

**Modelagem e Caracterização de uma Antena Holográfica de Impedância
Artificial Operando em Frequências de Gigahertz**

Douglas Almeida Maia

Sena Yaovi Gilchrist Nouatin

Orientador: Professor Dr Marcos Sérgio Gonçalves

Limeira
2022

Modelagem e Caracterização de uma Antena Holográfica de Impedância Artificial Operando em Frequências de Gigahertz

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Telecomunicações à Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas.

Douglas Almeida Maia
Sena Yaovi Gilchrist Nouatin
Orientador: Professor Dr Marcos Sérgio Gonçalves

Limeira
2022

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Faculdade de Tecnologia
Luiz Felipe Galeffi - CRB 8/10385

M28m Maia, Douglas Almeida, 1997-
Modelagem e caracterização de uma antena holográfica de impedância artificial operando em frequências de gigahertz / Douglas Almeida Maia, Sena Yaovi Gilchrist Nouatin. – Limeira, SP : [s.n.], 2022.

Orientador: Marcos Sérgio Gonçalves.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia.

1. Antenas (Eletrônica). I. Nouatin, Sena Yaovi Gilchrist, 1992-. II. Gonçalves, Marcos Sérgio, 1973-. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Tecnologia. IV. Título.

Informações adicionais, complementares

Título em outro idioma: Modeling and characterization of an artificial impedance holographic antenna operating at gigahertz frequencies

Palavras-chave em inglês:

Antennas (Electronics)

Titulação: Engenheiro de Telecomunicações

Banca examinadora:

Marcos Sérgio Gonçalves [Orientador]

José Carlos Magossi

Tália Simões dos Santos Ximenes

Data de entrega do trabalho definitivo: 13-12-2022

Autores: Douglas Almeida Maia e Sena Yaovi Gilchrist Nouatin

Título: Modelagem e Caracterização de uma Antena Holográfica de Impedância Artificial Operando em Frequência Gigahertz.

Natureza: Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Telecomunicações

Instituição: Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr MARCOS SÉRGIO GONÇALVES – Orientador
Faculdade de Tecnologia (FT/UNICAMP)

Prof. Dr JOSÉ CARLOS MAGOSSÍ – Avaliador
Faculdade de Tecnologia (FT/UNICAMP)

Profa. Dra. TALÍA SIMÕES DOS SANTOS XIMENES – Avaliadora
Faculdade de Tecnologia (FT/UNICAMP)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, sempre presente, que sempre coloca no nosso caminho pessoas especiais. Aquele que nos concede saúde e forças para vencer os obstáculos da vida.

Ao Prof. Dr. Marcos Sergio Gonçalves, que durante 6 meses nos acompanhou pontualmente, dando todo auxílio necessário para elaboração do projeto.

A todos os docentes do curso de Engenharia de Telecomunicações da Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas que por meio dos seus ensinamentos permitiram que nós pudéssemos concluir este trabalho.

Aos nossos pais e toda família pelo apoio que nunca faltou, que nos incentivaram a cada momento e não permitiram que desistíssemos.

A todos os nossos amigos e amigas que sempre estiveram torcendo por nós e que de perto ou de longe acompanharam a longa caminhada que nos trouxe até aqui.

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso visa o estudo de antenas holográficas para aplicação na faixa de micro-ondas e tem como objetivo analisar parâmetros como ganho e ângulos de irradiação em função de suas dimensões. Como prova de conceito, essa antena foi projetada para operar especificamente na frequência de 17 GHz. HAIA (*Holographic Artificial Impedance Antenna*) é um tipo de antena de ondas vazadas com um princípio de operação exclusivo para radiação de feixe controlado. O projeto dessa antena obedece à teoria estabelecida para a radiação de onda vazada na conversão de uma onda de superfície para onda com vazamento, onde uma superfície de impedância artificial (AIS) é caracterizada e distribuída em um substrato dielétrico usando o princípio holográfico desenvolvido no sistema óptico.

Palavras-chaves: metassuperfícies, antenas, princípio holográfico, superfície de impedância artificial, Gigahertz.

ABSTRACT

This graduation work aims to study holographic antennas for application in the microwave range and has as objective to analyze parameters such as gain and irradiation angles as a function of its dimensions. As a proof of concept, this antenna was designed to operate specifically at 17 GHz frequency. HAIA (Holographic Artificial Impedance Antenna) is a type of leaky wave antenna with a unique operating principle for controlled beam radiation. The design of this antenna follows the established theory for leaky wave radiation in converting a surface wave to a leaky wave, where an artificial impedance surface (AIS) is characterized and distributed on a dielectric substrate using the holographic principle developed in the optical system.

Keywords: metasurfaces, antennas, holographic principle, artificial impedance surface, Gigahertz.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1: Fluxograma da elaboração do projeto da HAIA.
- Figura 2.1: Reflexão e transmissão de uma onda plana em uma interface.
- Figura 2.2: Exemplos de cristais fotônicos periódicos em: (a) 1-D, (b) 2-D e (c) 3-D.
- Figura 2.3: Uma célula unitária AIS para aplicação em antenas.
- Figura 2.4: Esquema de propagação do modo de onda de superfície.
- Figura 2.5: Célula unitária AIS com impedância do tensor.
- Figura 3.1: Exemplo de uma imagem de holograma.
- Figura 3.2: Representação do ângulo máximo de radiação da antena.
- Figura 3.3: Matriz S.
- Figura 3.4: Padrão de radiação 3D.
- Figura 4.1: Configuração da célula unitária usada para simulação em HFSS.
- Figura 4.2: Célula unitária, Padrão de Impedância, seção da estrutura final.
- Figura 5.1: Desenho da antena em HFSS.
- Figura 5.2: Perda de retorno (S_{11}) e padrão de radiação da antena holográfica na dimensão 150 x 96.05 mm com ângulo de radiação de 30°.
- Figura 5.3: Perda de retorno (S_{11}) e padrão de radiação da antena holográfica na dimensão 150 x 96.05 mm com ângulo de radiação de 45°.
- Figura 5.4: Perda de retorno (S_{11}) e padrão de radiação da antena holográfica na dimensão 150 x 96.05 mm com ângulo de radiação de 60°.
- Figura 5.5: Perda de retorno (S_{11}) e padrão de radiação da antena holográfica na dimensão 202.3 x 127 mm com ângulo de radiação de 30°.
- Figura 5.6: Perda de retorno (S_{11}) e padrão de radiação da antena holográfica na dimensão 202.3 x 127 mm com ângulo de radiação de 45°.
- Figura 5.7: Perda de retorno (S_{11}) e padrão de radiação da antena holográfica na dimensão 202.3 x 127 mm com ângulo de radiação de 60°.
- Figura 5.8: Gráfico do ganho em função do tamanho da antena e dos ângulos de radiação.

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1: Desempenho do HAIA com variação das dimensões da superfície holográfica e ângulo de radiação.

LISTA DE ABREVIACÕES

HAIA	<i>Holographic Artificial Impedance Antenna</i>
HFSS	<i>High Frequency Structure Simulator</i>
AIS	<i>Artificial Impedance Surface</i>
TE	<i>Transverse Electric mode</i>
TM	<i>Transverse Magnetic mode</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

μ	Permeabilidade magnética
ϵ	Permissividade elétrica
λ	Comprimento de onda
π	pi
Γ	Coeficiente de reflexão
n	Índice de refração
β	Constante de fase
α	Constante de atenuação
ω	Frequência angular
k	Vetor de onda
Ψ	Densidade do fluxo elétrico
Φ	Diferença de fase
θ	Ângulos em graus (°)
B	Densidade do fluxo magnético
E	Campo elétrico
H	Campo magnético
J	Densidade de corrente
Z	Impedância de superfície

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos	12
1.2	Metodologia do projeto	13
2	CONCEITOS FUNDAMENTAIS	14
2.1	Metassuperfícies e aplicações	14
2.2	Ondas de Superfícies	15
2.3	Ondas vazantes	18
2.4	Impedância Superficial Artificial	18
2.5	Impedância de Superfície Escalar e Tensor de Impedâncias	21
3	ANTENA HOLOGRÁFICA DE IMPEDÂNCIA ARTIFICIAL	23
3.1	Princípios de holografia	23
3.2	Parâmetros de eficiência de radiação	25
3.3	Parâmetros fundamentais de desempenho	26
3.3.1	Perda de Retorno e Coeficiente de Reflexão	26
3.3.2	Parâmetro de dispersão	27
3.3.3	Diretividade	28
3.3.4	Ganho	28
3.3.5	Padrão de radiação	28
4	PROCEDIMENTO DE REALIZAÇÃO DO PROJETO HAIA	30
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES DAS SIMULAÇÕES	32
7	CONCLUSÃO	41
7.1	Trabalhos futuros	41
	REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

A essência de um material é compreendida a partir de sua aparência, ou seja, de suas características de superfície. Superfícies, fenômenos superficiais e processos superficiais estão amplamente presentes na natureza e em nosso cotidiano. De um modo geral, a ciência de superfície e a engenharia de superfície exploram esses fenômenos e processos e usam o conhecimento adquirido para melhorar a vida humana [1].

Os trabalhos feitos pelo cientista Victor Veselago em materiais artificiais trouxeram para o primeiro plano fenômenos estranhos, como índice de refração negativa e índice de refração quase zero. Esses materiais têm seus próprios ressonantes espalhadores e geralmente são classificados como metamateriais [4]. Os metamateriais são tridimensionais (3D), geralmente periódicos e compostos de metais e/ou dielétricos.

As metassuperfícies são materiais eletromagnéticos com espessura muito menor que o comprimento de onda que podem ser usados para controlar a propagação de ondas eletromagnéticas. Por causa de sua espessura, elas podem ser consideradas como materiais bidimensionais (2D). No entanto, em comparação com os metamateriais, as metassuperfícies têm as vantagens de serem menos pesadas e mais fáceis de fabricar nos campos de micro-ondas e óptico [2]. As metassuperfícies têm a capacidade única de bloquear, absorver, concentrar ou guiar ondas tanto na superfície da incidência como no espaço normal à superfície, desde micro-ondas até frequências visíveis.

Para projetistas de antenas, um problema comum é a integração de antenas com pequenas dimensões em estruturas com geometrias complexas, como veículos ou aeronaves, mantendo as características de radiação desejadas. As antenas holográficas são excelentes candidatas para esse fim devido ao seu alto ganho, e por ser fácil de realizar um padrão de radiação desejado. No presente trabalho, foi implementada uma antena holográfica usando superfícies de impedância artificial moduladas construídas como padrões metálicos impressos.

1.1 Objetivos

As atividades realizadas neste trabalho de conclusão de curso têm como objetivo, em primeiro lugar, entender os conceitos teóricos envolvidos nas antenas holográficas implementadas a partir de metassuperfícies e em seguida, desenvolver um projeto dessas

antenas de ganho maior para aplicações em Gigahertz, realizando simulações em software HFSS.

