# 3 Antenas em 60 GHz

Neste capítulo são revistos os conceitos básicos das antenas relevantes para o presente trabalho, como também os resultados obtidos nas simulações das mesmas no *software* HFSS [21]. Foram analisados dois tipos de antenas, um conjunto de antenas de 16 x 16 ranhuras e uma antena Cónica Corrugada de 90°.

### 3.1 Introdução

O IEEE (*The Institute of Electrical and Electronic Engineers*) define o termo "antena" como "aquela parte de um sistema de transmissão ou de recepção que é designada para irradiar ou para receber ondas eletromagnéticas" (IEEE, 1993), ou seja, uma antena é uma estrutura intermediária entre o espaço livre e o dispositivo eletrônico transmissor ou receptor. A conexão entre o dispositivo eletrônico e a antena é feita através de um "dispositivo de guiamento", ou linha de transmissão, que pode ter a forma de um cabo coaxial, um guia de onda ou uma linha plana (tipo *microstrip*, por exemplo). Quando a energia eletromagnética é transportada da fonte de transmissão à antena, denomina-se a antena como transmissora, quando e energia é transportada da antena para o receptor, tem-se uma antena receptora [2].

Em meados de 1886, os experimentos conduzidos pelo Prof. Heinrich Hertz junto ao Instituto Técnico de Karlsruhe (Alemanha) consolidaram o conceito de antena. Os primeiros modelos desenvolvidos por Hertz incluíam um dipolo de meio comprimento de onda com carregamento esférico, uma antena tipo quadro e uma antena refletora cilíndrica. Hertz pôde comprovar a existência das ondas eletromagnéticas, justificando a teoria de Maxwell. Apesar do êxito, o experimento permaneceu uma mera curiosidade laboratorial até meados de dezembro de 1901, quando o jovem Marconi surpreendeu o mundo anunciando que havia recebido, no Canadá, sinais de rádio transmitidos da Inglaterra. Parte fundamental desse sucesso se deve ao sistema irradiante que ele desenvolveu. [3]

### 3.2 Parâmetros Fundamentais de Antenas

Os parâmetros fundamentais que caracterizam o desempenho de uma antena são apresentados a seguir. Alguns dos parâmetros são inter-relacionados e nem todos precisam ser conhecidos para se obter uma descrição razoável do desempenho da antena.

### 3.2.1 Diagrama de irradiação

Embora a intensidade do campo decresça com o aumento da distância r, a forma do diagrama do campo irradiado é independente de r na região de campo distante. O diagrama de irradiação indica, usualmente, a intensidade do campo elétrico ou a intensidade de potência. A intensidade do campo magnético tem o mesmo diagrama de irradiação da intensidade do campo elétrico, relacionados por  $\eta_o$ . A polarização, ou orientação do vetor campo elétrico, é uma consideração importante no diagrama da intensidade de um campo elétrico. Um par de antenas transmissora-receptora deve compartilhar a mesma polarização para uma comunicação mais eficiente. Na discussão que se segue, iremos focalizar o diagrama de irradiação mais útil, o da intensidade de potência.

Uma vez que a intensidade de campo real ou o nível de potência depende não somente da distância radial, como também, da quantidade de potência entregue à antena, é costume dividir as componentes do campo ou da potência por seu valor máximo e traçar o diagrama da função normalizada. Na nossa discussão de diagrama de irradiação iremos considerar a função de potência normalizada

$$P_n(\theta,\phi) = \frac{P(r,\theta,\phi)}{P_{max}}$$

(3.1)

onde para valores particulares de  $\theta \in \phi$ ,  $P(r, \theta, \phi)$  atingirá seu valor máximo de  $P_{máx}$ . A função  $P_n(\theta, \phi)$  também é chamada de intensidade de irradiação normalizada.

Se a antena irradia ondas eletromagnéticas igualmente em todas as direções, ela é chamada de uma antena isotrópica. Como mostrado na Figura 3.1,

tal antena hipotética tem um diagrama de irradiação esférico independente de  $\theta$  e  $\phi$ . Aqui, então, a função de potência normalizada  $P_n(\theta, \phi)$  é igual a um, isto é,

$$P_n(\theta,\phi)_{iso} = 1 \tag{3.2}$$

onde o subscrito indica a função para uma antena isotrópica.



Figura 3.1: Diagrama de radiação de uma antena isotrópica

Em contraste com a antena isotrópica, uma antena direcional irradia e recebe em alguma direção preferencial. A Figura 3.2 mostra o diagrama de irradiação normalizado para uma antena genérica. É costume, se tomar fatias do diagrama e gerar gráficos bidimensionais. Na Figura 3.2 é mostrado um gráfico polar, onde um corte foi tomado e o diagrama desenhado sobre todos os valores de  $\theta$  para  $\phi = \pi/2$  (metade direita do gráfico). Na Figura 3.3, o mesmo corte é mostrado num gráfico retangular do nível de potência, em decibéis, versus ângulo  $\theta$ .



Figura 3.2: Diagrama de irradiação, antena genérica, gráfico polar

O gráfico polar pode, também, ser traçado em decibéis. É interessante notar que o diagrama de campo elétrico normalizado

$$E_n(\theta, \phi) = \frac{E(r, \theta, \phi)}{E_{max}}$$
(3.3)

em decibéis será idêntico ao diagrama de potência em decibéis. Isto porque a potência é proporcional ao quadrado da intensidade do campo elétrico e, para E, calcula-se:

$$E_n(\theta,\phi)(dB) = 20\log[E_n(\theta,\phi)]$$
(3.4)



Figura 3.3: Diagrama de irradiação, gráfico retangular, antena genérica

Está claro na Figura 3.3 que em alguma direção bem específica existem zeros, ou nulos, no diagrama, indicando nenhuma irradiação. As protuberâncias entre os nulos são referidas como lóbulos e o principal, ou lóbulo maior, está na direção de máxima irradiação. Existem lóbulos laterais e lóbulos traseiros. Um bom projeto de antena buscará minimizar tais lóbulos laterais e traseiros de forma que a maior concentração de energia fique no lóbulo principal.

Uma medida da natureza direcional de um feixe é a largura de feixe, também chamada de largura de feixe de meia potência ou largura de feixe de 3 dB. Como mostra a Figura 3.3, isto é uma largura de feixe medida nos pontos do meia potência ou a -3 dB do máximo. Se a seção transversal do feixe for elíptica, a largura de feixe de meia potência será a média das larguras de feixe medidas nos eixos maior e menor da elipse.

### 3.2.2 Diretividade

É geralmente desejável irradiar a maior potência de alimentação da antena no seu lóbulo principal, em vez de nos lóbulos laterais e traseiros. Uma medida de quão bem a antena faz isto é chamada diretividade *D*. Antes de definirmos diretividade, iremos primeiro descrever o diagrama de ângulo sólido da antena (algumas vezes referido como feixe de ângulo sólido).



Figura 3.4: Radiano (a) e Esferorradiano (b)

Um radiano é definido com o auxílio da Figura 3.4 (a). Ele é o ângulo subentendido por um arco ao longo do perímetro do círculo com comprimento igual ao raio. De uma maneira semelhante, definimos o esferorradiano usando a Figura 3.4 (b). Aqui, um esferorradiano (sr) é subentendido por uma área  $r^2$  na superfície de uma esfera de raio r. Um ângulo sólido diferencial  $d\Omega$ , em sr, é definido como

$$d\Omega = sen \ \theta \ d\theta \ d\phi \tag{3.5}$$

Para uma esfera, o ângulo sólido é encontrado pela integração de  $d\Omega$ :

$$\Omega = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} \sin\theta \, d\theta \, d\phi = 4\pi(sr)$$
(3.6)

O padrão de ângulo sólido de uma anten<br/>a $\Omega_p$ é dado por

$$\Omega_p = \iint P_n(\theta, \phi) d\Omega$$
(3.7)

como ilustrado na Figura 3.5. Aqui, toda irradiação emitida pela antena está concentrada num cone de ângulo sólido  $\Omega_p$  sobre o qual a irradiação é constante e igual ao valor da máxima irradiação da antena.



Figura 3.5: Padrão de ângulo sólido

Se quisermos encontrar o valor médio da potência normalizada tomando sobre todo o ângulo sólido da esfera, temos

$$P_n(\theta,\phi)_{m\acute{e}d} = \frac{\iint P_n(\theta,\phi) \, d\Omega}{\iint d\Omega} = \frac{\Omega_p}{4\pi}$$
(3.8)

O ganho diretivo  $D(\theta, \phi)$  de uma antena é a razão da potência normalizada numa direção particular e a potência normalizada média,

$$D(\theta, \phi) = \frac{P_n(\theta, \phi)}{P_n(\theta, \phi)_{m \notin d}}$$
(3.9)

A diretividade  $D_{m \acute{a} x}$  é o ganho diretivo máximo,

$$D_{m\acute{a}x} = D(\theta, \phi)_{m\acute{a}x} = \frac{P_n(\theta, \phi)_{m\acute{a}x}}{P_n(\theta, \phi)_{m\acute{e}d}}$$
(3.10)

É aparente de (3.6) que  $P_n(\theta, \phi)_{max} = 1$  e, com (3.8), concluímos que

$$D_{max} = \frac{4\pi}{\Omega_p} \tag{3.11}$$

A diretividade é frequentemente expressa em decibéis como

$$D_{m\acute{a}x}(dB) = 10\log(D_{m\acute{a}x}) \tag{3.12}$$

Uma relação útil obtida de (3.9) e (3.10) é

$$D(\theta,\phi) = D_{max}P_n(\theta,\phi)$$





Figura 3.6: Padrão de ângulo sólido em dois diagramas de radiação

A Figura 3.6 compara dois diagramas de irradiação. Na Figura 3.6 (a), uma considerável parte da potência é irradiada pelos lóbulos laterais e traseiros. Como resultado, o padrão de ângulo sólido é largo e a diretividade é pequena. Na Figura 3.6 (b), quase toda a potência é irradiada no lóbulo principal, de modo que  $\Omega_p$  é pequeno e a antena tem alta diretividade.

