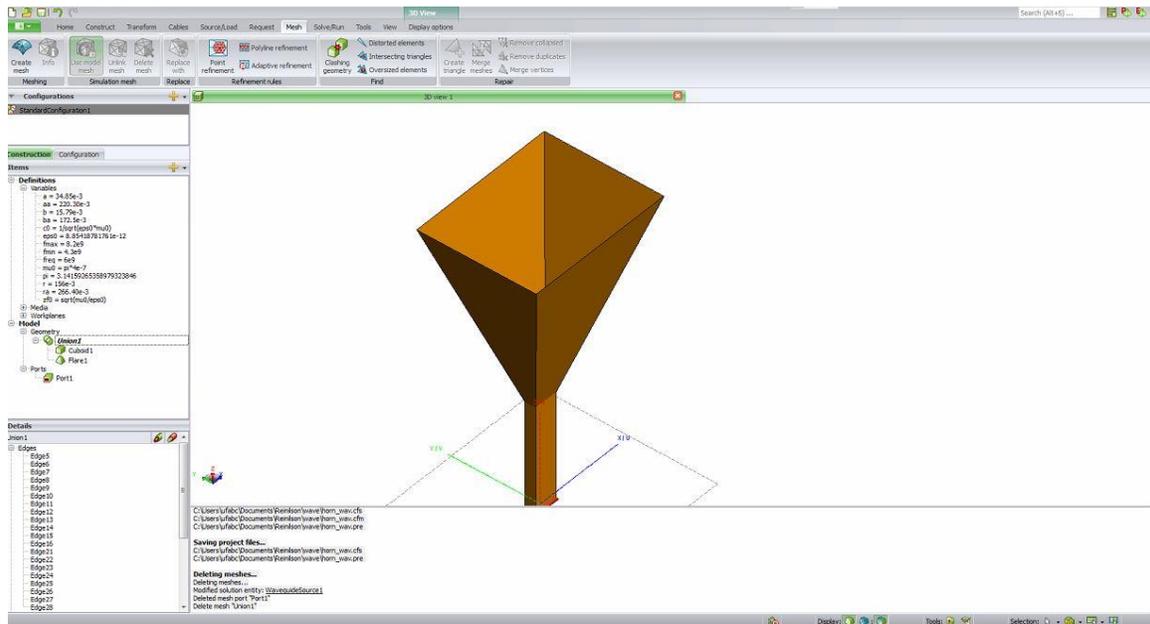


Figura 3. 9. Modelo tridimensional construído na interface do FEKO.

3.6.1. Simulação Guia de onda

O primeiro desafio enfrentado na construção da antena corneta piramidal foi como modelar um guia de onda que cumprisse a premissa de possuir um S11 abaixo de -10 dB para uma frequência entre 5 GHz e 8.2 GHz e que houvesse a maior largura de banda possível, preferencialmente cobrindo todo o espectro desejado.

Era sabido que não seria mecanicamente viável construir um acoplamento capacitivo ou em forma de gota. Pois o fato do monopolo está na vertical dificultaria o posicionamento ideal e uma fixação precisa na antena. Então optou-se por projetar um acoplamento em loop.

Foram realizadas diversas simulações para esse tipo de acoplamento. Percebeu-se que a banda apresentava, infelizmente, estreita, comportando uma pequena faixa de frequência operacional, faixa em que o S11 simulado apresenta valor menor que -10 dB. Além disso, inferiu-se também que quanto maior fosse o raio do fio

empregado maior seria a banda, os resultados das simulações estão apresentados na Figura 3.10.

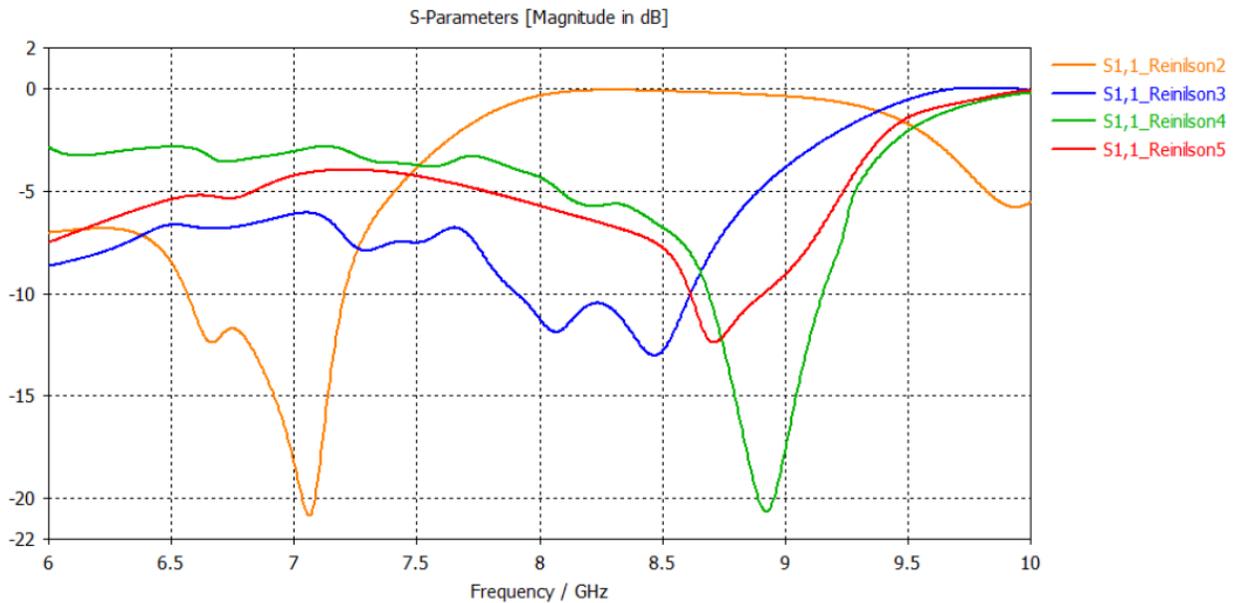


Figura 3. 10. Valores do S11 simulado para um acoplamento indutivo ou em loop.

Com base nos valores simulados montou-se um protótipo de um acoplamento em loop. Para fazer esse protótipo utilizou-se um cabo de cobre RGC 11, Figura 3.11, pois o mesmo possui um diâmetro razoavelmente grande, aproximadamente 10.2 milímetros, valor muito maior que os diâmetros encontrado em par trançado, por exemplo, aproximadamente 4.3 milímetros. Além disso, sua composição em cobre facilitou a soldagem no conector SMA, e por possuí um diâmetro relativamente grande seu aspecto não é tão maleável, mas maleável o suficiente para ser feito o loop.



Figura 3.11. Cabo RGC 11 empregado no acoplamento em loop.