1.2 Metodologia do projeto

A elaboração deste projeto foi realizada nas seguintes etapas:

- Revisão teórica dos conceitos fundamentais que envolvem o AIS para sua compreensão em aplicações de antenas;
- Estabelecimento dos objetivos de projeto e de alimentação das ondas de superfície e do HAIA de acordo com o desempenho reportado no artigo para as simulações iniciais;
- Definições dos parâmetros de projeto e modelagem em HFSS (High-Frequency Structure Simulator);
- Realização da distribuição do AIS no MATLAB para confecção do padrão de holograma da antena.

Além disso, uma série de aspectos das características do HAIA são estudados e explorados, como a variação das dimensões da superfície holográfica e a variação de diferentes ângulos de radiação.

Com os resultados, é feita uma análise comparativa da antena entre as diferentes dimensões de superfície holográfica, em que é escolhido o melhor desempenho.

A Figura 1.1 mostra o fluxograma das etapas para a elaboração do projeto.

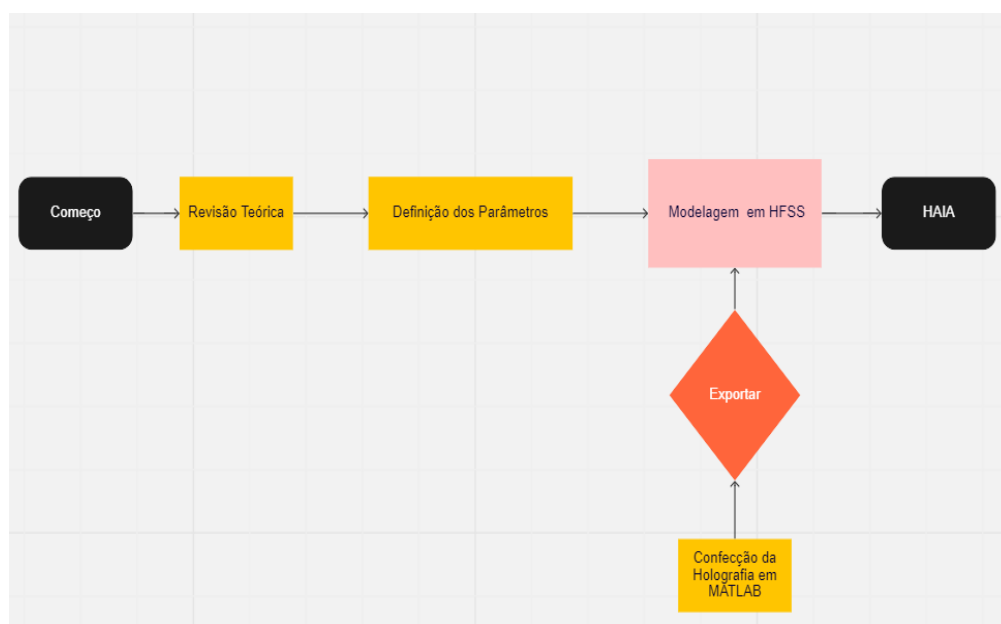


Figura 1.1: Fluxograma da elaboração do projeto da HAIA.

2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Neste capítulo, serão apresentados os fundamentos teóricos envolvidos neste trabalho de conclusão, começando com uma breve história e aplicações das metassuperfícies, os conceitos gerais sobre as propriedades de radiação da superfície de ondas, ondas vazantes e AIS aplicado em antenas.

2.1 Metassuperfícies e aplicações

Uma metassuperfície eletromagnética refere-se a um material com propriedades específicas não encontradas na natureza. As metassuperfícies podem ser estruturadas ou não estruturadas com padrões de escala de comprimento de onda com dimensão horizontal. A pesquisa de metassuperfícies eletromagnéticas tem uma longa história. Em 1902, Robert W. Wood descobriu que os espectros de reflexão da grade metálica de comprimento de onda tinham áreas escuras. Esse fenômeno incomum foi denominado anomalia de Wood e levou à descoberta do *polariton* de plasmon de superfície (SPP), uma onda eletromagnética particularmente excitada em superfícies metálicas.

Na teoria eletromagnética, as metassuperfícies modulam o comportamento das ondas eletromagnéticas por meio de certas condições de contorno, em vez de parâmetros constitutivos no espaço tridimensional (3D), que é frequentemente estudado em materiais naturais e metamateriais. As metassuperfícies também podem se referir aos equivalentes bidimensionais dos metamateriais.

As metassuperfícies são assunto de pesquisa muito importante. Devido à sua capacidade única de manipular ondas eletromagnéticas em micro-ondas e frequências ópticas. Sua utilização e aplicação em eletromagnetismo atingiu grande popularidade nos últimos anos [5]. Dentre as aplicações, têm-se: metassuperfícies de impedância, absorvedores de metassuperfície, guias de onda da metassuperfície, superfícies de Huygens e modelagem do feixe, antena metassuperficial uniforme e metassuperfícies holográficas de ondas vazantes

Metassuperfícies de impedância: quando uma onda no espaço livre incide sobre uma superfície, a reflexão e a transmissão são governadas pelas propriedades efetivas da superfície, que podem ser descritas em termos de sua impedância. Encontram-se dois tipos, superfícies de alta impedância e superfícies de impedância ativa.

Os absorvedores são geralmente compostos por materiais de grafeno com perdas ou estrutura multicamadas, resultando em grandes dimensões. A espessura de um absorvedor é

projetada com um quarto do comprimento de onda, de modo que o campo elétrico da onda de entrada atinge seu valor máximo na camada com perdas. Usando uma estrutura de ressonância para aumentar o campo elétrico na superfície, os **absorvedores de metassuperfície** podem reduzir bastante a espessura do absorvedor [5].

Guias de onda da metassuperfície: metassuperfícies podem ser projetadas para refletir completamente a onda incidente. Portanto, a energia eletromagnética pode ser capturada e guiada na região entre duas metassuperfícies [3].

O princípio de Huygens, um dos princípios básicos do eletromagnetismo, em que cada ponto da frente de onda atua como uma fonte secundária, criando sua própria frente de onda. Superfícies ultrafinas podem ser projetadas para refletir a onda eletromagnética com ângulos desejados e diferentes do ângulo da onda incidente. Essas superfícies são chamadas de **superfícies de Huygens**, e têm a capacidade de controlar a reflexão, a direção do feixe e a manipulação da polarização [5].

Os sistemas de antenas para muitas aplicações requerem alto ganho para atender aos requisitos do enlace de comunicação [5]. Além de serem amplamente utilizadas no processamento de superfície e de ondas no espaço livre, as metassuperfícies também são utilizadas como meio de irradiar ondas eletromagnéticas no espaço livre. Portanto, elas são usadas para projetar e fabricar antenas. **Antena metassuperficial uniforme** tem uma constante de propagação uniforme sobre toda a área de superfície, e a superfície é composta por células unitárias periódicas de tamanho constante em um plano bidimensional [5]. Para **antenas holográficas de ondas vazantes**, a onda de superfície é a maior onda incidente. A radiação para tais antenas ocorre quando há um casamento de fase entre as ondas vazadas para frente e para trás [4]. A característica dessas antenas é converter o modo de onda de superfície em um modo de onda vazada para gerar radiação de feixe controlado no campo distante.

2.2 Ondas de Superfícies

A teoria que envolve ondas de superfície tem mais de um século de existência, começando com os estudos feitos por Zenneck e Sommerfeld, em 1907, sobre a propagação do solo [6]. Os sistemas de antena formados por placas metálicas são afetados pelo aparecimento de ondas de superfície. As ondas superficiais são guiadas numa interface entre dois meios, como ilustrado na Figura 2.1 e toda a energia é concentrada nele ($z = 0$).

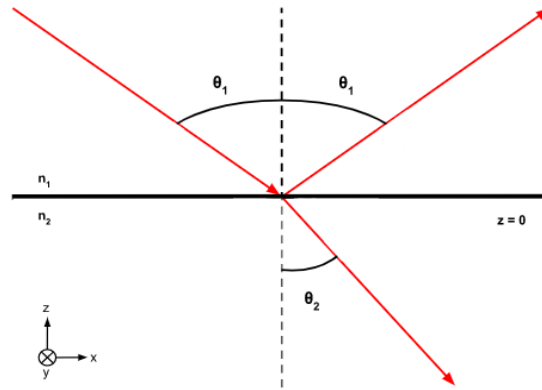


Figura 2.1: Reflexão e transmissão de uma onda plana em uma interface.

A característica de propagação de uma onda superficial pode ser estudada com a lei de Snell, quando o ângulo de incidência (θ_1) é superior ao crítico (θ_c) ângulo [10], dado por:

$$\theta_1 \geq \theta_c = \sin^{-1} \left(\sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} \right) \quad (2.1)$$

onde ϵ_1 e ϵ_2 são a permissividade elétrica no meio 1 e 2, respectivamente.

Quando a condição em (2.1) ocorre, o ângulo de transmissão θ_2 é complexo. Não ocorre refração e a onda é refletida. Esse fenômeno é chamado de reflexão total. Assim, a onda de superfície se propaga paralelamente à interface ($z=0$) e sua velocidade é menor que a velocidade da luz (c), conhecida como onda lenta.

No plano de incidência xz sem variação na direção y , o campo elétrico pode ser polarizado perpendicularmente (modo TE) ou paralelo (modo TM) ao plano de incidência. No entanto, sabe-se que as ondas de superfície não existem no regime TE porque a energia está confinada à interface entre os dois meios [10] [11]. Usando as equações de Maxwell no modo TM e considerando uma convenção de tempo harmônico com variação $e^{j\omega t}$, a condição de existência para a onda de superfície é obtida por:

$$\nabla \times E = -j\omega\mu H, \quad (2.2)$$

$$\nabla \times H = j\omega\epsilon E, \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot D = 0, \quad (2.4)$$

$$\nabla \cdot H = 0. \quad (2.5)$$

Desenvolvendo a equação (2.2), encontram-se as expressões para as componentes do campo elétrico e magnético, que são expressas por:

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -j\omega\mu H_y \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = j\omega\epsilon E_x \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} = j\omega\epsilon E_z \quad (2.8)$$

onde a componente do campo magnético na direção y para o meio 1 ($i = 1, z > 0$) e para o meio 2 ($i = 2, z < 0$) é definido por:

$$H_{yi} = B_i e^{k_{zi}z - jk_{xi}x} \quad (2.9)$$

e os componentes do vetor de onda são expressos por:

$$k_{zi}^2 + k_{xi}^2 = k_i^2 \quad (2.10)$$

Quando a onda se propaga ao longo da fronteira, sua amplitude diminui exponencialmente na direção z . Portanto k_{z1} e k_{z2} são imaginários e são substituídos por $-jk_1$ e $-jk_2$ [12]. Assim, as componentes do campo elétrico são dadas por:

$$E_{x1} = -\frac{k_1}{j\omega\epsilon_1} B_1 e^{(k_1z - jk_x x)} \quad (2.11)$$

$$E_{x2} = \frac{k_2}{j\omega\epsilon_2} B_2 e^{(k_2z - jk_x x)} \quad (2.12)$$

$$E_{z1} = -\frac{k_x}{\omega\epsilon_1} B_1 e^{(k_1z - jk_x x)} \quad (2.13)$$

$$E_{z2} = -\frac{k_x}{\omega\epsilon_2} B_2 e^{(k_2z - jk_x x)} \quad (2.14)$$

onde B é a densidade do fluxo magnético, ω a autofrequência ou frequência natural e k o vetor de onda.