De (3.1) e (3.7), podemos escrever também a potência total irradiada como

$$P_{rad} = r^2 P_{m\dot{a}x} \iint P_n(\theta, \phi) \, d\Omega \tag{3.14}$$

## 3.2.3 Polarização

A polarização de uma antena se define como a polarização da onda irradiada quando a antena é excitada. A polarização geralmente é definida na direção em que a antena irradia a potência máxima, já que os enlaces são projetados para serem eficientes na direção de máxima irradiação. A polarização da onda irradiada varia com a direção do centro da antena, assim diferentes partes do diagrama de irradiação podem ter diferentes polarizações. Em cada ponto do espaço existe um vetor de campo elétrico  $\overline{E}$  ( $\overline{r}, t$ ); função da posição e do tempo. A polarização de uma onda é a figura geométrica descrita, ao longo do tempo, pelo extremo do vetor de campo elétrico num ponto do espaço perpendicular à direção de propagação.

A Figura 3.7 representa uma onda plana formada pelos campos elétrico (linha sólida) e magnético (linha ponteada) perpendiculares ao sentido de propagação (Z). Isto seria uma fotografia em três dimensões da onda plana num determinado instante do tempo. Ao longo do tempo, o campo elétrico  $\overline{E}_x$  num ponto fixo oscila para cima e para baixo ao longo duma linha vertical. Neste plano ortogonal, o sentido de propagação mostra a trajetória do campo elétrico com o transcurso do tempo.



Figura 3.7: Onda Polarizada verticalmente

Este foi um exemplo de polarização linear, mas, em geral, a figura que mostra o campo elétrico é uma elipse, então, se diz que o campo se encontra polarizado elipticamente. Outras polarizações como a linear e a circular são só casos particulares da polarização elíptica, a Figura 3.8 mostras todos os casos de polarização.

A direção de rotação do campo elétrico, tanto em polarização circular, como também elíptica, é à direita quando a onda se move para longe do observador, com o campo girando no sentido dos ponteiros do relógio e à esquerda, se a direção é oposta.



Figura 3.8: Polarizações linear, circular e elíptica

#### 3.2.4 Ganho

Para definirmos o ganho de uma antena, é necessário o conhecimento da teoria sobre antenas isotrópicas. A fonte pontual isotrópica é aquela que irradia uniformemente em todas as direções através do espaço que a circunda. Esse espaço é considerado sem perda.

Embora a fonte isotrópica não seja realizável na prática, ela proporciona conhecimento de utilidade em projetos das antenas reais. O ganho de uma antena caracteriza-se pela potência irradiada (ou recebida), em uma dada direção, em relação à potência irradiada (ou recebida) por uma antena isotrópica, ambas alimentadas pela mesma potência.

O ganho é máximo na direção de máxima irradiação, e para uma antena parabólica é dado por:

$$G_{máx} = \eta \cdot \left(\frac{\pi \cdot D}{\lambda}\right)^2 = \eta \cdot \left(\frac{\pi \cdot D \cdot f}{c}\right)^2$$
(3.15)

Quando expresso em dBi, ou seja, dB em relação à antena isotrópica, a expressão torna-se:

$$G_{max} = 10 * \log\left[\eta \cdot \left(\frac{\pi \cdot D}{\lambda}\right)^2\right] = 10 * \log\left[\eta \cdot \left(\frac{\pi \cdot D \cdot f}{c}\right)^2\right]$$
(3.16)

onde são definidos:

 $\eta \Longrightarrow$  Eficiência global da Antena

 $D \Longrightarrow$  Diâmetro da Antena (m)

*f* => Frequência de Operação (Hz)

 $\lambda \Rightarrow$  Comprimento de Onda (m)

 $c \Rightarrow$  Velocidade da luz (m/s).

A eficiência global da antena é o produto de vários fatores, tais como: eficiência de iluminação  $\eta_i$ , eficiência de transbordamento (*spill-over*)  $\eta_s$ , eficiência de superfície de chegada  $\eta_f$ , eficiência do casamento de impedância  $\eta_z$ , etc. Essa eficiência global é dada por:

$$\eta = \eta_i \cdot \eta_s \cdot \eta_f \cdot \eta_z \cdots$$
(3.17)

No total, a eficiência  $\eta$ , para o caso de uma antena parabólica, demonstrada acima como o produto de vários fatores, encontra-se tipicamente entre 55 e 75% (Bousquet et al., 1993). De um modo mais geral, define-se uma área efetiva da antena (também chamada abertura) como sendo a área ( $A_{eff}$ ) tal que o ganho da antena pode ser escrito como sendo:

$$G = \frac{4\pi \cdot A_{eff}}{\lambda^2} = \frac{4\pi \cdot A_{eff} \cdot f^2}{c^2}$$
(3.18)

#### 3.2.5 Largura de Banda

A largura de banda de uma antena é definida como "a faixa de frequências na qual o desempenho da antena, referido a algumas características, atende um padrão especificado". A largura pode ser considerada a faixa de frequências, nos dois lados de uma frequência central (no caso de um dipolo, sua frequência de ressonância), na qual as características da antena (como impedância de entrada, diagrama de radiação, largura de feixe, polarização, nível de lóbulo secundário, ganho, direção do feixe, eficiência de irradiação) têm valores dentro de limites aceitáveis, definidos normalmente em relação aos correspondentes valores na frequência central. No caso de antenas de banda larga, a largura de banda é usualmente expressa como a razão entre as frequências superior e inferior da faixa aceitável de operação. Por exemplo, uma largura de banda de 10:1 indica que a frequência superior é 10 vezes maior que a inferior. Para antenas de banda estreita, a largura de banda é expressa como a razão entre a diferença de frequências (superior menos inferior) e a frequência central. Por exemplo, uma largura de banda de 5% indica que a diferença das frequências de operação aceitável é de 5% da frequência central da banda. Esta quantidade é também definida como a banda relativa da antena.

Como as características de uma antena (impedância de entrada, diagrama, ganho, polarização, etc.) não variam necessariamente da mesma forma com a frequência ou nem mesmo são criticamente afetadas pela frequência, não há uma descrição única de largura de banda. As especificações são estabelecidas para cada caso, de modo a atender às necessidades da aplicação desejada. Em geral, uma distinção é feita entre variações do diagrama e da impedância de entrada. Consequentemente, largura de banda de diagrama e largura de banda de impedância são expressões empregadas para enfatizar esta distinção. Associados à largura de banda de diagrama estão o ganho, o nível de lóbulo secundário, a largura de feixe, a polarização e a direção de feixe, enquanto a impedância de

entrada, a perda de retorno e a eficiência são associadas à largura de banda de impedância.

Em um dado sistema de comunicações, os sinais processados ocupam uma certa faixa do espectro de frequências, por conseguinte, a antena tem que ter a capacidade de receber e irradiar sinais de banda tão larga quanto esta faixa. Nesse contexto, a impedância de entrada de uma antena deve se manter sob valores dentro de uma tolerância aceitável para atender a banda dos sinais. Além disso, seu ganho direcional também deve se manter relativamente constante para toda a banda dos sinais, o que implica em ter o formato do diagrama de radiação toleravelmente igual para o espectro processado.

#### 3.3 Conjunto de Antenas

Há aplicações de antenas que exigem características de irradiação que não podem ser obtidas com um único elemento. Todavia, é possível fazer com que vários elementos irradiantes agrupados em um arranjo geométrico ordenado, chamado conjunto, produzam características de irradiação próprias de interesse. A configuração do conjunto pode ser tal que as irradiações dos elementos se somem e maximizem a irradiação total em uma ou mais direções, minimizem a irradiação em outras direções, ou ambos, se necessário. Exemplos típicos de conjuntos estão mostrados na Figura 3.9.

Em geral o termo conjunto é reservado a configurações nas quais os elementos irradiantes individuais são dispostos regularmente como na Figura 3.9(a), 3.9(b), 3.9(c). O mesmo termo, contudo, pode ser empregado para descrever um agrupamento de irradiadores em uma estrutura irregular como a da Figura 3.9(d).