Fonte: Datasheet do cabo

Para fazer o protótipo primeiramente crimpou-se o cabo RGC 11 deixando apenas o condutor central de cobre, cortou-se uma folha de cobre nas dimensões a e b

projetadas e soldou-se o conector SMA fêmea na folha de cobre e depois soldou-se uma ponta do loop no conector SMA e a outra ponta na folha de cobre. Montou-se dois protótipos com comprimentos do loop diferente o maior com aproximadamente 12 centímetros e o menor com aproximadamente 3 centímetros. A Figura 3.12 apresenta os resultados.

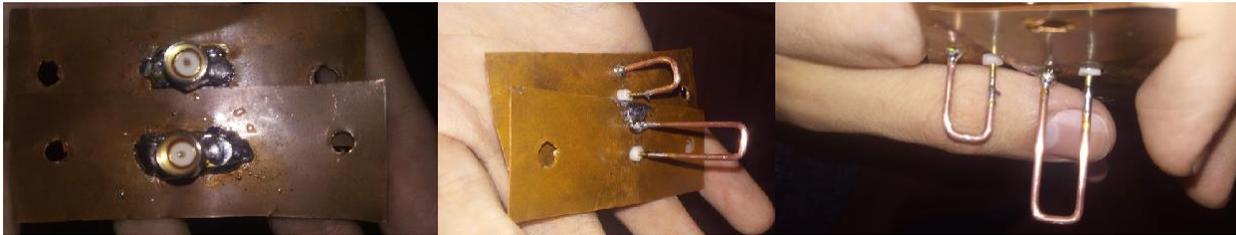


Figura 3. 12. Protótipo do acoplamento em loop projetado.

Com o protótipo em mãos surgiu uma nova dificuldade como realizar a fixação do modelo feito na carcaça da antena a ser construída. Apenas utilizando parafuso não seria possível pois a folha de cobre é bem maleável fazendo com que não se estabilizasse corretamente na carcaça. Pensou-se também em cortar uma chapa de aço carbono e colar com cola quente, devido a inviabilidade de soldar as peças, na folha de cobre. Porém não se obteve o resultado esperado, pois, as laterais do conector SMA possuíam uma altura considerável o que fez com que ao colar as peças houvesse um pequeno espaçamento entre as mesmas, espaçamento suficiente para haver fuga de frequência. Logo, a alternativa do acoplamento indutivo fora desconsiderada.

Buscando soluções para realizar o acoplamento encontrou-se um guia de onda WR137, o guia de onda utilizado no dimensionamento do projeto, Figura 3.13. Por ser um guia de ondas profissional o mesmo apresentava monopolo em forma de gota, o que aumentava a faixa de operação do mesmo. O conector tipo N se encontra parafusado na carcaça do guia. Além de possuir relevo na transição da flange o que impede a fuga de altas frequências (operando como *choke* de RF).



Figura 3.13. Guia de onda WR137 utilizado no presente trabalho.

Em posse do guia de onda WR137 realizou-se as devidas simulações computacionais com o mesmo. Com a finalidade de garantir que a peça operasse na faixa de frequência esperada, além de observar, por meio da simulação, como seria o padrão de irradiação da mesma apenas utilizando o guia em curto, para depois comparar com o padrão de irradiação obtido com a transição conectada a abertura que será posteriormente construída. Dessa forma, mediu-se todos os parâmetros da peça e modelou-se a mesma no *Feko*. O resultado do S_{11} obtido está apresentado na Figura 3.14.

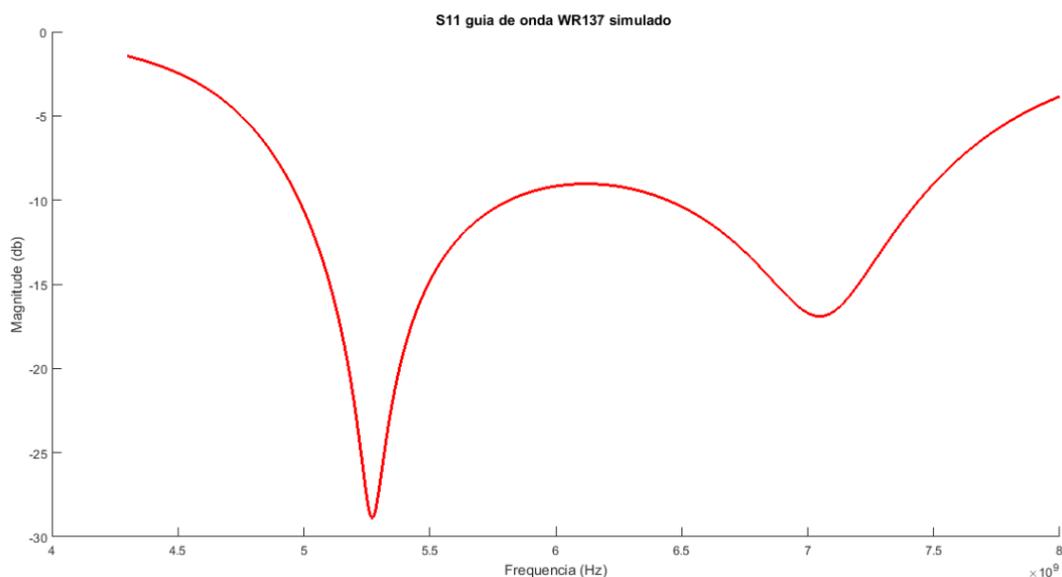


Figura 3.14. Gráfico do parâmetro S_{11} obtido para simulação do acoplamento utilizado.

Analisando o gráfico do parâmetro S da transição coaxial para guia de onda infere-se que a faixa de frequência em que o S_{11} vale -10 dB está entre 5 GHz e 7.4 GHz. A frequência de corte inicia-se em 4.5 GHz terminando em 8 GHz. Pode-se dizer que a transição de guia de onda apresenta comportamento de banda larga. Além disso, para faixa de 5.3 GHz a transição ofereceu o melhor S_{11} com valor igual a -27 dB. O resultado obtido foi o esperado, além de comprovar os dados fornecidos pelo fabricante.

Foram simulados também os padrões de irradiação obtidos para a transição em aberto, nas frequências de 5 GHz, 6.15 GHz e 8 GHz. Os padrões obtidos estão representados nas Figuras 3.15, 3.16 e 3.17 respectivamente. Além disso, os resultados adquiridos foram tabulados e estão apresentados na Tabela 2.