Para a existência de uma onda de superfície na interface ($z = 0$), a seguinte condição deve ser satisfeita:

$$B_1 = B_2 \quad (2.15)$$

$$\frac{-k_1}{\epsilon_1} = \frac{-k_2}{\epsilon_2} \quad (2.16)$$

A condição em (2.10) define que k_1 e k_2 são ambos valores positivos, onde ε_1 ou ε_2 deve ter um valor negativo. Normalmente, a permissividade elétrica negativa é encontrada em metais como o cobre, que demonstram sua existência neste tipo de material. Com a condição em (2.10), uma relação entre k_x e ω é obtido por:

$$k_x = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}} \quad (2.17)$$

Quando a onda se propaga ao longo da interface, k_x deve ser real, onde $\varepsilon_1 \varepsilon_2 < 0$ e $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 < 0$.

2.3 Ondas vazantes

Ondas vazantes são ondas guiadas que irradiam parte de sua energia à medida que viaja em uma estrutura. Em 1959, estudos pioneiros realizados por A. A. Oliner, permitiram uma compreensão matemática sobre o comportamento dessas ondas, demonstrando a sua existência, sendo de grande benefício para diferentes aplicações, tais como antenas, prisma de ondas de superfície óptica e grelhas acopladoras [13].

Uma onda com vazamento é composta por uma constante de fase (β) em rad/m, e constante de atenuação (α) em Np/m, sendo constante ao longo do guia de onda se a estrutura for uniforme. Para a existência de uma onda vazada, pode ser utilizado um guia de onda com algumas fendas ou descontinuidades para produzir a energia vazada, formando o padrão de radiação.

2.4 Impedância Superficial Artificial

O AIS começou a ser estudado como estruturas de gap de banda fotônica (PBG) em uma, duas ou três dimensões periódicas como ilustrado na Figura 2.2, conhecido como cristal fotônico, composto de dielétricos periódicos [14]. O comportamento da estrutura é estudado com o teorema de Bloch que estabelece o campo dentro do cristal fotônico tomando sua simetria e periodicidade.

Em 1999, D. Sievenpiper [8] publicou um trabalho pioneiro para modelar uma superfície corrugada de alta impedância (HIS High-Impedance Surface), que mostra que se um condutor é projetado com uma certa periodicidade geométrica, é possível controlar as

propriedades efetivas da impedância da superfície com valores de impedância de superfície extremamente altos ($Z_s \gg Z_0$) em determinada faixa de frequência.

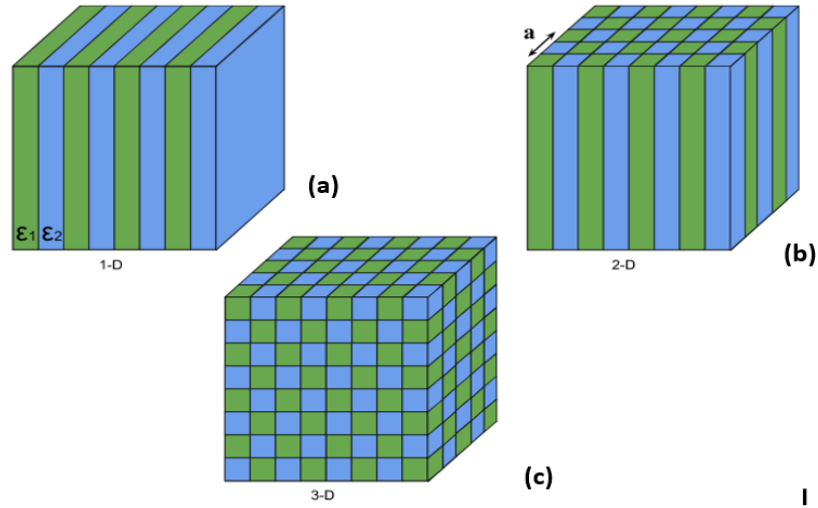


Figura 2.2: Exemplos de cristais fotônicos periódicos em: (a) 1-D, (b) 2-D e (c) 3-D.

Quando a impedância da superfície Z_s é alta, significa que a superfície possui uma estrutura especial capaz de proporcionar maior controle sobre o campo elétrico devido à sua condição de contorno. A impedância da superfície é representada como a razão entre o campo elétrico e o campo magnético na superfície, que é definido na equação (2.18) para o plano yz [9]. Portanto, a resposta do campo elétrico pode ser controlada usando modelagem de impedância de superfície.

$$Z_s = \int_{cell} \frac{E_x}{H_y} ds \quad (2.18)$$

Os modos TM possuem campo magnético transversal à direção de propagação da onda superficial, enquanto os modos TE têm campo elétrico transversal à direção da propagação [9].

Outro método de calcular essa impedância de superfície é usar o índice de refração. Para uma onda de superfície limitada, o índice de refração n é a razão entre a velocidade da luz no espaço livre e a velocidade de fase da onda ao longo da superfície:

$$n = \frac{c}{v_{ph}} = \frac{k_t c}{\omega} \quad (2.19)$$

onde k_t é o vetor da onda de superfície, que pode ser determinado por métodos numéricos. Usando um programa de simulação numérica, a frequência ω pode ser calculada para uma determinada diferença de fase ϕ (a fase de reflexão da superfície de impedância) através de uma célula unitária de comprimento a . Uma vez que a diferença de fase ϕ através da célula unitária é relacionada ao vetor de ondas $\phi = k_t a$, o índice de refração n é determinado completamente. Com as ondas de superfícies limitadas tendo a dependência funcional $e^{-j\omega t} e^{-jk_t x_t} e^{-k_z z}$, onde t denota as grandezas no plano xy , as equações de Maxwell e a condição de fronteira da impedância exigem que a impedância de superfície para os modos TM esteja relacionada com a constante k_z de decaimento dos campos fora da superfície [9].

$$Z = jZ_0 \frac{k_t}{k} \quad (2.20)$$

onde $k = \omega/c$ e Z_0 é a impedância do espaço livre e k_t é o número de onda superficial. Note-se que a relação k_t/k dá o módulo da impedância de superfície normalizada sobre a impedância do espaço livre; esta observação será importante na análise das superfícies de impedância tensora. A equação da onda relacionada ao vetor de onda k_t ao longo da superfície com k_z é dada pela relação de dispersão:

$$k_z^2 = k^2 - k_t^2 \quad (2.21)$$

Portanto, a relação entre o índice de refração efetivo e a impedância de superfície efetiva é

$$Z = Z_0 \sqrt{1 - n^2} \quad (2.22)$$

Essa expressão é usada para ondas TM e uma expressão semelhante pode ser derivada para ondas TE. Este método dá o mesmo resultado que a integração de campo, mas é muito mais simples porque requer apenas o cálculo da frequência de onda de superfície ou vetor de onda [7].

2.5 Impedância de Superfície Escalar e Tensor de Impedâncias

O AIS usa uma matriz periódica de geometrias com dimensões menores que o comprimento de onda operacional. Devido a esta periodicidade, a Superfície de Impedância Artificial pode ser caracterizada com uma única célula unitária de comprimento a e gap g formada por um patch metálico em cima de um substrato dielétrico de altura h que está conectado a uma placa de terra, conforme mostrado na Figura 2.3 [15]. Dependendo da geometria da estrutura metálica, a impedância da superfície pode ser escalar ou na forma de tensor, de acordo com a relação entre o campo elétrico e a corrente de superfície na estrutura.

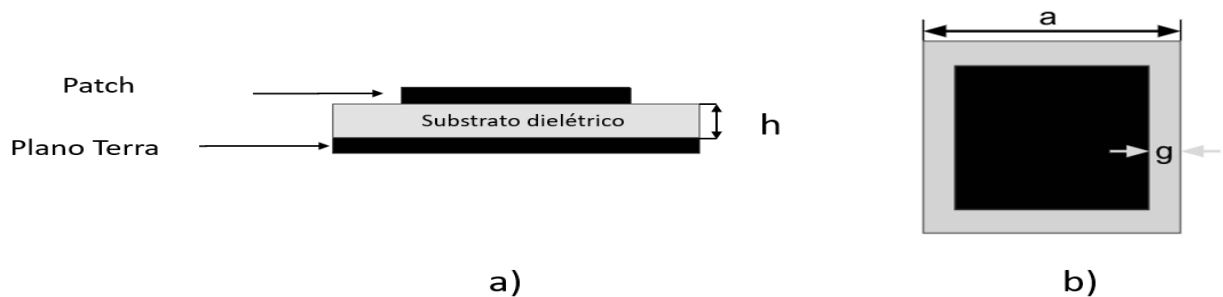


Figura 2.3: Uma célula unitária AIS para aplicação em antenas: (a) vista frontal e (b) vista superior.

O AIS escalar é criado para controlar a propagação do campo elétrico, modelando a impedância de superfície. A condição de limite de impedância é dada por:

$$E = Z \cdot J \quad (2.23)$$

Onde J é a densidade de corrente de superfície e Z é a impedância da superfície. Uma impedância escalar pode suportar a propagação de um modo de onda de superfície TM ou TE pela caracterização de célula unitária [16] com polarização linear para aplicações de antena. No modo TM, o campo elétrico é orientado verticalmente à superfície sem a existência do modo de onda da superfície magnética. No modo TE, o campo elétrico é orientado horizontalmente, conforme ilustrado na Figura 2.4.

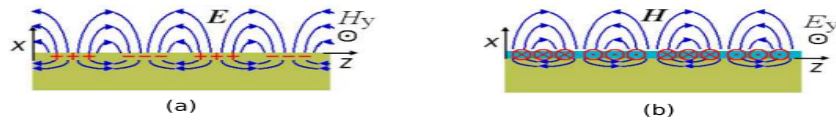


Figura 2.4: Esquema de propagação do modo de onda de superfície: (a) TM polarização, e (b) TE-polarização [17].

Portanto, o tipo de propagação do modo de onda de superfície define a polarização da onda irradiada no HAIA, seja por campos elétricos polarizados verticalmente ou horizontalmente.

O tensor de impedância superficial representa uma impedância anisotrópica capaz de produzir uma polarização circular que suporta ambos os modos TE e TM, definido como:

$$Z = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{yx} \\ Z_{xy} & Z_{yy} \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

onde os valores do tensor são impedâncias imaginárias com a condição $Z_{xy} = Z_{yx}$. A condição de contorno na superfície é expressa por:

$$E = Z \hat{z} \times H \quad (2.25)$$

$$E = Z \cdot J \quad (2.26)$$

Algumas formas geométricas, tais como um retângulo, uma elipse, e um espaço quadrado cortado comporta-se como uma impedância tensorial, como pode ser visto na Figura 2.5.