Figura 3.9: Configurações típicas de conjuntos de antenas [2]

#### 3.3.1 Conjunto de Antenas para 60 GHz.

As antenas para 60 GHz devem ser pequenas e com um alto ganho. Por isso, o conjunto de antenas é uma boa opção para ser utilizado num sistema móvel operando numa frequência de 60 GHz. Tentou-se reproduzir o desenho mostrado em [22]. Neste trabalho, desenhou-se antenas de 4x4, 4x8, 4x16, 8x8, 8x16 e 16x16 elementos para ver o comportamento do ganho e da largura de feixe para cada variação. O tamanho da antena de 16 x16 é de 7,5 cm x 7,6 cm e o desenho final é mostrado na figura 3.10



Figura 3.10: Vista do desenho final da antena 16x16 em HFSS

A antena é composta por duas partes: a parte de alimentação na camada inferior e a parte de radiação na camada superior. A antena é alimentada através da abertura de alimentação na parte traseira. O circuito de alimentação é uma alimentação corporativa e uma combinação do plano H e junções T. A abertura de acoplamento está localizada em cada extremidade do circuito de alimentação para permitir a alimentação da parte de radiação em fase e com amplitude igual. A parte de radiação está composta por vários arranjos de 2x2, com 4 ranhuras radiantes, colocadas numa cavidade. As camadas mencionadas são mostradas na seguinte figura 3.11.



Figura 3.11: a) Placa de alimentação b) Placa de acoplamento c) Placa de cavidades d) Placa de ranhuras de radiação

Do mesmo jeito foram desenhadas as demais antenas com as diferentes dimensões. Os resultados das simulações são mostradas nas seguintes figuras:



Figura 3.12: Largura de feixe do arranjo de 4x4 ranhuras, com 18,95 dB de ganho



Figura 3.13: Largura de feixe do arranjo de 4x8 ranhuras, com 21,67 dB de ganho



Figura 3.14: Largura de feixe do arranjo de 4x16 ranhuras, com 23,79 dB de ganho



Figura 3.15: Largura de feixe do arranjo de 8x8 ranhuras, com 24,10 dB de ganho



Figura 3.16: Largura de feixe do arranjo de 8x16 ranhuras, com 25,53 dB de ganho



Figura 3.17: Largura de feixe do arranjo de 16x16 ranhuras, com 25,99 dB de ganho

Como pode se observar nas figuras 3.12 à 3.17, à medida que o número de ranhuras aumenta, a largura de feixe diminui e o ganho se incrementa. Este tipo de conjunto é muito diretivo e não se adequa ao objetivo deste trabalho, que é obter uma antena que tenha uma largura de feixe maior que 100 graus. Por outra lado, estas antenas não foram construídas, portanto, nem testadas devido à falta de material para construí-las. Os resultados mostrados foram obtidos das simulações realizadas no *software* HFSS [21].

#### 3.4 Antena Corneta Corrugada

As cornetas corrugadas diferenciam-se das cornetas lisas por possibilitarem a redução de perdas por transbordamento, redução dos níveis de polarização cruzada, por terem alta eficiência e por possuírem simetria axial (simetria em torno do eixo de radiação), que são características essenciais para antenas com refletores parabólicos.

O princípio de operação das cornetas corrugadas pode ser fisicamente explicado através da influência das paredes corrugadas no guia, e de como estas afetam a distribuição do campo no seu interior. A Figura 3.18 representa o interior de um guia corrugado.



Figura 3.18: Interior de uma guia corrugada

As corrugações alteram o campo que viaja ao longo do guia, fazendo com que o feixe, quando radiado, exiba simetria axial e baixo nível de polarização cruzada e de lóbulos laterais. Para que seja obtido um diagrama de radiação com simetria axial, com níveis reduzidos de lóbulos secundários e baixa polarização cruzada, é necessário que a distribuição do campo na abertura da antena seja quase linear. Um campo elétrico linear jamais seria atingível com uma corneta lisa, que apenas suporta modos puros, e que cria linhas de campo curvas. Para alcançar um campo aproximadamente linear na abertura, será necessário utilizar cornetas corrugadas (híbridas), onde as corrugações nas paredes forçam o modo híbrido  $HE_{1n}$  ( $TE_{11} + TM_{11}$ ) o que permite uma melhor simetria nos diagramas, uma maior pureza de polarização e efeitos menores de difração nas bordas da corneta.



Figura 3.19: Campo elétrico na abertura de uma corneta corrugada.

#### 3.4.1 Antena cônica corruga para 60 GHz.

A diretividade das antenas do transmissor e do receptor são elementos críticos no projeto de um Sistema Rádio Móvel. A função das antenas é maximizar a transferência de energia entre o receptor e transmissor em toda situação de propagação.

Claramente, para o espaço livre num enlace ponto a ponto, a solução é incrementar o ganho da antena o mais possível, no entanto, no entorno do Rádio Móvel, a situação não é tão óbvia assim. A antena deve permitir transmissão entre o transmissor e o receptor, mesmo quando tem alguma obstrução na linha de visada e para tentar cumprir este objetivo, a antena captura os percursos alternativos disponíveis. A principal limitação do projeto da antena receptora é coletar o máximo possível da radiação transmitida. A maior parte da radiação é incidente num cone virado na direção do transmissor, mas alguma radiação é espalhada em todos os ângulos de azimute possíveis para chegar no receptor. Deste modo, uma escolha do diagrama de radiação para a antena receptora é um

padrão omnidirecional em azimute com uma resposta de elevação direcional, adaptada para a distribuição de ângulos de elevação. Este é o padrão de radiação usual adotado por unidades móveis, no entanto, este tipo de antena apenas responde a uma polarização e a antena do receptor precisa ser capaz de detectar o canal em todo tipo de polarização, pois os diversos percursos podem vir com diferentes polarizações.

Para sondar todo tipo de polarização, a antena deve ter diagramas de radiação iguais, quando seja alimentada por uma polarização horizontal ou vertical, e também, deve ter uma baixa resposta de polarização cruzada. Sabemos que qualquer polarização pode ser constituída a partir de uma combinação de duas polarizações ortogonais. Para atingir isto, a distribuição do Campo Elétrico e do campo Magnético através da abertura da antena deve ser simétrica. Em geral, este não é o caso de uma antena de abertura, porque as condições de contorno para os campos E e H nas bordas da abertura, aproximadamente as de um condutor perfeito, são diferentes. As distribuições dos campos podem ser igualadas alterando as condições de contorno de modo a que a antena suporte, equilibradamente, um modo híbrido que se aproxime a uma distribuição do coseno quadrado para os campos E e H em ambos planos, vertical e horizontal.

A antena corneta cónica corrugada, mostrada na Figura 3.20, tem um baixo nível de polarização cruzada, alta eficiência e por possuir simetria axial (simetria em torno do eixo de radiação), também apresenta uma maior largura de banda operacional que outras antenas, mas são complexas de construir.



Figura 3.20: Antena cônica corrugada

Se consideramos, entretanto, a restrição que a antena deve receber a maior quantidade de radiação espalhada, o problema de construção da antena corneta cônica se simplifica. Se o ângulo de abertura da antena é tornado igual a 90 °, a antena se torna um disco e as ondulações tornam-se ranhuras radiais. Este desenho dá à antena uma ampla largura de feixe que lhe permite receber a maior parte da radiação espalhada. A Figura 3.21



Figura 3.21: Antena cónica corrugada com abertura de 90º

# 3.5 Projeto da Antena Corneta Cónica 90º

O projeto inicial foi baseado no trabalho descrito em [6] e [11] onde a frequência de operação é de 55 GHz e os parâmetros utilizados são: [20].

Largura = width = 0,13  $\lambda$ Espaçamento = thickness = 0,05  $\lambda$ Profundidade = depth = 0,26  $\lambda$ Diámetro do Guia = d = 2 × a = 2 × 0,37 $\lambda$  Para o nosso trabalho, trabalharemos numa frequência de operação de 60 GHz, e partiremos de uma estrutura, já existente no laboratório e mostrada na Figura 3.22.



Figura 3.22: Desenho inicial da antena receptora, HFSS

As dimensões da antena são de 30 mm de comprimento, 19 mm de diâmetro no disco inferior e 26 mm de diâmetro no disco superior. Isto permite obter a distância mínima entre o transmissor e o receptor para poder trabalhar em campo distante:

$$df = \frac{2 \times D^2}{\lambda}$$
(3.19)

onde: df: Separação entre as duas regiões

D: O maior tamanho da antena

 $\lambda$ : Comprimento de onda

Para este caso em particular, com  $\lambda$  igual a 5 mm, *D* igual a 30 mm, encontramos um *df* igual a 360 mm, então as medições futuras deverão ter em conta esta distância mínima.

A primeira análise que faremos será variando o número de fendas ou ranhuras, tomando em conta os valores anteriormente mencionados, mas trabalhando em 60 GHz. O disco superior tem um diâmetro de 26 mm, então o número de fendas máximo será limitado por esta distância. No total, seria possível um número máximo de 12 fendas, então comparamos cada um deles e alguns dos desenhos finais são mostrados na Figura 3.23



Figura 3.23: Vista superior dos desenhos da antena com diferentes números de fendas

O objetivo da comparação de cada um dos projetos (de 0 a 12 fendas) é encontrar o de maior largura de feixe, sem descuidar o ganho da antena. Os resultados da comparação são mostrados nas Figuras 3.24 e 3.25.