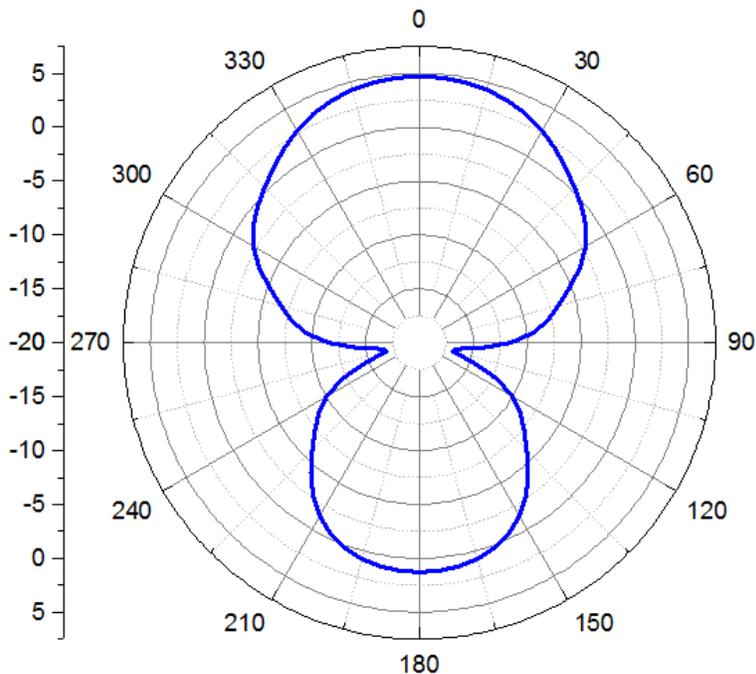


Figura 3. 15. Padrão de irradiação da transição para frequência de 5 GHz.

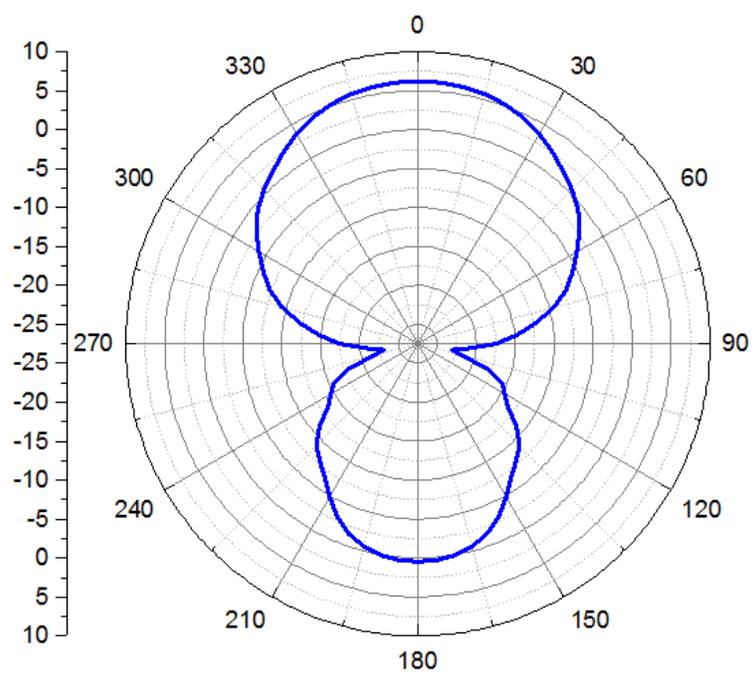


Figura 3. 16. Padrão de irradiação da transição para frequência de 6.15 GHz.

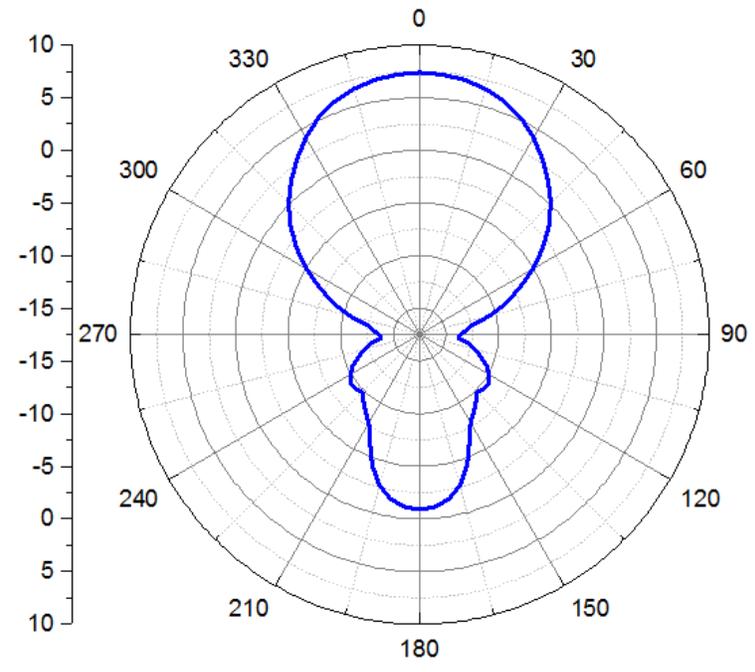


Figura 3. 17. Padrão de irradiação da transição para frequência de 8 GHz.

Tabela 2. Resultados obtidos para o ganho e Side lobe level da transição utilizada.

Frequência [GHz]	Ganho [dBi]	“Side Lobe Level” (SLL) [dB]
5	5.00	-4.6
6.15	5.29	-4.5
8	7.50	-5.7

Analisando os resultados percebe-se que utilizando a transição para guia de onda em aberto o padrão de irradiação obtido não é diretivo e conseqüentemente o ganho desse alimentador é baixo quando se comparado a uma antena corneta piramidal. Além disso, a relação “*Side Lobe Level*” (SLL), ou seja, valor da energia dos lóbulos laterais demonstrou-se alta, o que pode acarretar problemas, pois os lóbulos laterais irradiam para regiões indesejadas, incluindo para parte de trás da antena podendo queimar o transmissor da mesma. Por isso emprega-se uma antena corneta em conjunto com esse tipo de alimentador para que a onda eletromagnética sinta uma transição mais “suave”, isto é, uma impedância menor, e que os feixes fiquem mais diretivos, com menos lóbulos laterais, e conseqüentemente o ganho fique maior caso utiliza-se apenas a transição.

3.6.2. Simulação Antena Corneta

Com o auxílio do *software Feko* modelou-se a antena projetada utilizando as dimensões obtidas na secção 3.5, Tabela 1, do presente trabalho e realizou a sua respectiva simulação. A Figura 3.18 apresenta o gráfico do parâmetro S_{11} obtido como produto da simulação feita.