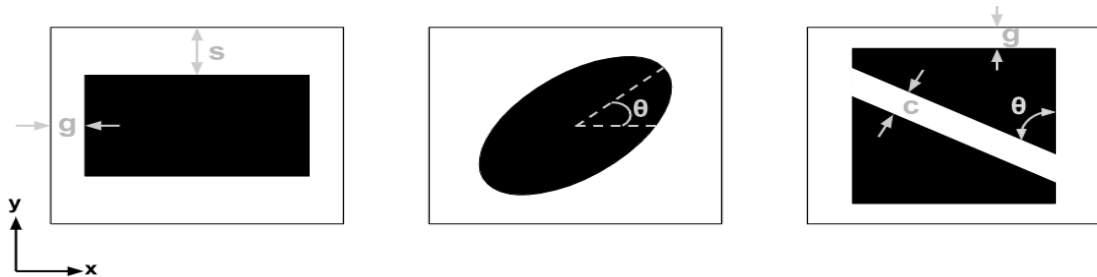


Figura 2.5: Célula unitária AIS com impedância do tensor.

3 ANTENA HOLOGRÁFICA DE IMPEDÂNCIA ARTIFICIAL

A antena holográfica é composta de antena de fonte e uma superfície de interferência. A antena fonte é usada para gerar a onda de referência e a superfície de interferência é construída como uma coleção de dispersores (são capazes de se espalhar por várias áreas, garantindo uma melhor distribuição espacial). Neste caso, espalha a onda de referência para formar a onda objeto.

Neste capítulo, têm-se como objetivo descrever a teoria do princípio holográfico no campo de dispositivos de micro-ondas como antenas. Além disso, são explicadas as propriedades que controlam as características de radiação neste tipo de antenas e outros parâmetros de desempenho para a avaliação dos resultados.

3.1 Princípios de holografia

A Holografia é o registo codificado da frente de onda proveniente do objeto iluminado – onda objeto, através da figura de interferência com outra frente de onda, mutuamente coerente – onda de referência.

Em 1948 Dénes Gabor inventou a holografia como uma técnica para aperfeiçoar a resolução em microscopia eletrônica. Em seus experimentos, ele usou feixes de luz para capturar padrões de interferência ou imagens de objetos em um plano para que as imagens pudessem ser reconstruídas em três dimensões (3-D). Depois de sua descoberta, recebeu o prêmio Nobel de Física, em 1971. Um exemplo de imagem criada usando tecnologia de holograma é mostrado na Figura 3.1.

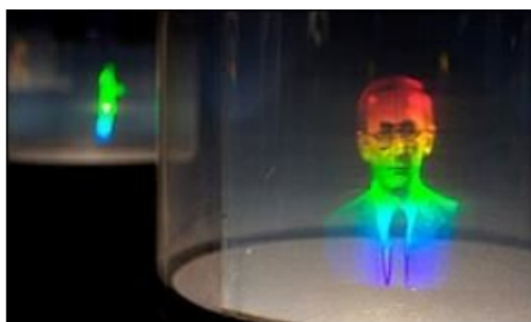


Figura 3.1: Exemplo de uma imagem de holograma [18].

Nos sistemas ópticos, a holografia envolve o registro e a reconstrução do objeto. A etapa de registro envolve dirigir uma fonte de luz (onda de referência) para o plano de interferência, e simultaneamente iluminar o objeto com a mesma fonte [19] [20].

Com base na posição do ponto refletido na superfície do objeto, o objeto reflete ondas com variação de fase. Portanto, o holograma será formado por diferentes valores de fase do objeto de ondas e intensidade da fonte de luz, que conterà um termo proporcional à onda do objeto (Ψ_{obj}) e outro proporcional ao complexo conjugado da onda de referência (Ψ_{ref}), dado por [9] :

$$\Psi_{obj} \Psi_{ref}^* \quad (4.1)$$

Na etapa de reconstrução, o plano é iluminado com a mesma fonte de luz, formando uma sobreposição entre a onda de referência e o termo proporcional registrado no holograma que permite recuperar uma cópia do objeto em 3D, como expresso abaixo.

$$\left(\Psi_{obj} \Psi_{ref}^* \right) \Psi_{ref} = \Psi_{obj} |\Psi_{ref}|^2 \quad (4.2)$$

Nos sistemas de antena, a técnica holográfica é aplicada conforme descrito acima. Uma fonte de alimentação gera uma onda superficial (Ψ_{surf}) considerada como a onda de referência, e o padrão de radiação desejado é a onda do objecto (Ψ_{obj}) [9]. Ambas as informações são registradas no holograma, como mostra na Figura 3.2, e dadas por:

$$\Psi_{rad} \Psi_{surf}^* \quad (4.3)$$

Finalmente, quando a onda superficial é excitada na superfície do holograma, o campo desejado será irradiado, como definido abaixo.

$$\left(\Psi_{rad} \Psi_{surf}^* \right) \Psi_{surf} = \Psi_{rad} |\Psi_{surf}|^2 \quad (4.4)$$

A onda de superfície pode ser expressa como uma onda cilíndrica:

$$\Psi_{surf} = e^{-jknr} \quad (4.5)$$

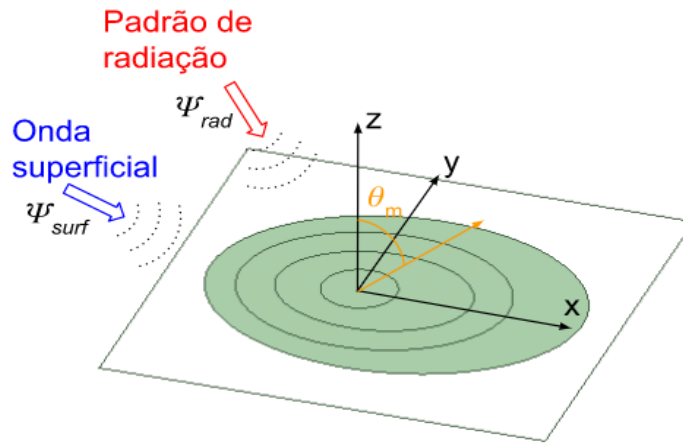


Figura 3.2: Ilustração do princípio holográfico em sistema de micro-ondas

onde n é o índice efetivo visto pela corrente superficial, e r é a distância a partir da posição de alimentação. O campo desejado é definido para irradiar num ângulo específico (θ_m) do normal para a superfície, representado na equação (4.6):

$$\Psi_{rad} = e^{jk_x \sin(\theta_m) + j\phi} \quad (4.6)$$

Uma vez obtido o padrão de holografia, a impedância superficial pode ser modulada, conforme a equação [9]:

$$Z(x_t) = j \left[X_s + M \operatorname{Re} \left(\Psi_{rad} \Psi_{surf}^* \right) \right] \quad (4.7)$$

onde X_s é o valor médio da distribuição da impedância, M é o fator de modulação, e x_t é o ponto na superfície (plano xy). O modo de propagação da onda vazante ao longo do padrão holográfico determina a distribuição do campo de abertura da antena.

3.2 Parâmetros de eficiência de radiação

O ângulo máximo de radiação, a largura do feixe e os níveis do lóbulo lateral caracterizam o desempenho do HAIA. O ângulo máximo θ_m é o ângulo formado com a normal à superfície da antena de radiação. Ele pode ser determinado pela seguinte relação:

$$\theta_m \simeq \sin^{-1} \left(\frac{k_z}{k_o} \right) \quad (4.8)$$

Mas, neste projeto, o ângulo máximo de radiação vai ser um parâmetro de entrada, onde serão definidos os ângulos desejados (30°, 45° e 60°).

Para fins de ilustração, o ângulo máximo de radiação é mostrado na Figura 3.3.

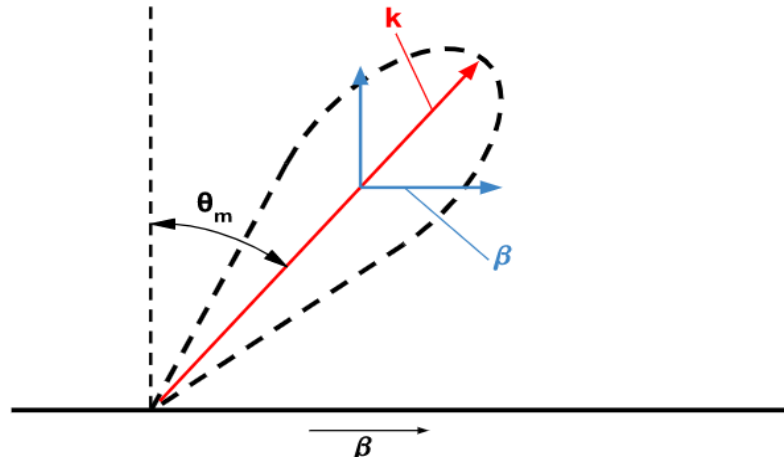


Figura 3.3: Representação do ângulo máximo de radiação da antena.

3.3 Parâmetros fundamentais de desempenho

A partir da teoria das antenas, diferentes parâmetros são avaliados para descrever o desempenho do HAIA, que são apresentados em detalhes nas seções seguintes.

3.3.1 Perda de Retorno e Coeficiente de Reflexão

A perda de retorno é a relação da potência transmitida P_i e a potência refletida P_r representado em dB e é dado por:

$$PR(dB) = 10 \log_{10} \frac{P_i}{P_r} \quad (4.9)$$

Essa perda de retorno está associada ao coeficiente de reflexão Γ , determinado pela impedância de entrada Z_{in} e a impedância característica Z_0 é dado por:

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (4.10)$$

o coeficiente de reflexão pode ser expresso em termo de campo incidente e refletido em dB e é expresso por:

$$\Gamma(\text{dB}) = 20 \log_{10} \frac{E_r}{E_i} \quad (4.11)$$

onde pode ser expresso por:

$$\Gamma(\text{dB}) = 10 \log_{10} \left(\frac{E_r}{E_i} \right)^2 = 10 \log_{10} \frac{P_r}{P_i} \quad (4.12)$$

Da equação anterior, pode-se deduzir que a perda de retorno é a magnitude do coeficiente de reflexão. Logo têm-se:

$$\text{PR}(\text{dB}) = 20 \log_{10} |\Gamma| \quad (4.13)$$

Neste trabalho, o objetivo é conseguir uma perda de retorno superior a 20 dB, o que significa que a potência refletida é 100 vezes menor que a potência incidente.

3.3.2 Parâmetro de dispersão

O parâmetro de dispersão ou parâmetro S, representa a relação entre a onda incidente e refletida nas portas de uma rede de n portas. Uma representação esquemática de uma porta de duas portas é mostrada na Figura 3.4.

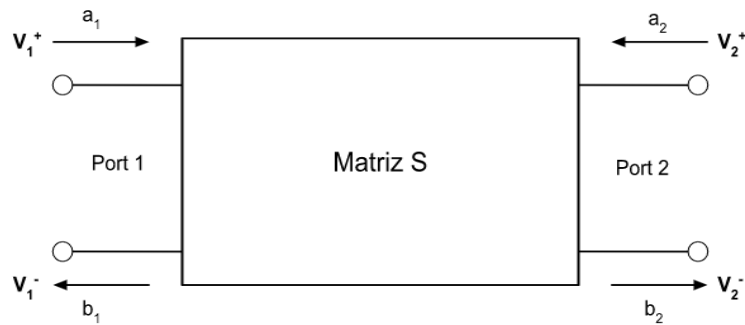


Figura 3.4: Matriz S.