Figura 3.24: Largura de Feixe da antena em relação ao número de fendas



Figura 3.25: Ganho da antena em relação ao número de fendas

Como podemos ver na Figura 3.24, a antena sem fendas é a que melhor largura de feixe tem, mas devido a que não tem fendas, não podemos variar no projeto para melhorar essa largura, então foram selecionadas para o nosso estudo antenas de 1 e 2 fendas. Mas como pode se observar na Figura 3.25, as antenas de 3 e 4 fendas são as que apresentam o melhor ganho, então também serão estudadas neste trabalho. Para a análise das antenas, os parâmetros da antena, que são largura de fenda, espaçamento entre fendas e profundidade da fenda, serão variados até encontrar o melhor valor possível de largura de feixe. Na análise, temos que considerar que para facilitar a construção das antenas, o departamento de Mecânica da PUC-Rio recomendou que as antenas deveriam ter uma largura de fenda mínima de  $0,2 \times \lambda$ ; um espaçamento entre fendas mínimo de  $0,2 \times \lambda$ ; e uma profundidade máxima de  $0,3 \times \lambda$ , onde  $\lambda = 5 mm$  para 60 GHz. Também temos que considerar uma borda externa de, pelo menos, 1 mm de espessura.

#### 3.5.1 Análise da antena com uma fenda

Primeiramente, vamos manter os valores da profundidade  $(0,26 \times \lambda)$  e da largura da fenda  $(0,2 \times \lambda)$  para variar os valores do espaçamento, começando em  $0,2 \times \lambda$  até alcançar um valor máximo possível de 1,83  $\times \lambda$ .

Profundidade	Largura da fenda	Espaçamento	Meia Largura de feixe
0,26	0,20	0,20	17,55
0,26	0,20	0,25	16,65
0,26	0,20	0,30	15,93
0,26	0,20	0,35	15,38
0,26	0,20	0,40	15,50
0,26	0,20	0,45	16,65
0,26	0,20	0,50	24,95
0,26	0,20	0,55	49,80
0,26	0,20	0,60	46,54
0,26	0,20	0,65	44,35
0,26	0,20	0,70	42,06
0,26	0,20	0,75	40,16
0,26	0,20	0,80	38,23
0,26	0,20	0,85	36,75
0,26	0,20	0,90	35,61
0,26	0,20	0,95	34,81
0,26	0,20	1,00	34,54
0,26	0,20	1,05	36,70
0,26	0,20	1,10	37,65
0,26	0,20	1,15	20,03
0,26	0,20	1,20	12,88
0,26	0,20	1,25	10,95
0,26	0,20	1,30	9,96
0,26	0,20	1,35	9,48
0,26	0,20	1,40	9,48
0,26	0,20	1,45	9,65
0,26	0,20	1,50	10,51
0,26	0,20	1,55	34,03
0,26	0,20	1,60	35,24
0,26	0,20	1,65	35,59
0,26	0,20	1,70	44,17
0,26	0,20	1,75	42,50
0,26	0,20	1,80	25,33
0,26	0,20	1,83	24,46

Tabela 3.1: Largura de feixe em relação ao espaçamento, com profundidade de fenda e largura de fenda fixos para antena com uma fenda

Desse jeito, encontrou-se o maior valor da largura de feixe de 49,80 graus por lado, pelo tanto uma largura de feixe total de 99,6 graus. Este valor foi obtido com um espaçamento de 0,55  $\times \lambda$ . Continuando com a análise, mantivemos o valor da profundidade e o espaçamento e variamos a largura da fenda.

Profundidade	Espaçamento	Largura de fenda	Meia Largura de feixe
0,26	0,20	0,20	17,56
0,26	0,20	0,25	16,76
0,26	0,20	0,30	16,06
0,26	0,20	0,35	15,44
0,26	0,20	0,40	14,84
0,26	0,20	0,45	14,07
0,26	0,20	0,50	12,90
0,26	0,20	0,55	10,84
0,26	0,20	0,60	8,41
0,26	0,20	0,65	9,17
0,26	0,20	0,70	15,79
0,26	0,20	0,75	21,67
0,26	0,20	0,80	22,95
0,26	0,20	0,85	23,91
0,26	0,20	0,90	24,82
0,26	0,20	0,95	25,67
0,26	0,20	1,00	26,18
0,26	0,20	1,05	25,62
0,26	0,20	1,10	24,63
0,26	0,20	1,15	23,04
0,26	0,20	1,20	13,64
0,26	0,20	1,25	10,75
0,26	0,20	1,30	10,14
0,26	0,20	1,35	9,81
0,26	0,20	1,40	9,54
0,26	0,20	1,45	9,10
0,26	0,20	1,50	8,51
0,26	0,20	1,55	7,75
0,26	0,20	1,60	6,99
0,26	0,20	1,65	6,37
0,26	0,20	1,70	6,37
0,26	0,20	1,75	7,78
0,26	0,20	1,80	14,13
0,26	0,20	1,83	17,62

Tabela 3.2: Largura de feixe em relação à largura de fenda, com profundidade e espaçamento fixos para antena com uma fenda

Como pode ser observado na Tabela 3.2, uma largura de feixe total de 52,36 graus foi obtida com uma largura de fenda de 1,00  $\times \lambda$ . Finalmente, a largura de fenda e o espaçamento foram mantidos e a profundidade foi variada. O resultado pode ser observado na tabela 3.3:

Largura da fenda	Espaçamento	Profundidade	Meia Largura de feixe
0,20	0,20	0,01	46,46
0,20	0,20	0,02	48,98
0,20	0,20	0,03	51,17
0,20	0,20	0,04	53,15
0,20	0,20	0,05	54,51
0,20	0,20	0,06	55,60
0,20	0,20	0,07	55,81
0,20	0,20	0,08	56,06
0,20	0,20	0,09	56,27
0,20	0,20	0,10	54,70
0,20	0,20	0,11	51,34
0,20	0,20	0,12	26,52
0,20	0,20	0,13	20,96
0,20	0,20	0,14	17,11
0,20	0,20	0,15	16,01
0,20	0,20	0,16	15,33
0,20	0,20	0,17	15,28
0,20	0,20	0,18	15,50
0,20	0,20	0,19	15,65
0,20	0,20	0,20	15,80
0,20	0,20	0,21	16,15
0,20	0,20	0,22	16,35
0,20	0,20	0,23	16,69
0,20	0,20	0,24	16,89
0,20	0,20	0,25	17,18
0,20	0,20	0,26	17,55
0,20	0,20	0,27	17,88
0,20	0,20	0,28	18,18
0,20	0,20	0,29	18,50
0,20	0,20	0,30	18,69

Tabela 3.3: Largura de feixe em relação à profundidade, com largura de fenda e espaçamento fixos. Antena com uma fenda

Observamos que uma largura de feixe de 112,54 graus foi obtida, com uma profundidade de  $0,09 \times \lambda$ . Então os nossos resultados seriam:

depth 0,26 ×  $\lambda$  + width 0,20 ×  $\lambda$  + *thickness* 0,55 ×  $\lambda$  → 99,60 graus depth 0,26 ×  $\lambda$  + thickness 0,20 ×  $\lambda$  + *width* 1,00 ×  $\lambda$  → 52,36 graus width 0,20 ×  $\lambda$  + thickness 0,20 ×  $\lambda$  + *depth* 0,09 ×  $\lambda$  → 112,54 graus Continuando com a análise, foram feitas mais simulações com os novos valores, escritos em itálico e negrita, este processo será repetido enquanto os valores da abertura de feixe seja maior que o anterior.

Largura da fenda	Espaçamento	Profundidade	Meia Largura de feixe
1,00	0,55	0,01	30,26
1,00	0,55	0,02	26,78
1,00	0,55	0,03	25,62
1,00	0,55	0,04	24,69
1,00	0,55	0,05	24,06
1,00	0,55	0,06	23,74
1,00	0,55	0,07	23,51
1,00	0,55	0,08	23,31
1,00	0,55	0,09	23,38
1,00	0,55	0,10	23,30
1,00	0,55	0,11	23,62
1,00	0,55	0,12	23,88
1,00	0,55	0,13	24,19
1,00	0,55	0,14	24,75
1,00	0,55	0,15	25,63
1,00	0,55	0,16	26,31
1,00	0,55	0,17	27,80
1,00	0,55	0,18	29,08
1,00	0,55	0,19	30,72
1,00	0,55	0,20	32,94
1,00	0,55	0,21	35,22
1,00	0,55	0,22	36,94
1,00	0,55	0,23	38,51
1,00	0,55	0,24	39,60
1,00	0,55	0,25	40,59
1,00	0,55	0,26	41,90
1,00	0,55	0,27	41,51
1,00	0,55	0,28	41,97
1,00	0,55	0,29	42,22
1,00	0,55	0,30	42,31

Tabela 3.4: Largura de feixe em relação à profundidade, com largura de fenda e espaçamento fixos, para antena com uma fenda, na segunda rodada de simulações

Na Tabela 3.4 foram mantidos os valores da largura de fenda e do espaçamento , variando a profundidade da fenda, na qual encontramos uma abertura de feixe total de 84,62 graus com uma profundidade de  $0,30 \times \lambda$ .