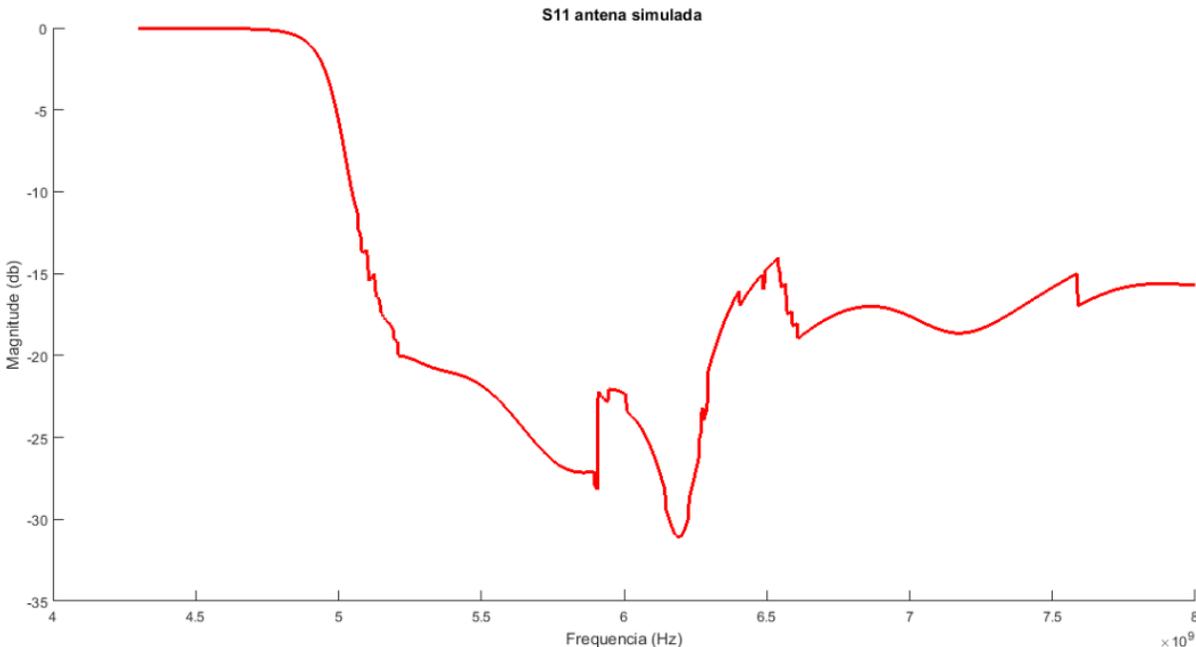


Figura 3. 18. Gráfico obtido para o S_{11} da antena simulada.

Baseando-se no gráfico obtido através das simulações observa-se que a região em que o S_{11} está abaixo de -10 dB, ou seja, ao menos 90% da energia de entrada é fornecida a antena corneta, sendo que a energia refletida é inferior a 10%, está entre 5 GHz até 8 GHz. Conforme desejado a região otimizada da antena, onde ocorre a maior transferência de energia, está próximo da frequência de 6.3 GHz. Além disso, o S_{11} desejado cobre toda a faixa de frequência esperado. De posse desses resultados pode-se dizer que a simulação valida o protótipo proposto, servindo como validação para construção da antena.

Simulou-se também os padrões de irradiação obtidos para a antena projetada nas frequências de 5 GHz, 6.15 GHz e 8 GHz. Os padrões obtidos estão demonstrados nas Figuras 3.19, 3.20 e 3.21 respectivamente. Além disso, os resultados adquiridos foram tabulados e estão apresentados na Tabela 3.

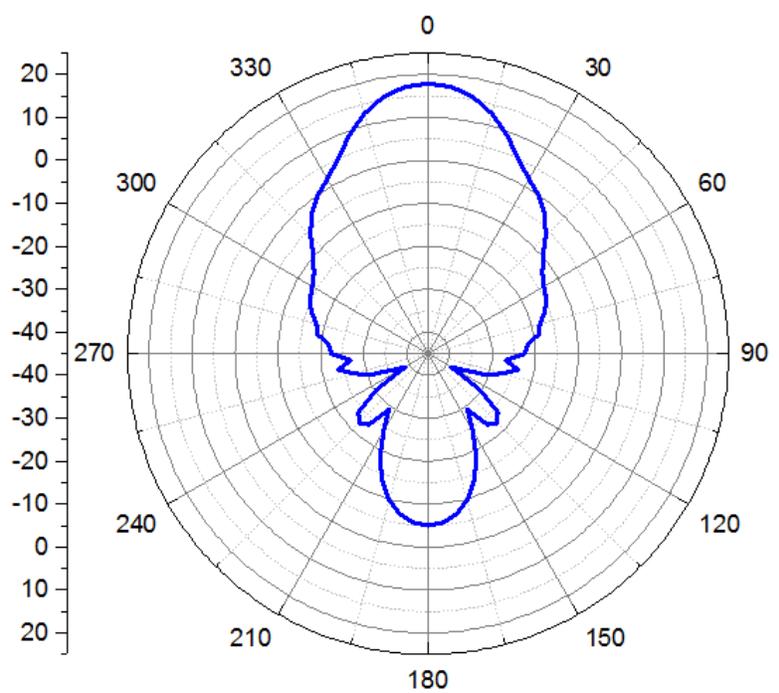


Figura 3. 19. Padrão de irradiação da antena para frequência de 5 GHz.

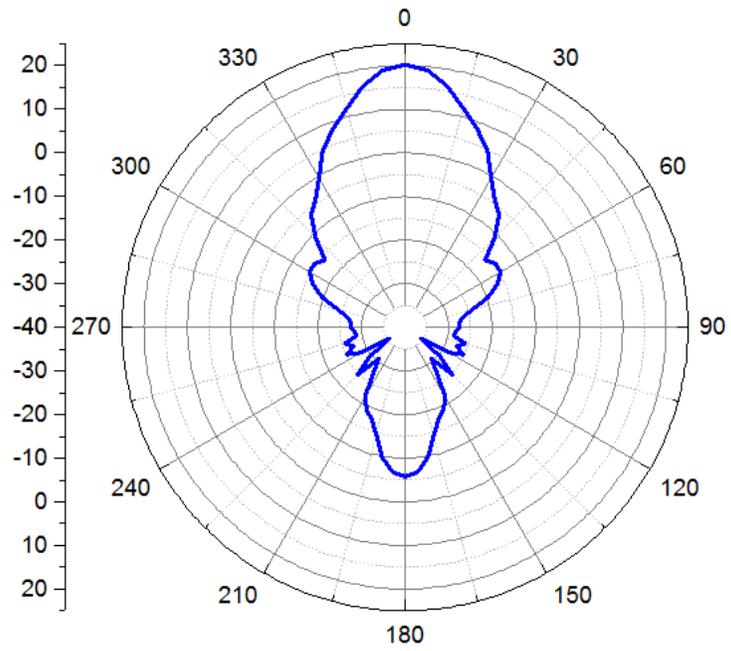


Figura 3. 20. Padrão de irradiação da antena para frequência de 6.15 GHz.