As variáveis a_1 e a_2 são as ondas incidentes, b_1 e b_2 são as ondas refletidas.

Assim a matriz de espalhamento denominada matriz S relaciona cada porta por:

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \mid a_2 = 0, \quad (4.14)$$

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \mid a_2 = 0,$$

$$S_{12} = \frac{b_1}{a_2} \mid a_1 = 0,$$

$$S_{22} = \frac{b_2}{a_2} \mid a_1 = 0.$$

Para uma condição $a_2 = 0$, isso quer dizer uma combinação perfeita de impedância. Em outras palavras, não há onda refletida na porta 2. Da mesma forma uma condição onde $a_1 = 0$, não haverá onda incidente na porta 1. Os parâmetros S_{11} e S_{22} são conhecidos como coeficientes de reflexão e S_{12} e S_{21} são os coeficientes de transmissão.

3.3.3 Diretividade

A diretividade representa as propriedades direcionais de uma antena comparada às características de uma antena isotrópica. Sendo a antena isotrópica a base para o cálculo da diretividade, ela possui a distribuição de energia no espaço mais uniforme possível, levando assim a uma diretividade unitária. Desta forma, a antena pode irradiar mais fortemente em algumas direções do que em outras. A diretividade é definida como sendo a razão entre a intensidade de radiação em uma dada direção da antena e a intensidade de radiação média sobre todas as direções. Ela descreve apenas as propriedades direcionais do padrão de radiação.

3.3.4 Ganho

O ganho da antena está relacionado com a diretividade. O ganho é expresso como a razão entre a intensidade da radiação máxima e a intensidade da radiação se a potência de entrada da antena fosse irradiada isotropicamente, medida em escala logarítmica. A unidade de medida adotada neste trabalho é o dBi. O ganho também pode ser relacionado com o ganho da antena dipolo. Neste caso, o ganho é dado em dBd.

3.3.5 Padrão de radiação

O padrão de radiação é uma representação espacial no plano bidimensional ou tridimensional dos campos irradiados pela antena. A distribuição do espaço utilizado como referência é o sistema de coordenadas esféricas, onde o ângulo θ começa no eixo Z e o ângulo ϕ no eixo x, conforme ilustrado na Figura 3.5. Os principais padrões comumente usados para

medir a direção da radiação máxima são o plano E e o plano H. A distribuição espacial do software HFSS utilizado neste trabalho corresponde à mesma referência descrita acima.

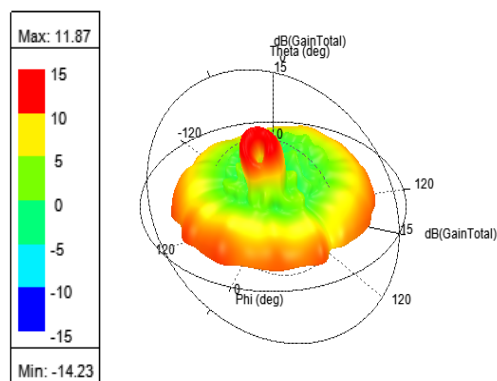


Figura 3.5: Padrão de radiação 3D.

4 PROCEDIMENTO DE REALIZAÇÃO DO PROJETO HAIA

Este capítulo apresenta o procedimento passo a passo para implementar a HAIA modelando o lançador de ondas de superfície e a superfície holográfica. Os componentes da antena são projetados usando o simulador eletromagnético de onda completa HFSS baseado no método dos elementos finitos (FEM).

Para modelagem da AIS, nossa superfície de impedância artificial é baseada em uma estrutura metálica com comprimento de onda em um substrato dielétrico aterrado. O substrato utilizado foi o Duroid 5880 que tem uma constante dielétrica relativa $\epsilon_r = 2.2$, uma tangente de perda $\tan\delta = 0.0009$, 1.57 mm de espessura. A periodicidade das metassuperfícies é de 3 mm. Foi simulada uma rede de patches quadrados uniformes com o software eletromagnético HFSS. Usa-se apenas uma célula unitária, com condições de contorno periódicas em quatro paredes da simulação, mostrado na Figura 4.1. O objetivo é fornecer altos valores de impedância de superfície na célula unitária com mudanças em cada variação de tamanho do patch de metal.

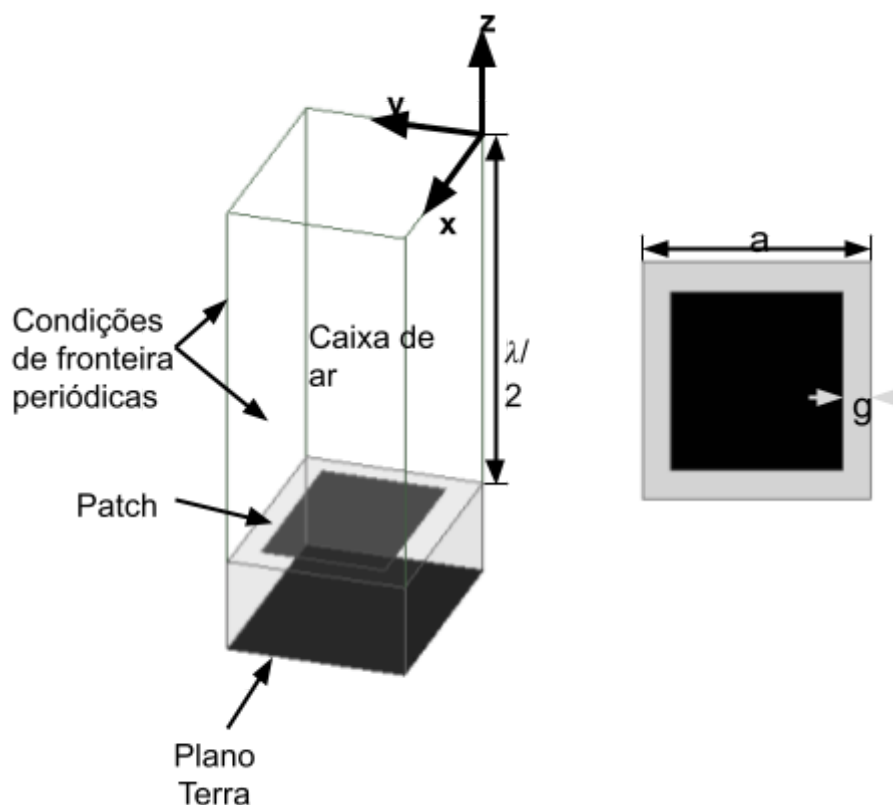


Figura 4.1: Configuração da célula unitária usada para simulação em HFSS.

A superfície de impedância artificial é projetada usando um método análogo à holografia óptica. Um padrão de interferência é criado usando duas ondas: uma correspondente às correntes de superfície esperadas e a outra correspondente aos campos desejados. As correntes são espalhadas pelo padrão de interferência para gerar os campos desejados. O padrão de interferência formado por uma fonte pontual em um plano 2D e uma onda plana se propagando num ângulo do normal a esse plano aparece como um padrão de elipse mostrado na Figura 4.2. Baseando-se no método de modulação de impedância implementado em [9], onde há uma diferença de fase de 72 graus por célula e onde foi resolvido o automodo que satisfaz a condição de contorno. Definiu-se a razão entre o campo elétrico médio e o campo magnético acima da superfície como a impedância efetiva da superfície. Ao varrer o tamanho do patch, foi determinada a impedância em função da largura do intervalo entre os patches. Para lacunas variando de 1 mm a 0,2 mm, a impedância efetiva variou de $161j\Omega$ a $234j\Omega$ em 17 GHz.

Para a geração do holograma mostrado na Figura 4.2, utilizou-se uma rotina escrita em MATLAB que foi desenvolvida pelo orientador da monografia em conjunto com um aluno de Iniciação Científica. O holograma foi implementado como uma superfície de impedância artificial, conforme descrito acima. Foram geradas duas medidas desse holograma a fim de comparar: um holograma de menor dimensão 150mm (X) por 96.05mm (Y) e um outro de dimensão maior 202.3mm (X) por 127mm (Y). Essa Superfície de impedância artificial foi importada na estrutura realizada em HFSS e é alimentado por uma antena monopolo. No HFSS, uma excitação de porta *lumped* é configurada com uma impedância de 50Ω conectada a um plano de terra. A altura do monopolo é $\lambda/4$ (4,41 mm), onde λ é o comprimento de onda da frequência de operação da antena (17GHz), o seu raio é 1.2 mm. As correntes geradas por este monopolo são espalhadas pela superfície de impedância holográfica para produzir um feixe de lápis estreito. O controle da direção máxima desse feixe será estudado em três diferentes ângulos: $\theta_m = 30^\circ, 45^\circ$ e 60° .

A antena monopolo é usada juntamente com a superfície para formar a antena holográfica. Para uma boa alimentação, a antena monopolo é ajustada para $1/4$ da dimensão X e $1/2$ da dimensão Y da estrutura metálica. Uma caixa de ar é fechada à antena holográfica. A distância entre a caixa de ar e a antena é de $\lambda/2$ para evitar a propagação de outros modos, onde λ é o comprimento de onda da frequência de operação (17GHz). A condição de contorno da caixa de ar é definida como radiação.

Na intenção de obter melhores resultados, realizaram-se várias simulações ajustando os parâmetros como comprimento e largura da estrutura, posição, raio e altura da antena monopolo.

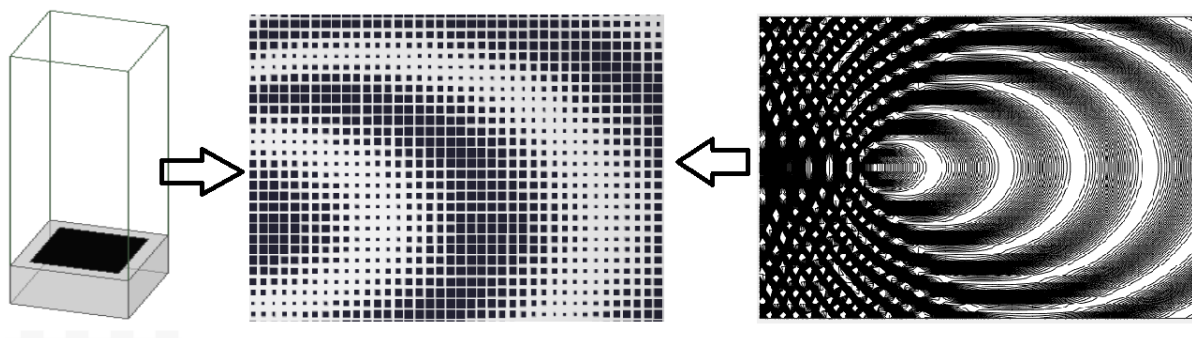


Figura 4.2: Célula unitária (esquerda), Estrutura final (centro), Padrão de impedância (direita).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES DAS SIMULAÇÕES

Com base no procedimento acima, as simulações foram realizadas. Lembrando que a altura do monopolo foi ajustada para oferecer um maior ganho (dB) e menor perda de retorno (S_{11}). Neste caso, a altura sofreu variações entre 10mm e 10.3mm para as dimensões 150 x 96.05 e 11.7mm e 11.9mm para as dimensões 202.3 x 127.