Profundidade	Espaçamento	Largura de fenda	Meia Largura de feixe
0,09	0,55	0,20	13,15
0,09	0,55	0,25	12,17
0,09	0,55	0,30	11,52
0,09	0,55	0,35	11,20
0,09	0,55	0,40	10,91
0,09	0,55	0,45	10,89
0,09	0,55	0,50	10,98
0,09	0,55	0,55	11,27
0,09	0,55	0,60	11,66
0,09	0,55	0,65	12,67
0,09	0,55	0,70	14,56
0,09	0,55	0,75	18,06
0,09	0,55	0,80	21,32
0,09	0,55	0,85	22,75
0,09	0,55	0,90	23,38
0,09	0,55	0,95	23,55
0,09	0,55	1,00	23,38
0,09	0,55	1,05	23,07
0,09	0,55	1,10	22,69
0,09	0,55	1,15	21,66
0,09	0,55	1,20	20,13
0,09	0,55	1,25	17,86
0,09	0,55	1,30	14,92
0,09	0,55	1,35	12,31
0,09	0,55	1,40	10,58
0,09	0,55	1,45	9,58

Tabela 3.5: Largura de feixe em relação à largura de fenda, com profundidade e espaçamento fixos, para antena com uma fenda, na segunda rodada de simulações

Na Tabela 3.5, o valor da largura de fenda foi variada e encontrou-se uma abertura de feixe total de 47,10 graus com uma largura de fenda de 0,95  $\times \lambda$ . Finalmente na Tabela 3.6, o espaçamento foi variado e encontrou-se uma abertura de fenda total de 68,58 graus com um espaçamento entre fendas de 0,85  $\times \lambda$ .

Profundidade	Largura da fenda	Espaçamento	Meia Largura de feixe
0,09	1,00	0,20	17,30
0,09	1,00	0,25	20,38
0,09	1,00	0,30	21,43
0,09	1,00	0,35	21,84
0,09	1,00	0,40	22,06
0,09	1,00	0,45	22,22
0,09	1,00	0,50	22,90
0,09	1,00	0,55	22,90
0,09	1,00	0,60	23,26
0,09	1,00	0,65	24,28
0,09	1,00	0,70	26,12
0,09	1,00	0,75	32,06
0,09	1,00	0,80	33,97
0,09	1,00	0,85	34,29
0,09	1,00	0,90	33,78
0,09	1,00	0,95	33,22
0,09	1,00	1,00	32,65
0,09	1,00	1,03	32,26

Tabela 3.6: Largura de feixe em relação ao espaçamento, com largura de fenda e profundidade fixos para antena com uma fenda, na segunda rodada de simulações.

O resumo dos resultados desta segunda rodada de simulações é dado a seguir:

depth 0,09 ×  $\lambda$  + width 1,00 ×  $\lambda$  + *tickness* 0,85 ×  $\lambda \rightarrow 68,58$  graus depth 0,09 ×  $\lambda$  + tickness 0,55 ×  $\lambda$  + *width* 0,95 ×  $\lambda \rightarrow 47,10$  graus width 1,00 ×  $\lambda$  + tickness 0,55 ×  $\lambda$  + *depth* 0,30 ×  $\lambda \rightarrow 84,62$  graus

Como pode ser observado, não foi possível melhorar os 112,54 graus de largura de feixe obtidos com uma profundidade de fenda de  $0,09 \times \lambda$ , um espaçamento entre fendas e uma largura de fenda de  $0,2 \times \lambda$ , para ambos parâmetros, então o projeto final da antena com uma fenda terá essas características.

Na Figura 3.26 pode se observar o diagrama de radiação da antena, tanto em phi 0 (linha cheia) como em phi 90 (linha pontilhada), este último conhecido como diagrama vertical da antena.



Figura 3.26: Diagrama de irradiação polar da antena com 1 fenda

Para poder observar a abertura de feixe total, foi subtraído o máximo valor de potência a todos os pontos, dessa forma, o maior valor ficou em 0 e, para encontrar a abertura, só foi traçada uma linha em -3 dB, que representa a abertura de meia potência. Isto é mostrado na figura 3.27, onde podemos observar os 112 graus de largura de feixe da antena com um ganho de 7,32 dB mostrado na figura 3.28, que mostra o ganho em phi 0 (linha cheia) e em phi 90 (linha pontilhada).



Figura 3.27: Largura de feixe da antena com 1 fenda.



Figura 3.28: Ganho da antena com 1 fenda.

# 3.5.2 Análise da antena com duas fendas

Primeiramente, vamos manter os valores da profundidade  $(0,26 \times \lambda)$  e da largura da fenda  $(0,2 \times \lambda)$ , para variar os valores do espaçamento, começando em  $0,2 \times \lambda$  até alcançar um valor máximo possível de  $0,815 \times \lambda$ .

Profundidade	Largura da fenda	Espaçamento	Meia Largura de feixe
0,26	0,20	0,200	18,17
0,26	0,20	0,250	20,43
0,26	0,20	0,300	23,77
0,26	0,20	0,350	24,87
0,26	0,20	0,400	23,56
0,26	0,20	0,450	21,17
0,26	0,20	0,500	19,11
0,26	0,20	0,550	47,24
0,26	0,20	0,600	45,66
0,26	0,20	0,650	43,27
0,26	0,20	0,700	41,32
0,26	0,20	0,750	39,72
0,26	0,20	0,800	38,39
0,26	0,20	0,815	38,07

Tabela 3.7: Largura de feixe em relação ao espaçamento, com largura de fenda e profundidade fixos, para antena com duas fendas.

Na tabela 3.7 identifica-se uma abertura de feixe total de 94,48 graus, com um espaçamento entre fendas de 0,550  $\times \lambda$ .

Largura da fenda	Espaçamento	Profundidade	Meia Largura de feixe
0,20	0,20	0,01	43,22
0,20	0,20	0,02	44,29
0,20	0,20	0,03	44,80
0,20	0,20	0,04	24,96
0,20	0,20	0,05	22,13
0,20	0,20	0,06	17,77
0,20	0,20	0,07	13,59
0,20	0,20	0,08	11,63
0,20	0,20	0,09	10,72
0,20	0,20	0,10	10,52
0,20	0,20	0,11	10,88
0,20	0,20	0,12	13,37
0,20	0,20	0,13	22,32
0,20	0,20	0,14	25,81
0,20	0,20	0,15	26,41
0,20	0,20	0,16	25,39
0,20	0,20	0,17	23,78
0,20	0,20	0,18	21,67
0,20	0,20	0,19	20,16
0,20	0,20	0,20	18,88
0,20	0,20	0,21	18,24
0,20	0,20	0,22	17,75
0,20	0,20	0,23	17,54
0,20	0,20	0,24	17,56
0,20	0,20	0,25	17,81
0,20	0,20	0,26	18,17
0,20	0,20	0,27	18,53
0,20	0,20	0,28	19,00
0,20	0,20	0,29	19,87
0,20	0,20	0,30	20,51

Tabela 3.8: Largura de feixe em relação à profundidade, com espaçamento e largura de fenda fixos, para antena com duas fendas.

Na tabela 3.8, identifica-se uma abertura de feixe total de 89,6 graus, com uma profundidade de 0,03 ×  $\lambda$  e, finalmente, na Tabela 3.9, a máxima abertura de feixe total é 47,24 graus, com uma largura de fenda de 0,4 ×  $\lambda$ .

Profundidade	Espaçamento	Largura da fenda	Meia Largura de feixe
0,26	0,20	0,200	18,17
0,26	0,20	0,250	19,57
0,26	0,20	0,300	21,38
0,26	0,20	0,350	23,06
0,26	0,20	0,400	23,62
0,26	0,20	0,450	22,63
0,26	0,20	0,500	18,42
0,26	0,20	0,550	10,22
0,26	0,20	0,600	6,02
0,26	0,20	0,650	7,55
0,26	0,20	0,700	13,65
0,26	0,20	0,750	16,27
0,26	0,20	0,800	17,62
0,26	0,20	0,815	17,85

Tabela 3.9: Largura de feixe em relação à largura de fenda, com espaçamento e profundidade fixos, para antena com duas fendas.

O resumo dos resultados das primeiras combinações dos valores dos parâmetros do projeto da antena com duas fendas é:

depth 0,26 × $\lambda$ + width 0,20 × $\lambda$ + <i>thickness</i> 0,55 × $\lambda$	$\rightarrow$	94,48 graus
depth 0,26 × $\lambda$ + thickness 0,20 × $\lambda$ + <i>width</i> 0,40 × $\lambda$	$\rightarrow$	47,24 graus
width 0,20 × $\lambda$ + thickness 0,20 × $\lambda$ + <i>depth</i> 0,03 × $\lambda$	$\rightarrow$	89,60 graus

Para a segunda rodada de simulações, serão utilizados os valores acima descritos em itálica e cursiva.

Profundidade	Espaçamento	Largura da fenda	Meia Largura de feixe
0,03	0,55	0,200	27,95
0,03	0,55	0,250	25,57
0,03	0,55	0,300	22,89
0,03	0,55	0,350	20,37
0,03	0,55	0,400	16,59
0,03	0,55	0,450	14,03
0,03	0,55	0,465	13,27

Tabela 3.10: Largura de feixe em relação à largura de fenda, com espaçamento e profundidade fixos, para antena com duas fendas na segunda rodada.

Na tabela 3.10, a profundidade de fenda e o espaçamento são mantidos, e a largura de fenda é variada, desse jeito foi conseguida uma abertura de 55,90 graus.