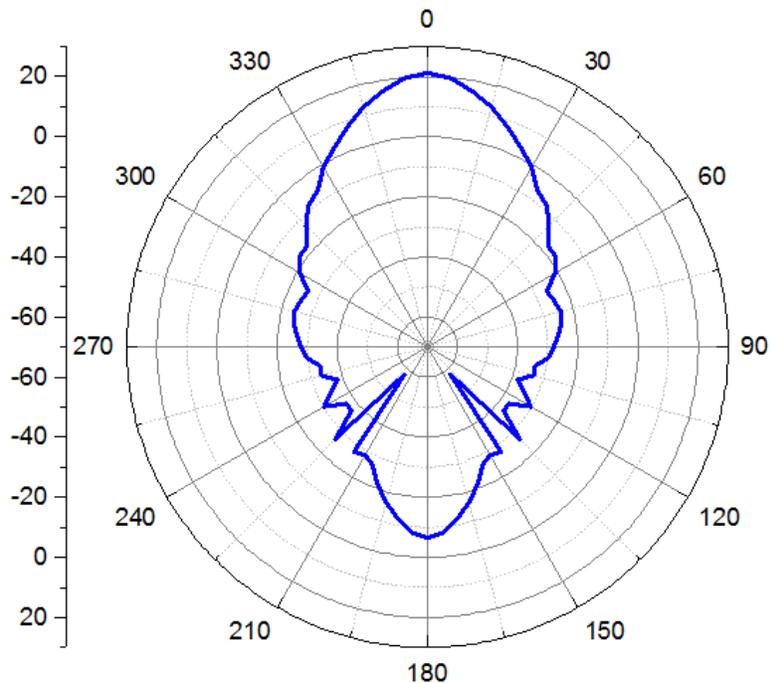


Figura 3. 21. Padrão de irradiação da antena para frequência de 8 GHz.

Tabela 3. Resultados obtidos para o ganho e Side lobe level da antena projetada.

Frequência [GHz]	Ganho [dBi]	“Side Lobe Level” (SLL) [dB]
5	17.8	-7.6
6.15	20.1	-8.3
8	20.2	-4.8

Analisando os padrões de irradiação pode-se inferir que na frequência para qual a antena foi otimizada, 6 GHz, atingiu-se um ganho de 20.1 dBi, valor de acordo com o desejado. Sendo que a relação “Side Lobe Level” (SLL), ou seja, valor da energia dos lóbulos laterais demonstrou-se pequena. Para a frequência de 8.2 GHz o ganho foi

quase equivalente, 20.2 dBi, porém a mesma apresentou vários lóbulos secundários sendo sua SLL igual a -4.8 dB. Por fim, para a frequência de 5 GHz o ganho foi de 17.8 dBi, e sua SLL igual -7.6 dB. Em linhas gerais o padrão de irradiação demonstrou que a antena projetada é diretiva e possui ganho alto - comportamento esperado para uma antena corneta piramidal.

Por fim, considerou-se que as simulações validaram as premissas consideradas no projeto. Então partiu-se para a próxima etapa que seria a experimentação prática utilizando as dimensões e modelos simulados.

3.7. Experimentação Prática

Na construção de um protótipo para uma corneta piramidal que seja capaz de ser testado na prática é necessário que o projeto passe pelos testes de simulação e posteriormente pela etapa de confecção, que consiste essencialmente na escolha dos materiais adequados. Esses materiais devem ser avaliados considerando aspectos como o tipo do material, custo, qualidade, quantidade e maneira de montagem. Não obstante quesitos físicos também precisam ser avaliados. O peso total da antena corneta piramidal não pode ser muito grande, pois esse fator pode fazer com que seja inviável que a antena seja acoplada em determinados suportes. Ademais, quando se trabalha em alta frequência sugere-se que sejam utilizadas estruturas com o mínimo de espessura possível, uma vez que o efeito pelicular faz com que as correntes circulem apenas na superfície do condutor. Todas as etapas de construção da peça foram feitas na oficina mecânica da Universidade Federal do ABC.

Logo, foi escolhido para confecção da estrutura uma chapa de aço 1020 com 1.2 milímetros de espessura, a Figura 3.22 apresenta as chapas utilizadas no projeto. Essa escolha foi devido ao fato desse material ser facilmente trabalhado, ou seja, o aço 1020 é fácil de ser cortado, dobrado e soldado. Além de ser leve, barato e de ser facilmente encontrado.



Figura 3. 22. Chapa de aço carbono utilizada no projeto.

Antes da construção propriamente dita, montou-se a estrutura tridimensional da antena no *software Solidworks* e obteve-se o desenho em duas dimensões, conforme demonstrado no Apêndice I. Esse desenho serviu como base fundamental no processo de construção da peça desejada, auxiliando nos cortes, dobra e soldagem da chapa.

O primeiro processo realizado na chapa de aço foi, com base no desenho em duas dimensões, fazer o corte da mesma de forma que o resultado fosse uma planificação de uma antena corneta piramidal. A Figura 3.21 apresenta a chapa de aço após o corte. Nessa primeira etapa já surgiu a primeira dificuldade, devido ao fato de a confecção da corneta ter sido feita na oficina da própria faculdade pelo aluno junto com o técnico do local, ocorreu imperfeições no corte e no dimensionamento da mesma, como pode ser observado na Figura 3.23.



Figura 3. 23. Chapa de aço carbono após o corte.

Com a chapa cortada dobrou-se o aço de maneira que o encaixe da uma placa na outra formasse-se uma antena corneta piramidal soldando-se apenas um lado da estrutura. Porém, para facilitar a dobra cortou-se a parte retangular da estrutura deixando apenas a abertura. Posteriormente foi feito a solda na junção da abertura com a parte retangular. Devido ao fato da imprecisão no corte, quando a estrutura foi dobrada apresentou-se pequenas imperfeições, vide Figura 3.24, que foram corrigidas no processo de soldagem.



Figura 3. 24. Chapa de aço carbono após a dobra.

A etapa da solda foi a mais difícil no processo de construção, pois como a chapa apresenta uma pequena espessura, 1.2 milímetros, correu-se um grande risco de furar a mesma. Sendo que, qualquer furo na antena significaria perda na estrutura pois pode ocorrer vazamento de energia, comprometendo a antena de forma que essa se tornaria inutilizável. Soldou-se a estrutura com auxílio de uma solda MIG, utilizando eletrodo para aço carbono. Além disso, utilizou-se uma baixa “amperagem” (intensidade corrente) na solda para evitar possíveis furos na estrutura. O resultado alcançado está apresentado na Figura 3.25.



Figura 3. 25. Carcaça da antena piramidal pronta.