Gerada a estrutura final via MATLAB, a antena no HFSS teve o seguinte formato da Figura 5.1, com todos os materiais e procedimentos comentados na Seção 4.

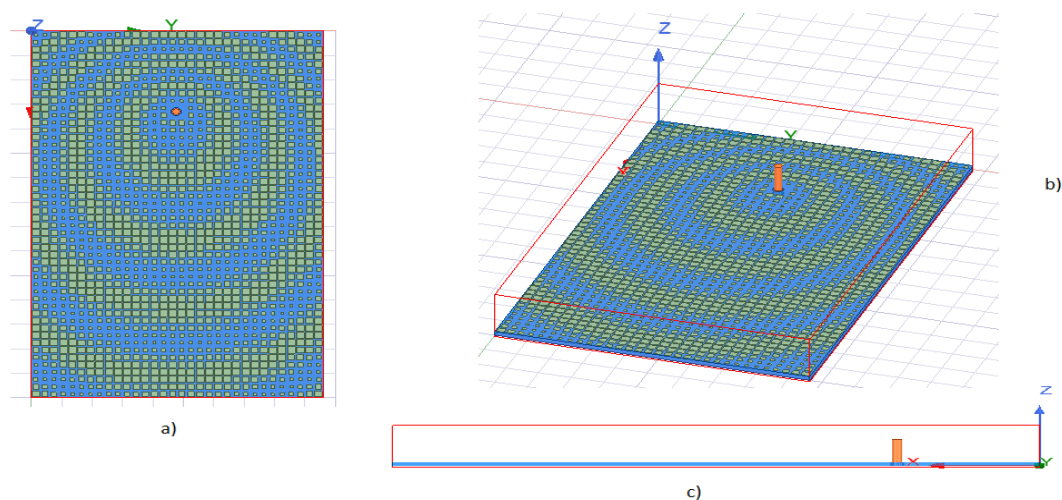


Figura 5.1: Desenho da antena em HFSS: a) Vista no plano xy b) Vista em 3D c) Vista no plano xz.

Conforme visto na Tabela 5.1, pode-se verificar o aumento do ganho conforme se aumenta a dimensão da superfície holográfica, com apenas uma exceção, no ângulo de 45° , onde o ganho foi superior à superfície de maior dimensão. Da mesma forma, pode-se observar uma diminuição da perda de retorno S_{11} conforme a dimensão da superfície holográfica aumenta, havendo apenas uma exceção, no ângulo de 45° .

Tabela 5.1: Desempenho do HAIA com variação das dimensões da superfície holográfica e ângulo de radiação.

Dimensões XY (mm)	Ângulo de radiação	S_{11} (dB)	Ganho(dB)	θ_m
150 x 96.05	$\theta_m = 30^\circ$	-19.01	12.48	25°
	$\theta_m = 45^\circ$	-22.22	14.05	39°
	$\theta_m = 60^\circ$	-18.27	11.84	52°
202.3 x 127	$\theta_m = 30^\circ$	-22.81	16.80	26°
	$\theta_m = 45^\circ$	-20.33	12.46	47°
	$\theta_m = 60^\circ$	-22.58	17.07	53°

A imagem superior das Figuras 5.2 a 5.7 mostram as respostas de frequência simuladas da antena holográfica para cada tamanho e ângulo de radiação. A frequência de operação central da antena é de cerca de 17 GHz. Os coeficientes de reflexão são abaixo de -20 dB em 17 GHz, havendo apenas uma exceção, nos ângulos de 30° e 60° da antena menor, onde os coeficientes de reflexão são respectivamente -19,01 dB e -18,27 dB. A imagem inferior das figuras 5.2 a 5.7 mostra o padrão de radiação simulado da antena proposta para cada dimensão da superfície holográfica nos três ângulos de radiação desejados (30° , 45° e 60°). A partir disso, pode-se ver que a antena de menor tamanho alcançou um ganho de 12,48 dB num ângulo de 25° , um ganho de 14,05 dB num ângulo de 39° e um ganho de 11,84 dB num ângulo de 52° . Enquanto na antena de maior tamanho o ganho alcançado é de 16,80 dB num ângulo de 26° , de 12,46 dB num ângulo de 47° e de 17,07 dB num ângulo de 53° .

Verifica-se que as duas antenas (menor e maior) caracterizam a radiação diretiva desejada com alto ganho. Comparando as duas antenas, nota-se que a eficiência da antena

relaciona o ganho máximo ao seu tamanho físico. A Figura 5.8 mostra estes dados por meio de um gráfico apresentando o ganho em função do tamanho da antena e dos ângulos de radiação.

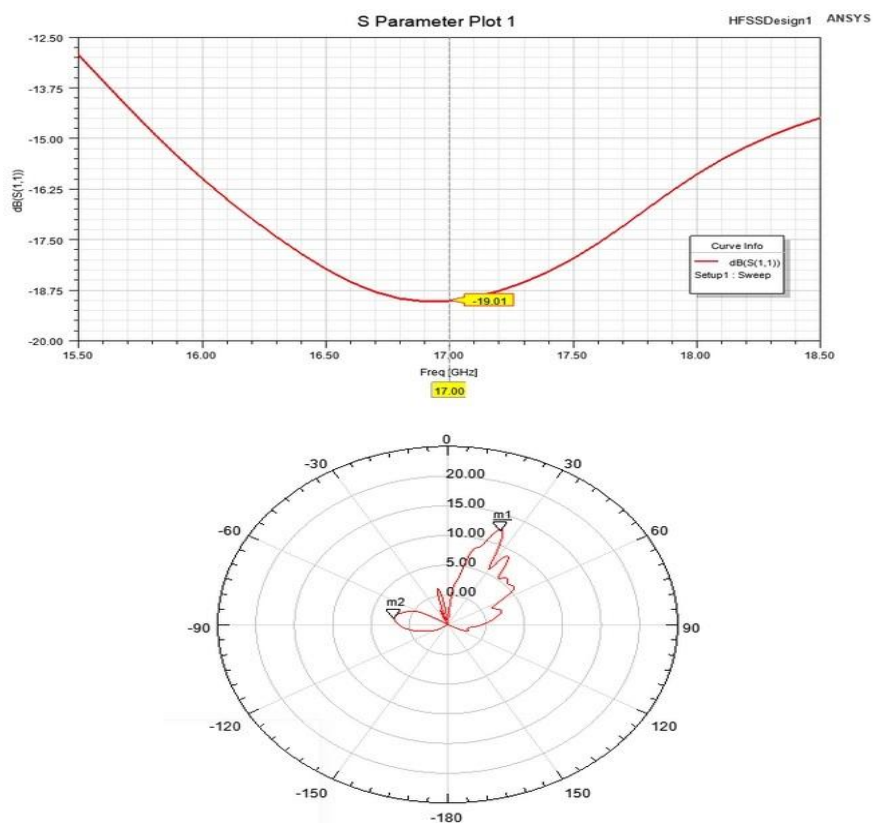


Figura 5.2: Perda de retorno (S_{11}) (acima) e padrão de radiação (abaixo) da antena holográfica na dimensão 150 x 96.05 mm com ângulo de radiação de 30°.

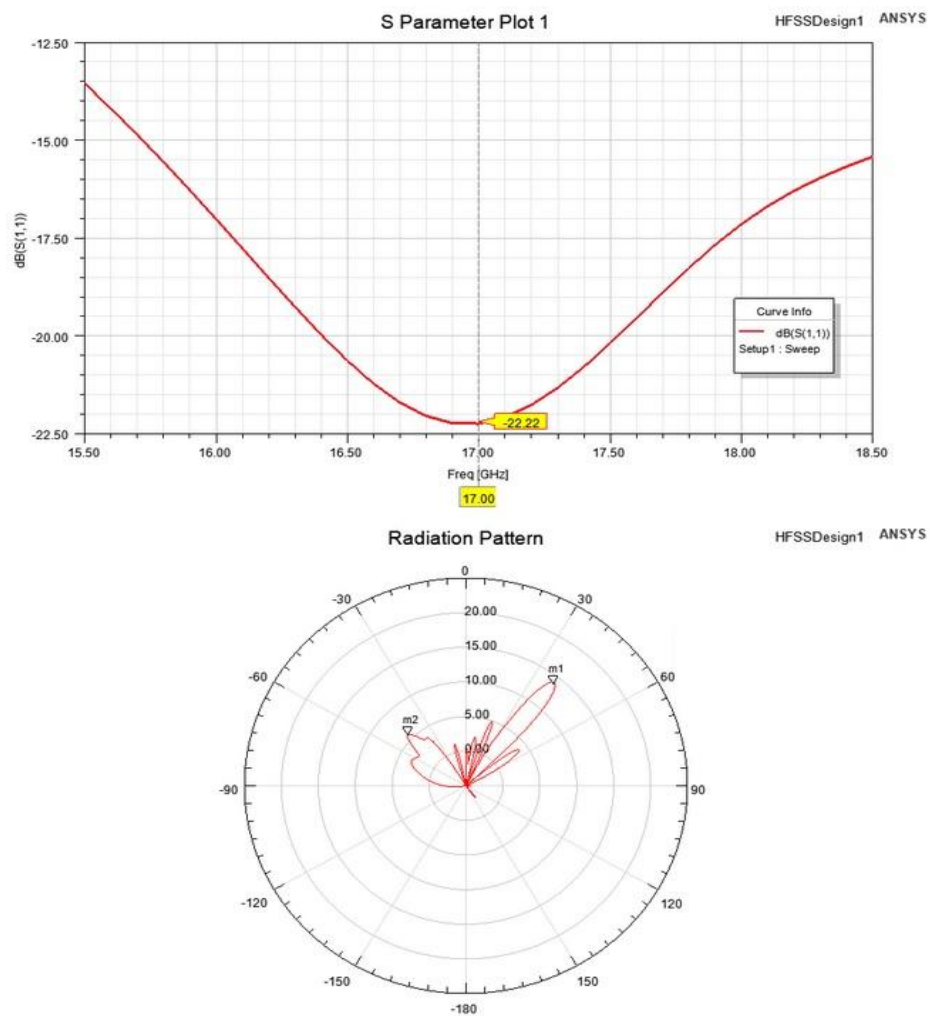


Figura 5.3: Perda de retorno (S_{11}) (acima) e padrão de radiação (abaixo) da antena holográfica na dimensão 150 x 96.05 mm com ângulo de radiação de 45°.