Largura da fenda	Espaçamento	Profundidade	Meia Largura de feixe
0,40	0,55	0,01	27,53
0,40	0,55	0,02	21,93
0,40	0,55	0,03	16,34
0,40	0,55	0,04	12,83
0,40	0,55	0,05	10,64
0,40	0,55	0,06	9,31
0,40	0,55	0,07	8,30
0,40	0,55	0,08	7,62
0,40	0,55	0,09	7,14
0,40	0,55	0,10	6,82
0,40	0,55	0,11	6,63
0,40	0,55	0,12	6,49
0,40	0,55	0,13	6,50
0,40	0,55	0,14	6,58
0,40	0,55	0,15	6,70
0,40	0,55	0,16	6,94
0,40	0,55	0,17	7,18
0,40	0,55	0,18	7,58
0,40	0,55	0,19	8,10
0,40	0,55	0,20	8,65
0,40	0,55	0,21	36,96
0,40	0,55	0,22	40,96
0,40	0,55	0,23	43,66
0,40	0,55	0,24	44,11
0,40	0,55	0,25	44,10
0,40	0,55	0,26	44,02
0,40	0,55	0,27	43,81
0,40	0,55	0,28	43,63
0,40	0,55	0,29	43,68
0,40	0,55	0,30	43,66

Tabela 3.11: Largura de feixe em relação à profundidade, com espaçamento e largura de fenda fixos, para antena com duas fendas na segunda rodada.

Na tabela 3.11 foi obtida uma largura de feixe de 88,22 graus, com uma profundidade de fenda de 0,24  $\times \lambda$  e, na Tabela 3.12, uma abertura de 99,32 graus, com um espaçamento entre fendas de 0,2  $\times \lambda$ .

Profundidade	Largura da fenda	Espaçamento	Meia Largura de feixe
0,03	0,40	0,200	49,66
0,03	0,40	0,250	45,90
0,03	0,40	0,300	36,26
0,03	0,40	0,350	30,58
0,03	0,40	0,400	27,92
0,03	0,40	0,450	24,54
0,03	0,40	0,500	20,69
0,03	0,40	0,550	16,59
0,03	0,40	0,600	13,94
0,03	0,40	0,615	13,42

Tabela 3.12: Largura de feixe em relação ao espaçamento, com largura de fenda e profundidade fixos, para antena com duas fendas na segunda rodada.

O resumo de resultados desta segunda rodada de simulações é descrito a seguir:

depth 0,03 × $\lambda$ + width 0,40 × $\lambda$ + <i>thickness</i> 0,20 × $\lambda$	$\rightarrow$	99,32 graus
depth 0,03 × $\lambda$ + thickness 0,55 × $\lambda$ + <i>width</i> 0,20 × $\lambda$	$\rightarrow$	55,90 graus
width 0,40 × $\lambda$ + thickness 0,55 × $\lambda$ + <i>depth</i> 0,25 × $\lambda$	$\rightarrow$	88,20 graus

Como pode se observar, os novos valores de *thickness* e *width* apresentam valores de largura de feixe total maiores que os anteriores, pelo qual teríamos que combinar estes valores e variar a profundidade da fenda (*depth*) para verificar se pode ser encontrado um valor de largura de feixe maior aos já encontrados até agora, porém esta combinação já foi realizada na primeira rodada de simulações, e foi obtida, uma largura de feixe de 89,6 graus, com uma profundidade de 0,03  $\times$   $\lambda$ . Assim, o melhor resultado obtido para a antena de duas fendas é de 99,32 graus.

Na Figura 3.29, pode se observar o diagrama de radiação da antena, tanto em phi 0 (linha cheia) como em phi 90 (linha pontilhada).



Figura 3.29: Diagrama de irradiação polar da antena com 2 fendas

Para poder observar a abertura de feixe total, foi subtraído o máximo valor de Potência a todos os pontos, dessa forma, o maior valor ficou em 0 e para encontrar a abertura só foi traçada uma linha em -3 dB, que representa a abertura de meia potência. Isto é mostrado na figura 3.30, onde podemos observar os 99 graus de largura de feixe da antena, com um ganho de 7,94 dB, mostrado na figura 3.31, que indica o ganho em phi 0 (linha cheia) e em phi 90 (linha pontilhada).



Figura 3.30: Largura de feixe polar da antena com 2 fendas.



Figura 3.31: Ganho da antena com 2 fendas.

## 3.5.3 Análise da antena com três fendas

Primeiramente, vamos manter os valores da profundidade  $(0,26 \times \lambda)$  e da largura da fenda  $(0,2 \times \lambda)$ , para variar os valores do espaçamento, começando em  $0,2 \times \lambda$  até alcançar um valor máximo possível de  $0,47 \times \lambda$ 

Profundidade	Largura da fenda	Espaçamento	Meia Largura de feixe
0,26	0,20	0,20	22,45
0,26	0,20	0,23	22,94
0,26	0,20	0,26	23,16
0,26	0,20	0,29	23,01
0,26	0,20	0,32	22,60
0,26	0,20	0,35	21,76
0,26	0,20	0,38	21,13
0,26	0,20	0,41	20,71
0,26	0,20	0,44	20,54
0,26	0,20	0,47	20,14

Tabela 3.13: Largura de feixe em relação ao espaçamento, com largura de fenda e profundidade fixos, para antena com três fendas.

Na Tabela 3.13, uma largura de feixe de 46,32 graus é obtida com um espaçamento de 0,26  $\times \lambda$ .

Na tabela 3.14 uma largura de feixe total de 93,8 graus foi obtida, com uma profundidade de fenda de 0,05 ×  $\lambda$ , e na tabela 3.15, pode se observar uma largura de feixe de 44,90 graus com uma largura de fenda de 0,20 ×  $\lambda$ .

Largura da fenda	Espaçamento	Profundidade	Meia Largura de feixe
0,20	0,20	0,01	43,65
0,20	0,20	0,02	45,08
0,20	0,20	0,03	46,32
0,20	0,20	0,04	45,87
0,20	0,20	0,05	46,90
0,20	0,20	0,06	29,46
0,20	0,20	0,07	29,45
0,20	0,20	0,08	29,41
0,20	0,20	0,09	28,66
0,20	0,20	0,10	28,41
0,20	0,20	0,11	28,90
0,20	0,20	0,12	30,52
0,20	0,20	0,13	29,65
0,20	0,20	0,14	23,93
0,20	0,20	0,15	20,97
0,20	0,20	0,16	20,49
0,20	0,20	0,17	20,16
0,20	0,20	0,18	19,97
0,20	0,20	0,19	19,67
0,20	0,20	0,20	19,59
0,20	0,20	0,21	19,47
0,20	0,20	0,22	19,72
0,20	0,20	0,23	20,09
0,20	0,20	0,24	20,70
0,20	0,20	0,25	21,46
0,20	0,20	0,26	22,45
0,20	0,20	0,27	23,48
0,20	0,20	0,28	24,56
0,20	0,20	0,29	25,52
0,20	0,20	0,30	26,47

Tabela 3.14: Largura de feixe em relação à profundidade, com largura de fenda e espaçamento fixos, para antena com três fendas.

Profundidade	Espaçamento	Largura da fenda	Meia Largura de feixe
0,26	0,20	0,20	22,45
0,26	0,20	0,23	22,35
0,26	0,20	0,26	22,11
0,26	0,20	0,29	22,01
0,26	0,20	0,32	21,48
0,26	0,20	0,35	21,20
0,26	0,20	0,38	20,91
0,26	0,20	0,41	20,99
0,26	0,20	0,44	21,07
0,26	0,20	0,47	21,05

Tabela 3.15: Largura de feixe em relação à largura de fenda, com profundidade e espaçamento fixos para antena com três fendas.

O resumo dos resultados obtidos nesta primeira rodada, para a antena de três fendas, é:

depth 0,26 ×  $\lambda$  + width 0,20 ×  $\lambda$  + *thickness* 0,26 ×  $\lambda \rightarrow 46,32$  graus depth 0,26 ×  $\lambda$  + thickness 0,20 ×  $\lambda$  + *width* 0,20 ×  $\lambda \rightarrow 44,90$  graus width 0,20 ×  $\lambda$  + thickness 0,20 ×  $\lambda$  + *depth* 0,05 ×  $\lambda \rightarrow 93,80$  graus

Os valores mostrados, em itálica e negrita, no resumo foram utilizados para a nova rodada de simulações

Profundidade	Espaçamento	Largura da fenda	Meia Largura de feixe
0,05	0,26	0,20	52,90
0,05	0,26	0,23	53,84
0,05	0,26	0,26	52,30
0,05	0,26	0,29	48,73
0,05	0,26	0,32	44,96
0,05	0,26	0,35	40,67
0,05	0,26	0,38	37,62
0,05	0,26	0,41	36,08

Tabela 3.16: Largura de feixe em relação à largura de fenda, com profundidade e espaçamento fixos, para antena com três fendas na segunda rodada.

Largura de feixe de 107,68 graus foi obtida, com uma largura de fenda de  $0,23 \times \lambda$ , mantendo os novos valores da profundidade da fenda e do espaçamento entre as fendas.

Largura da fenda	Espaçamento	Profundidade	Meia Largura de feixe
0,20	0,26	0,01	44,03
0,20	0,26	0,02	45,02
0,20	0,26	0,03	48,06
0,20	0,26	0,04	50,18
0,20	0,26	0,05	52,91
0,20	0,26	0,06	54,71
0,20	0,26	0,07	55,38
0,20	0,26	0,08	55,22
0,20	0,26	0,09	29,34
0,20	0,26	0,10	28,90
0,20	0,26	0,11	28,22
0,20	0,26	0,12	25,42
0,20	0,26	0,13	20,91
0,20	0,26	0,14	19,24
0,20	0,26	0,15	19,07
0,20	0,26	0,16	19,17
0,20	0,26	0,17	19,32
0,20	0,26	0,18	19,04
0,20	0,26	0,19	18,77
0,20	0,26	0,20	18,77
0,20	0,26	0,21	18,98
0,20	0,26	0,22	19,37
0,20	0,26	0,23	20,08
0,20	0,26	0,24	20,84
0,20	0,26	0,25	22,15
0,20	0,26	0,26	23,08
0,20	0,26	0,27	24,44
0,20	0,26	0,28	25,27
0,20	0,26	0,29	26,24
0,20	0,26	0,30	27,16

Tabela 3.17: Largura de feixe em relação à profundidade, com largura de fenda e espaçamento fixos para antena com três fendas, na segunda rodada.