A última etapa no processo de construção da antena corneta piramidal foi projetar e montar a conexão da antena com a transição coaxial guia de onda. A estrutura projetada deveria aproveitar os relevos presentes na transição coaxial guia de onda para que houvesse o perfeito casamento de impedância, impedindo que houvesse perda de energia logo na alimentação da antena.

Dessa forma, assim com na estrutura da corneta, desenhou-se a peça desejada através do *Solidworks* para obter-se o desenho em duas dimensões que serviu como base para o trabalho a ser feito na peça. O desenho e suas respectivas dimensões encontram-se no Apêndice II.

Para fazer a respectiva conexão o material empregado continuou sendo o aço carbono, porém dessa vez utilizou-se uma placa bastante espessa que pudesse ser usinada no torno CNC. O processo de usinagem foi realizado, também, na oficina da Universidade Federal do ABC, nesse processo não houve participação do aluno, apenas do técnico responsável pelo torno CNC. A peça pronta está apresentada na Figura 3.26. Como esse processo é automatizado o resultado final foi bastante satisfatório. Para finalizar a antena soldou-se a transição na estrutura da antena, utilizando os mesmos eletrodos empregados na primeira parte. Para fixar a transição guia de onda coaxial na corneta utilizou-se parafusos do tipo M5.

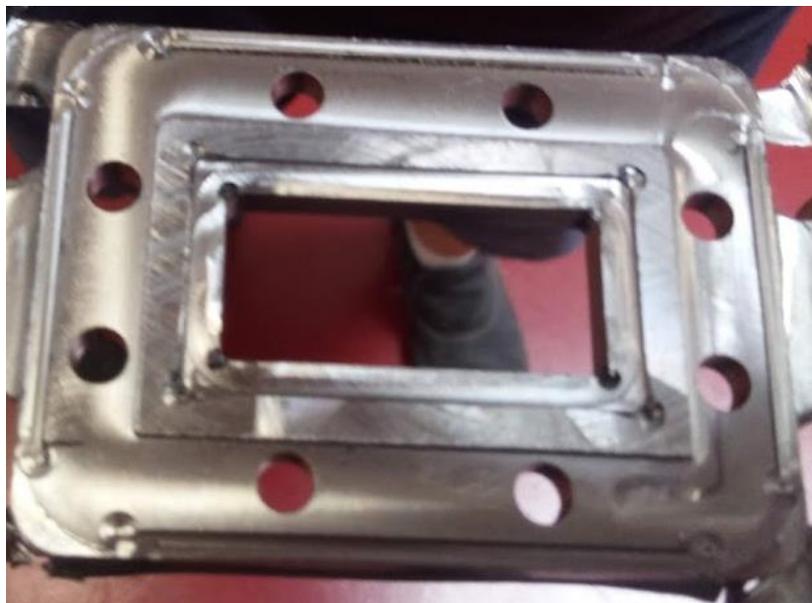


Figura 3. 26. Conexão entre antena e transição coaxial guia de onda.

4. Resultados e Discussão

Nesse capítulo está apresentado o resultado obtido por meio de testes práticos no laboratório com a antena corneta piramidal conforme metodologia adotada na elaboração do projeto. O protótipo projetado deve atender as características mínimas exigidas de diretividade, ganho e impedância para que seja possível conectar a antena aos equipamentos de laboratório, no caso do presente trabalho o *Vector Network Analyzer* (VNA), e garantir que as condições de acoplamento não interfiram de maneira significativa no funcionamento do protótipo para emissão ou recepção de sinais.

Além disso, vale ressaltar que os procedimentos práticos de teste da antena serão explanados e comentados, já que, influenciam diretamente nos resultados obtidos, igualmente como fatores que possam interferir na medição de alta frequência. Dentre estes pode-se destacar a confiabilidade dos equipamentos do laboratório e erros de operação devido a falhas ligada ao fator operacional humano.

4.1. Medição do S_{11}

A medição foi realizada no laboratório da Universidade Federal do ABC utilizando o equipamento *Rohde & Schwarz ZVB8 Vector Network Analyzer*. Dessa forma, conectou-se uma ponta do cabo coaxial na porta do VNA e a outra ponta na antena. Configurou-se o *Vector Network Analyzer* de forma que possibilitasse a varredura do S_{11} começando na frequência de 5 GHz e terminando em 8 GHz, apoiou-se a antena em uma cadeira e iniciou-se os testes. Conforme demonstrado na Figura 4.1.

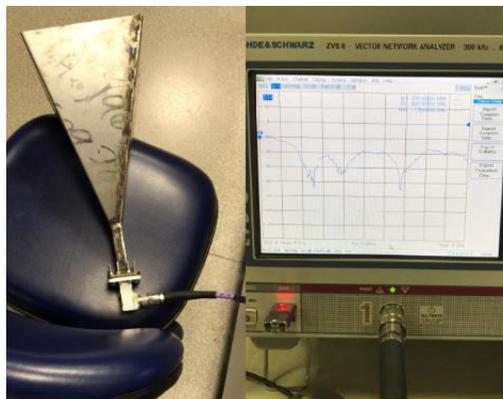


Figura 4. 1. Medição do S_{11} .

Vale ressaltar que por estar trabalhando em alta frequência diversos fatores influenciaram na medição, podem ser citados como exemplo perdas no cabo de conexão entre o VNA e a antena e a própria precisão do equipamento. Os resultados obtidos foram exportados e posteriormente plotados no *Matlab*, o resultado está apresentado na Figura 4.2.