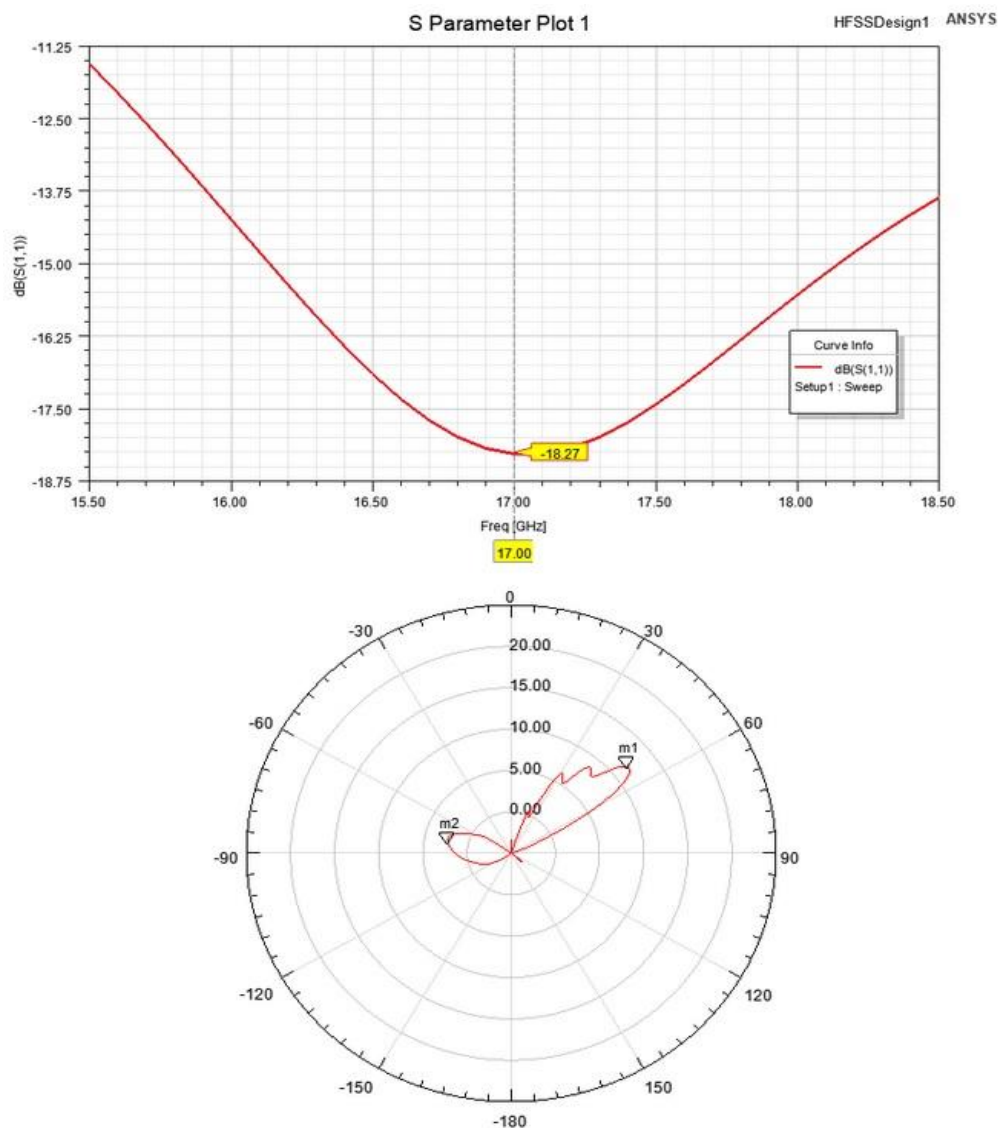


Figura 5.4: Perda de retorno (S_{11}) (acima) e padrão de radiação (abaixo) da antena holográfica na dimensão 150 x 96.05 mm com ângulo de radiação de 60°.

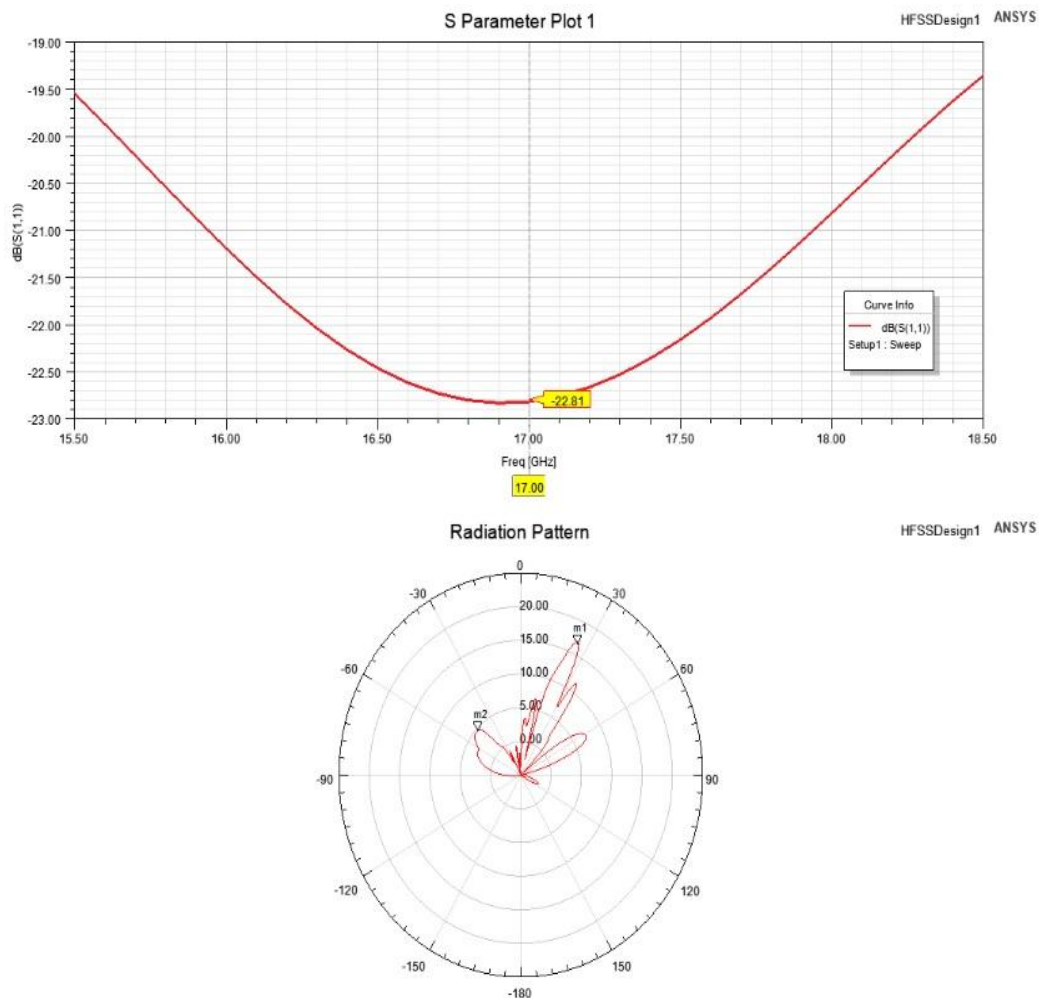


Figura 5.5: Perda de retorno (S_{11}) (acima) e padrão de radiação (abaixo) da antena holográfica na dimensão 202.3 x 127 mm com ângulo de radiação de 30°.

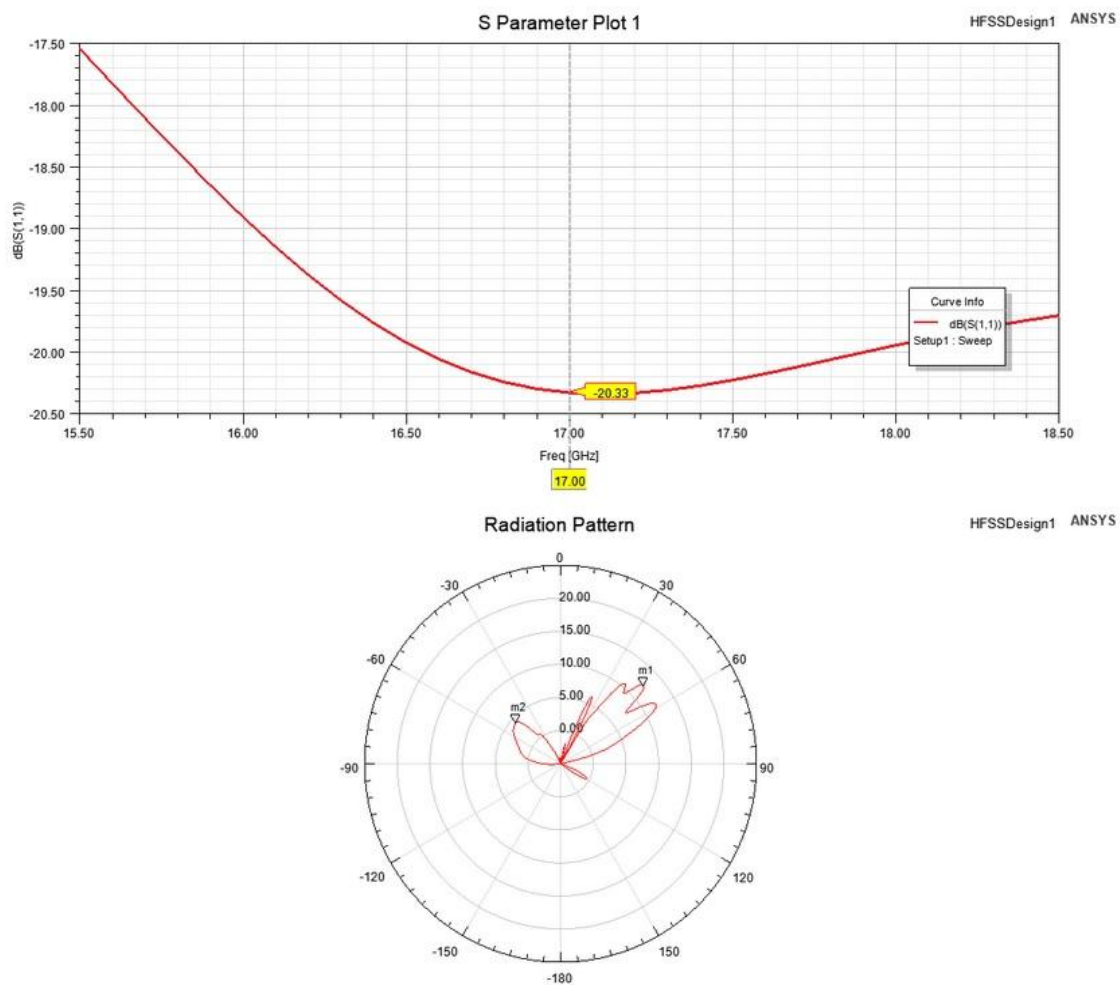


Figura 5.6: Perda de retorno (S_{11}) (acima) e padrão de radiação (abaixo) da antena holográfica na dimensão 202.3 x 127 mm com ângulo de radiação de 45°.