Na Tabela 3.17, com uma profundidade de fenda de  $0,07 \times \lambda$ , verifica-se uma largura de feixe total de 110,76 graus e, na tabela 3.18, foi encontrada uma largura de feixe de 105,82 graus.

Profundidade	Largura da fenda	Espaçamento	Meia Largura de feixe
0,05	0,20	0,20	46,01
0,05	0,20	0,23	50,07
0,05	0,20	0,26	52,91
0,05	0,20	0,29	51,49
0,05	0,20	0,32	47,13
0,05	0,20	0,35	31,88
0,05	0,20	0,38	32,40
0,05	0,20	0,41	31,41
0,05	0,20	0,44	30,79
0,05	0,20	0,47	29,40

Tabela 3.18: Largura de feixe em relação ao espaçamento, com profundidade e largura de fenda fixos, para antena com três fendas na segunda rodada.

Resumindo esta segunda rodada de simulações para a antena de três fendas, tem-se:

depth 0,05 ×  $\lambda$  + width 0,20 ×  $\lambda$  + *thickness* 0,26 ×  $\lambda$  → 105,82 graus depth 0,05 ×  $\lambda$  + thickness 0,26 ×  $\lambda$  + *width* 0,23 ×  $\lambda$  → 107,68 graus width 0,20 ×  $\lambda$  + thickness 0,26 ×  $\lambda$  + *depth* 0,07 ×  $\lambda$  → 110,76 graus

Como pode ser observado, todos os valores de largura de feixe são maiores que os anteriores, então uma nova rodada de simulações deve ser feita com os valores descritos acima, em itálica e negrita.

Profundidade	Espaçamento	Largura da fenda	Meia Largura de feixe
0,07	0,26	0,20	55,85
0,07	0,26	0,23	52,07
0,07	0,26	0,26	30,35
0,07	0,26	0,29	31,97
0,07	0,26	0,32	33,86
0,07	0,26	0,35	34,22
0,07	0,26	0,38	34,47
0,07	0,26	0,41	33,91

Tabela 3.19: Largura de feixe em relação à largura de fenda, com profundidade e espaçamento fixos, para antena com três fendas na terceira rodada.

Na tabela 3.19 uma largura de feixe total de 111,70 graus foi obtida, com uma largura de fenda de 0,20  $\times \lambda$ .

Largura da fenda	Espaçamento	Profundidade	Meia Largura de feixe	
0,23	0,26	0,01	45,33	
0,23	0,26	0,02	48,06	
0,23	0,26	0,03	50,21	
0,23	0,26	0,04	52,53	
0,23	0,26	0,05	53,83	
0,23	0,26	0,06	54,32	
0,23	0,26	0,07	52,59	
0,23	0,26	0,08	29,41	
0,23	0,26	0,09	29,16	
0,23	0,26	0,10	28,49	
0,23	0,26	0,11	27,28	
0,23	0,26	0,12	23,13	
0,23	0,26	0,13	20,12	
0,23	0,26	0,14	19,73	
0,23	0,26	0,15	19,52	
0,23	0,26	0,16	19,57	
0,23	0,26	0,17	19,37	
0,23	0,26	0,18	19,15	
0,23	0,26	0,19	18,95	
0,23	0,26	0,20	18,73	
0,23	0,26	0,21	18,95	
0,23	0,26	0,22	19,21	
0,23	0,26	0,23	19,87	
0,23	0,26	0,24	20,48	
0,23	0,26	0,25	21,33	
0,23	0,26	0,26	22,32	
0,23	0,26	0,27	23,27	
0,23	0,26	0,28	24,32	
0,23	0,26	0,29	25,23	
0,23	0,26	0,30	26,46	

Tabela 3.20: Largura de feixe em relação à profundidade com largura de fenda e espaçamento fixos, para antena com três fendas na terceira rodada.

Na Tabela 3.20, observa-se uma largura de feixe de 108,64 graus, com uma profundidade de 0,06 ×  $\lambda$  e, na tabela 3.21, pode se observar uma largura de feixe de 115,76 graus, com um espaçamento entre fendas de 0,20 ×  $\lambda$ .

Profundidade	Largura da fenda	Espaçamento	Meia Largura de feixe
0,07	0,23	0,20	57,88
0,07	0,23	0,23	57,75
0,07	0,23	0,26	52,58
0,07	0,23	0,29	29,79
0,07	0,23	0,32	30,81
0,07	0,23	0,35	30,70
0,07	0,23	0,38	30,65
0,07	0,23	0,41	29,97
0,07	0,23	0,44	28,58

Tabela 3.21: Largura de feixe em relação ao espaçamento com largura de fenda e profundidade fixos, para antena com três fendas na terceira rodada.

O resumo desta terceira rodada de simulações está descrito a seguir:

depth	0,07	×	$\lambda$ + width 0,23 × $\lambda$	+ thickness 0, 2	$0 \times \lambda$	$\rightarrow$	115,76 graus
depth	0,07	×	$\lambda$ + thickness 0,26	$\times \lambda + width 0, 20$	$\times \lambda$	$\rightarrow$	111,70 graus
width	0,23	×	$\lambda$ + thickness 0,26	$\times \lambda + depth 0,06$	×λ	$\rightarrow$	108,64 graus

Vemos que os valores da largura de feixe total, obtidos com a variação do espaçamento (*thickness*) e da largura de fenda (*width*), são maiores que os valores anteriormente obtidos, pelo qual uma nova rodada de simulações deve ser feita, mas a combinação de  $0,20 \times \lambda$  para o espaçamento e a largura de fenda já foi feita na primeira rodada de simulações, então os valores finais dos parâmetros para o projeto da antena de três fendas serão aqueles que se obteve uma largura de feixe de 115,76 graus.

Na Figura 3.32, pode se observar o diagrama de radiação da antena, tanto em phi 0 (linha cheia) como em phi 90 (linha pontilhada).



Figura 3.32: Diagrama de irradiação polar da antena com 3 fendas

Para poder observar a abertura de feixe total, foi substraído o máximo valor de potência a todos os pontos, dessa forma o maior valor ficou em 0 e para encontrar a abertura só foi traçada uma linha em -3 dB, que representa a abertura de meia potência. Isto é mostrado na figura 3.33, onde podemos observar os 115 graus de largura de feixe da antena, com um ganho de 7,25 dB, mostrado na figura 3.34, indicando o ganho em phi 0 (linha cheia) e em phi 90 (linha pontilhada).



Figura 3.33: Largura de feixe da antena com 3 fendas.



Figura 3.34: Ganho da antena com 3 fendas.

# 3.5.4 Análise da antena com quatro fendas

Primeiramente, vamos manter os valores da profundidade  $(0,26 \times \lambda)$  e da largura da fenda  $(0,2 \times \lambda)$ , para variar os valores do espaçamento, começando em  $0,2 \times \lambda$ , até alcançar um valor máximo possível de  $0,30 \times \lambda$ .

Na tabela 3.22 observa-se uma largura de feixe total de 44,30 graus, com um espaçamento entre fendas de 0,29 ×  $\lambda$ . Na tabela 3.23, pode se observar uma largura de feixe de 102,36 graus, com uma profundidade de fenda de 0,06 ×  $\lambda$ .

Profundidade	Largura da fenda	Espaçamento	Meia Largura de feixe
0,26	0,20	0,21	21,91
0,26	0,20	0,22	21,71
0,26	0,20	0,23	21,91
0,26	0,20	0,24	21,78
0,26	0,20	0,25	21,83
0,26	0,20	0,26	21,91
0,26	0,20	0,27	21,78
0,26	0,20	0,28	22,10
0,26	0,20	0,29	22,15
0,26	0,20	0,30	22,03

Tabela 3.22: Largura de feixe em relação ao espaçamento com largura de fenda e profundidade fixos, para antena com quatro fendas.

Largura da fenda	Espaçamento	Profundidade	Meia Largura de feixe
0,20	0,20	0,01	44,28
0,20	0,20	0,02	46,99
0,20	0,20	0,03	48,98
0,20	0,20	0,04	50,13
0,20	0,20	0,05	51,18
0,20	0,20	0,06	50,78
0,20	0,20	0,07	28,60
0,20	0,20	0,08	28,11
0,20	0,20	0,09	26,98
0,20	0,20	0,10	7,28
0,20	0,20	0,11	7,25
0,20	0,20	0,12	11,99
0,20	0,20	0,13	23,76
0,20	0,20	0,14	23,69
0,20	0,20	0,15	23,50
0,20	0,20	0,16	22,64
0,20	0,20	0,17	21,43
0,20	0,20	0,18	20,53
0,20	0,20	0,19	19,97
0,20	0,20	0,20	19,50
0,20	0,20	0,21	19,22
0,20	0,20	0,22	19,35
0,20	0,20	0,23	19,62
0,20	0,20	0,24	20,24
0,20	0,20	0,25	21,01
0,20	0,20	0,26	22,01
0,20	0,20	0,27	22,62
0,20	0,20	0,28	23,84
0,20	0,20	0,29	24,70
0,20	0,20	0,30	25,68

Tabela 3.23: Largura de feixe em relação à profundidade, com largura de fenda e espaçamento fixos, para antena com quatro fendas.