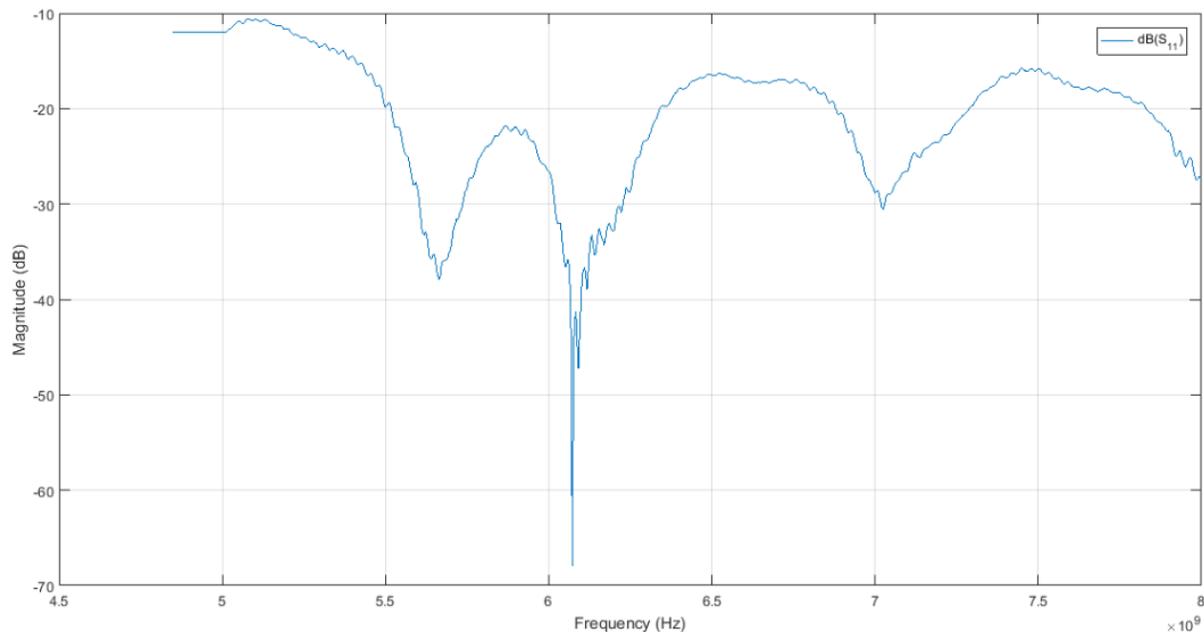


Figura 4. 2. Gráfico obtido como resultado da medição do S_{11} .

O gráfico apresentado na Figura 4.2 obtido para o S_{11} , valida o protótipo da antena construída e conseqüentemente o trabalho feito. Pois conforme discorrido ao longo do projeto o objetivo era construir uma antena que possuísse o S_{11} com um valor menor que -10 dB para a faixa de frequência entre 5.8 GHz a 8.2 GHz, com o valor otimizado para 6 GHz. Por meio do gráfico em questão observa-se que a antena corneta piramidal construída possui o S_{11} menor que -10 dB para toda faixa de frequência entre 5 GHz e 8.2 GHz. Apresentando melhores resultados próximo da faixa de 6 GHz, faixa na qual fora otimizada.

4.1.1. Comparação entre o S_{11} Medido e Simulado

Com a finalidade de comparar os resultados e facilitar a visualização plotou-se o gráfico do S_{11} medido em relação ao simulado. Dessa forma, foi possível

confrontar a simulação com o protótipo real possibilitando aferir o sucesso da construção da mesma e conseqüentemente da execução do projeto. O resultado obtido está apresentado na Figura 4.3.

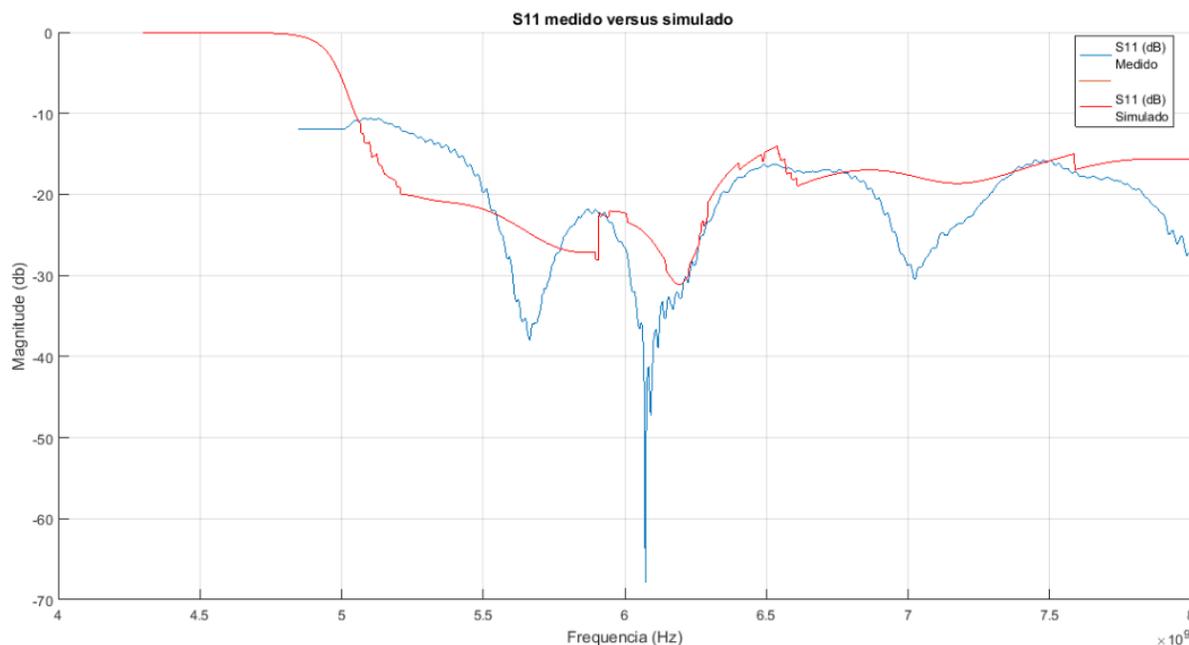


Figura 4. 3. S_{11} medido versus simulado.

Analisando o gráfico em que a linha azul apresenta o valor medido para a antena construída e o pontilhado vermelho apresenta o valor simulado, pode-se concluir que o valor prático está bem próximo do simulado. Percebe-se que os valores seguem quase a mesma tendência, os resultados de caem nas mesmas regiões, assim como os resultados sobem nas mesmas regiões para as duas estruturas analisadas. Não obstante, observa-se que para ambos modelos o S_{11} atende a premissa de projeto, menor que -10 dB, para todo o espectro de frequência, sendo otimizado em 6 GHz conforme projetado. Por fim, nota-se que para algumas medições, entre a faixa de frequência 6 GHz até 6.3 GHz, o valor encontrado está menor que a incerteza do equipamento de medição. Logo, considerando as incertezas de medições pode-se considerar que o valor mensurado está mais próximo do simulado.

Portanto, avaliando a comparação entre o resultado simulado e o resultado prático obtido conclui-se que o trabalho foi bem sucedido como todo foi um sucesso, pois

a simulação atendeu todas as premissas e a construção resultou em valores equivalentes ao simulado.

5. Conclusão

Este trabalho buscou projetar, caracterizar e construir uma antena corneta piramidal que pudesse ser aplicada para comunicação via satélite. No primeiro capítulo procurou-se realizar uma pequena introdução acerca do trabalho e seu respectivo objetivo. Já o segundo capítulo serviu como base na fundamentação teóricas do projeto desenvolvido. No terceiro capítulo foi apresentado os materiais e métodos utilizados, dimensionamento e simulação da antena projetada. Por fim, no quarto capítulo foram realizados os testes propostos, com avaliações comparativas de desempenho da antena projetada com a antena construída.