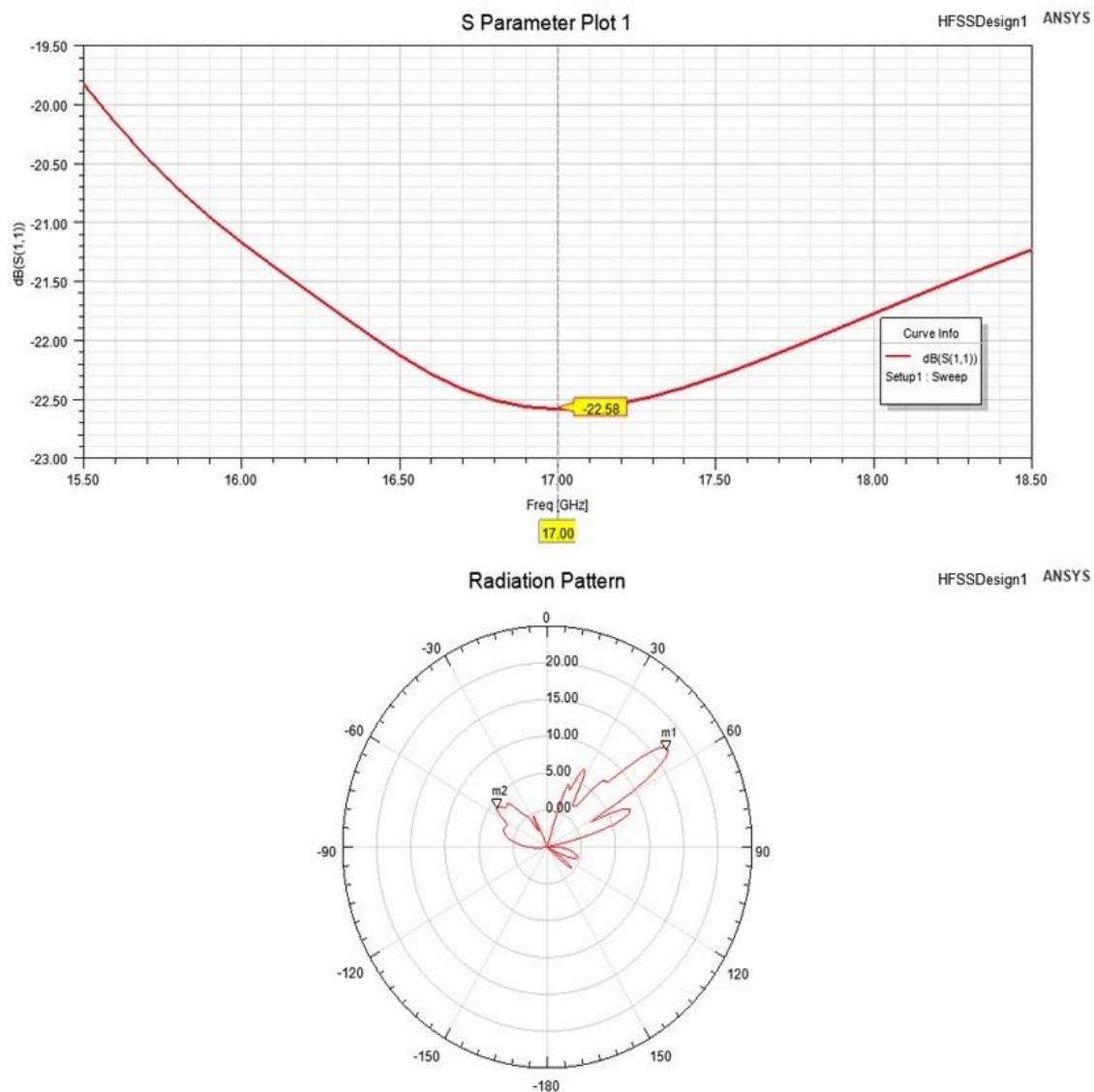


Figura 5.7: Perda de retorno (S_{11}) (acima) e padrão de radiação (abaixo) da antena holográfica na dimensão 202.3 x 127 mm com ângulo de radiação de 60°.

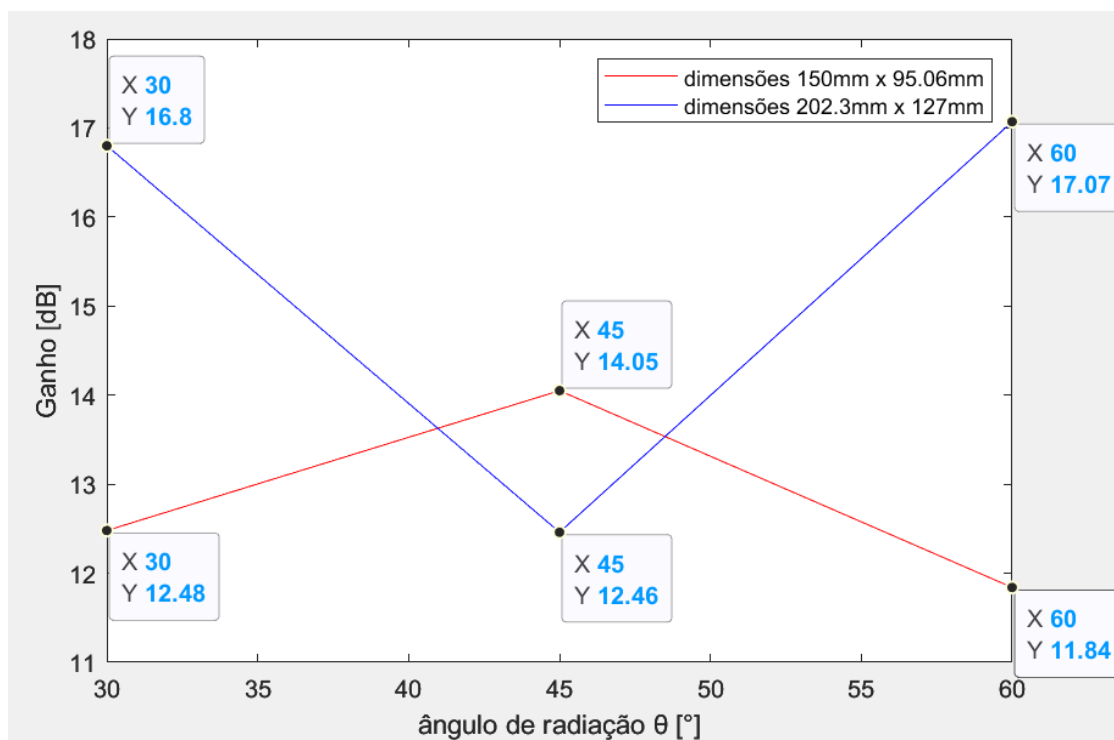


Figura 5.8: Gráfico do ganho em função do tamanho da antena e do ângulo de radiação.

7 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos após simulações verificam o estudo. Foram utilizados os softwares MATLAB, HFSS e os conhecimentos adquiridos durante o curso de Engenharia de Telecomunicações, projetaram-se antenas holográficas baseadas em superfícies de impedância artificial que são construídas sobre estruturas metálicas com substratos dielétricos finos e aterrados.

A superfície holográfica é projetada para formar um feixe de lápis com alto ganho na direção desejada usando modulação de impedância de superfície artificial baseada na técnica holográfica. As antenas holográficas simuladas neste trabalho irradiam em torno de 30° , 45° e 60° do plano normal na frequência de 17 GHz, porém a eficiência das antenas holográficas se comprova em outras faixas de frequência da banda larga.

Neste estudo, confirmou-se que as antenas holográficas são excelentes candidatas para objetos e projetos mais complexos, devido ao seu alto ganho, baixo perfil e por ser fácil de realizar um padrão de radiação desejado.

7.1 Trabalhos futuros

Para os trabalhos futuros, pretende-se adicionar mais um ou dois monopolos para verificar o comportamento da Antena Holográfica.

REFERÊNCIAS

- [1] Fan Yang e Yahya Ramat-Samii, Surface Electromagnetics With Applications in Antenna, Microwave and Optical Engineering. Cambridge University Press; 1st edition (August 1, 2019)
- [2] Karim Achouri e Christophe Caloz, Electromagnetic Metasurfaces Theory and Applications. Wiley-IEEE PRESS 2021
- [3] Christopher L. Holloway, Edward F. Kuester, Joshua A. Gordon, John O'Hara, Jim Booth, e David R. Smith, An Overview of the Theory and Applications of Metasurfaces: The two-Dimensional Equivalents of Metamaterials. IEEE Antennas and Propagation Magazine (Volume: 54, Issue: 2, April 2012)
- [4] Syed S. Bukhari, J(Yiannis) Vardaxoglou e William Whittow, A Metasurfaces Review: Definitions and Applications. Appl. Sci. 2019, 9, 2727
- [5] Aobo Li, Shreya Singh e Dan Sievenpiper, Metasurfaces and their applications . Gruter Nanophotonics 2018; 7(6): 989–1011
- [6] Zenneck, J.. Propagation of plane em waves along a plane conducting surface. Ann. Phys.(Leipzig), 23(1):907, 1907.
- [7] Pandi, S.. Holographic metasurface leaky wave antennas. 2017
- [8] Sievenpiper, D. F.. High-impedance electromagnetic surfaces. 1999
- [9] Fong, B. H.; Colburn, J. S.; Ottusch, J. J.; Visher, J. L. ; Sievenpiper, D. F.. Scalar and tensor holographic artificial impedance surfaces. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 58(10):3212– 3221, 2010
- [10] Balanis, C. A.. Advanced engineering electromagnetics. John Wiley & Sons, 1999.
- [11] Collin, R. E.. Field theory of guided waves. 1960.
- [12] Solymar, L.; Shamoni, E.. Waves in metamaterials. Oxford University Press, 2009.
- [13] Oliner, A. A.. Leaky waves: Basic properties and applications. In: PROCEEDINGS OF 1997 Asia-Pacific Microwave Conference, volumen 1, p. 397–400. IEEE, 1997.
- [14] YABLONOVITCH, E.. Photonic band-gap structures. JOSA B, 10(2):283–295, 1993
- [15] PANDI, S. BALANIS, C. A. BIRTCHER, C. R.. Design of scalar impedance holographic metasurfaces for antenna beam formation with desired polarization. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 63(7):3016–3024, 2015.
- [16] LI, M.; XIAO, S.-Q. ; SIEVENPIPER, D. F.. Polarization-insensitive holographic surfaces with broadside radiation. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 64(12):5272–5280, 2016.

- [17] Sun, Z.; Zuo, X.; Guan, T. ; Chen, W.. Artificial TE-mode surface waves at metal surfaces mimicking surface plasmons. *Optics express*, 22(4):4714–4722, 2014.
- [18] The Museum of Holography, chicago illinois.
<https://www.atlasobscura.com/places/museum-holography-mro>.
- [19] Hariharan, P.; Hariharan, P.. *Optical Holography: Principles, techniques and applications*. Cambridge University Press, 1996.
- [20] Li, A.; Singh, S. ; Sievenpiper, D.. Metasurfaces and their applications. *Nanophotonics*, 7(6):989–1011, 2018.