Na tabela 3.24 se observa uma largura de feixe total de 43,40 graus, com uma largura de fenda de  $0,21 \times \lambda$ , um espaçamento entre fendas de  $0,20 \times \lambda$  e uma profundidade de  $0,26 \times \lambda$ .

Profundidade	Espaçamento	Largura da fenda	Meia Largura de feixe
0,26	0,20	0,21	21,70
0,26	0,20	0,22	21,62
0,26	0,20	0,23	21,34
0,26	0,20	0,24	21,16
0,26	0,20	0,25	21,14
0,26	0,20	0,26	21,16
0,26	0,20	0,27	21,17
0,26	0,20	0,28	20,96
0,26	0,20	0,29	21,08
0,26	0,20	0,30	21,10

Tabela 3.24: Largura de feixe em relação à largura de fenda, com profundidade e espaçamento fixos, para antena com quatro fendas.

Resumindo os resultados obtidos nas simulações para a antena de quatro fendas, tem-se:

depth 0,26 ×  $\lambda$  + width 0,20 ×  $\lambda$  + *thickness* 0,29 ×  $\lambda \rightarrow 44,30$  graus depth 0,26 ×  $\lambda$  + thickness 0,20 ×  $\lambda$  + *width* 0,21 ×  $\lambda \rightarrow 43,40$  graus width 0,20 ×  $\lambda$  + thickness 0,20 ×  $\lambda$  + *depth* 0,05 ×  $\lambda \rightarrow 102,36$  graus

A segunda rodada de simulações foi feita com os valores em itálica e negrita do resumo anterior e as tabelas a seguir mostram os resultados obtidos.

Profundidade	Largura da fenda	Espaçamento	Meia Largura de feixe
0,05	0,21	0,20	50,21
0,05	0,21	0,21	47,96
0,05	0,21	0,22	29,95
0,05	0,21	0,23	29,92
0,05	0,21	0,24	30,16
0,05	0,21	0,25	30,37
0,05	0,21	0,26	29,96
0,05	0,21	0,27	30,03
0,05	0,21	0,28	30,01
0,05	0,21	0,29	30,17

Tabela 3.25: Largura de feixe em relação ao espaçamento com largura de fenda e profundidade fixos, para antena com quatro fendas na segunda rodada.

Na Tabela 3.25, 100,42 graus de largura de feixe total foi obtida com um espaçamento de  $0,20 \times \lambda$ . Na Tabela 3.26 foram obtidos 85,06 graus de largura de feixe total, com uma profundidade de  $0,01 \times \lambda$ , um espaçamento entre fendas de  $0,29 \times \lambda$  e uma largura de fenda de  $0,21 \times \lambda$ .

Largura da fenda	Espaçamento	Profundidade	Meia Largura de feixe
0,21	0,29	0,01	42,53
0,21	0,29	0,02	42,27
0,21	0,29	0,03	32,62
0,21	0,29	0,04	31,15
0,21	0,29	0,05	30,17
0,21	0,29	0,06	29,55
0,21	0,29	0,07	29,00
0,21	0,29	0,08	28,80
0,21	0,29	0,09	28,87
0,21	0,29	0,10	29,23
0,21	0,29	0,11	28,66
0,21	0,29	0,12	26,82
0,21	0,29	0,13	25,12
0,21	0,29	0,14	24,01
0,21	0,29	0,15	22,81
0,21	0,29	0,16	21,63
0,21	0,29	0,17	20,41
0,21	0,29	0,18	19,52
0,21	0,29	0,19	18,66
0,21	0,29	0,20	18,36
0,21	0,29	0,21	18,39
0,21	0,29	0,22	18,69
0,21	0,29	0,23	19,26
0,21	0,29	0,24	19,88
0,21	0,29	0,25	20,88
0,21	0,29	0,26	22,00
0,21	0,29	0,27	23,04
0,21	0,29	0,28	24,13
0,21	0,29	0,29	25,27
0,21	0,29	0,30	26,39

Tabela 3.26: Largura de feixe em relação à profundidade, com largura de fenda e espaçamento fixos, para antena com quatro fendas, na segunda rodada.

Na tabela 3.27, uma largura de feixe total de 60,40 graus foi obtida com uma largura de fenda de  $0,22 \times \lambda$  com um espaçamento entre fendas de  $0,29 \times \lambda$ e uma profundidade de fenda de  $0,05 \times \lambda$ .

Profundidade	Espaçamento	Largura da fenda	Meia Largura de feixe
0,05	0,29	0,20	29,94
0,05	0,29	0,21	30,17
0,05	0,29	0,22	30,20

Tabela 3.27: Largura de feixe em relação à largura de fenda, com profundidade e espaçamento fixos, para antena com quatro fendas, na segunda rodada.

O resumo dos resultados obtidos na segunda rodada de simulações, para a antena de quatro fendas é:

depth	0,05	×	λ+	width	0,21	×λ	+ ۱	thic	kness	0,20	X	λ	$\rightarrow$	100,42	graus
depth	0,05	×	λ+	thick	ness (	),29	×	λ+и	vidth	0,22	×	λ	$\rightarrow$	60,40	graus
width	0,21	×	λ+	thick	ness (	),29	×	$\lambda + d$	lepth	0,01	×	λ	$\rightarrow$	85,06	graus

Podemos observar que os novos valores de largura de feixe, obtidos perla variação do espaçamento entre fendas e da largura de fenda, são maiores que os valores anteriores, então uma nova rodada de simulações deve ser feita e os resultados estão mostrados na tabela 3.28, onde o maior valor de largura de feixe obtido é de 98,20 graus, com uma profundidade de  $0,04 \times \lambda$ , um espaçamento entre fendas de  $0,20 \times \lambda$  e uma largura de fenda de  $0,22 \times \lambda$ .

Largura da fenda	Espaçamento	Profundidade	Meia Largura de feixe
0,22	0,20	0,01	43,65
0,22	0,20	0,02	47,01
0,22	0,20	0,03	48,67
0,22	0,20	0,04	49,10
0,22	0,20	0,05	48,17
0,22	0,20	0,06	29,04
0,22	0,20	0,07	28,49
0,22	0,20	0,08	27,70
0,22	0,20	0,09	26,00
0,22	0,20	0,10	7,46
0,22	0,20	0,11	10,47
0,22	0,20	0,12	24,48

0,22	0,20	0,13	24,67
0,22	0,20	0,14	24,25
0,22	0,20	0,15	23,45
0,22	0,20	0,16	22,42
0,22	0,20	0,17	21,41
0,22	0,20	0,18	20,56
0,22	0,20	0,19	19,71
0,22	0,20	0,20	19,48
0,22	0,20	0,21	19,31
0,22	0,20	0,22	19,38
0,22	0,20	0,23	19,64
0,22	0,20	0,24	20,24
0,22	0,20	0,25	20,82
0,22	0,20	0,26	21,64
0,22	0,20	0,27	22,35
0,22	0,20	0,28	23,31
0,22	0,20	0,29	24,32
0,22	0,20	0,30	25,28

Tabela 3.28: Largura de feixe em relação à profundidade, com largura de fenda e espaçamento fixos, para antena com quatro fendas, na terceira rodada.

Os valores finais dos parâmetros para o projeto da antena de quatro fendas serão aqueles que se obteve uma largura de feixe de 102,36 graus. Na Figura 3.35, pode se observar o diagrama de radiação da antena, tanto em phi 0 (linha cheia) como em phi 90 (linha pontilhada).



Figura 3.35: Diagrama de irradiação polar da antena com 4 fendas

Para poder observar a abertura de feixe total, foi substraído o máximo valor de potência a todos os pontos, dessa forma o maior valor ficou em 0 e para encontrar a abertura só foi traçada uma linha em -3 dB que representa a abertura de media potência. Isto é mostrado na figura 3.36, onde podemos observar os 102 graus de largura de feixe da antena com um ganho de 7,84 dB, mostrado na figura 3.37, que mostra o ganho em phi 0 (linha cheia) e em phi 90 (linha pontilhada).



Figura 3.36: Largura de feixe da antena com 4 fendas.



Figura 3.37: Ganho da antena com 4 fendas.

Finalmente, para a construção das antenas foram selecionadas as duas antenas com maior largura de feixe total, a antena com uma fenda tem as seguintes características:

width  $0,20 \times \lambda$  + thickness  $0,20 \times \lambda$  + depth  $0,09 \times \lambda \rightarrow 112$  graus = HPBW

A antena de quatro fendas tem as seguintes características:

depth 0,07 ×  $\lambda$  + width 0,23 ×  $\lambda$  + thickness 0,20 ×  $\lambda$   $\rightarrow$  115 graus = HPBW

As duas antenas construídas podem se observar na figura 3.38, onde a antena de três fendas se situa ao lado esquerdo, a de uma fenda ao lado direito, e no meio, temos o acoplador de guia de onda que o nosso equipamento já tinha.



Figura 3.38: Fotografia das antenas construídas.