Na construção da antena, alguns parâmetros simulados não puderam ser testados em laboratório como ganho e diagrama de irradiação. Porém no teste do S11 a antena construída comportou-se conforme premissa do projeto. Também não foi possível construir um acoplamento indutivo ou acoplamento em loop. Portanto, o presente estudo demonstra a viabilidade de construir uma antena corneta piramidal operacional.

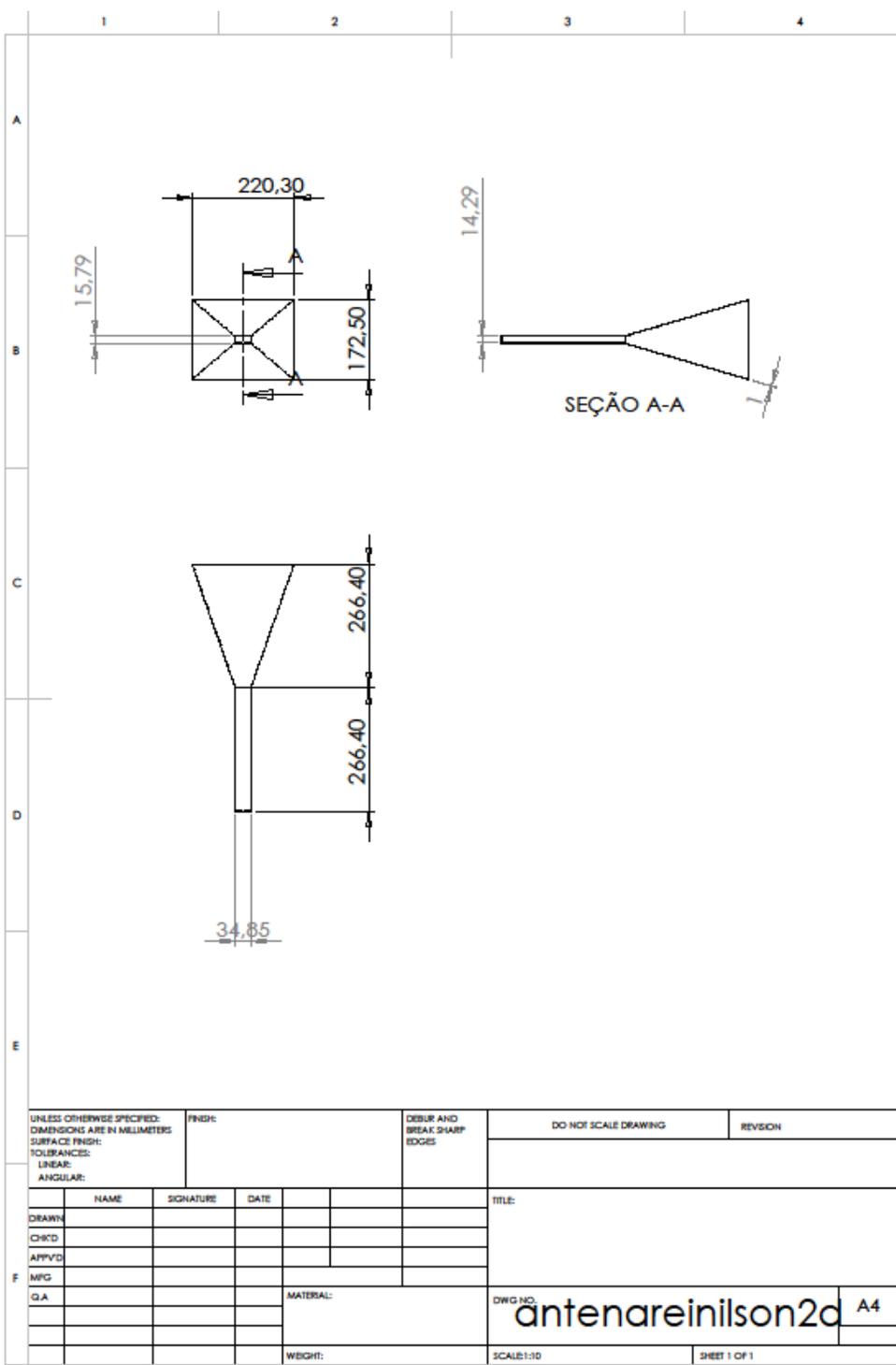
Como sugestão de trabalho futuro sugere-se a construção de uma antena corneta piramidal com um acoplamento indutivo ou acoplamento em loop, e sua posteriori caracterização completa, levando-se em consideração parâmetros como ganho e diagrama de irradiação.

Referências Bibliográficas

- [1] BALANIS, C. A. **Antenna Theory: Analysis and Design**. 3. ed. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2005. ISBN 978-0-471-66782-7.
- [2] RAMO, S.; WHINNERY, J. R.; DUZER, T. V. **Campos e Ondas Em Eletrônica das Comunicações**. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ: Guanabara Koogan, 1981.
- [3] KRAUS, J. D. **Antennas**. First edition edition. New York: McGraw Hill, 1950. ISBN 978-0-07-035410-4.
- [4] FONTANA, E. e-book, **Eletromagnetismo - Parte 2 - Capítulo 11 - Radiação e Antenas**. 2013. <<https://www.ufpe.br/fontana/Eletromagnetismo2/EletromagnetismoWebParte02/mag2cap11.htm>>. Acesso em: 18 de novembro de 2018.
- [5] RAMOS, A. **Eletromagnetismo**. 1. ed. São Paulo - SP: Edgard Blücher Ltda., 2016. ISBN 978-85-212-0969-0.
- [6] SADIKU, M. N. **Elementos de Eletromagnetismo**. Edição: 5ª. [S.l.]: Bookman, 19 de março de 2012. ISBN 978-85-407-0150-2.
- [7] Dennis Roddy, **Satellite Communications**, 3rd ed.: McGraw-Hill, 2001.
- [8] Pedro Pinho, **Guias de Ondas em Propagação e Radiação**. Lisboa, 2007, pp. 17-26.
- [9] W. L. Stutzman, G. A. Thiele, **Antenna Theory and Design**, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 1998.
- [10] **EverythingRF - Waveguides Sizes** <<https://www.everythingrf.com/tech-resources/waveguides-sizes>>. Acesso em: 05 de maio de 2018.

Apêndice

Apêndice I – Desenho 2D da Estrutura da Antena



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:									
TOLERANCES:									
LINEAR:									
ANGULAR:									
DRAWN:		NAME	SIGNATURE	DATE		TITLE:			
CHK'D:									
APP'VD:									
MFG:									
QA:						MATERIAL:		DWG NO. antenareinilson2d A4	
						WEIGHT:		SCALE:1:10 SHEET 1 OF 1	

Apêndice II – Desenho 2D da Conexão entre Antena e Transição Coaxial Guia de Onda

