



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CÂMPUS DE PALMAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

OSMAR CELESTINO DOS SANTOS JUNIOR

**PROJETO DE UM ARRANJO PARA A FUTURA
TECNOLOGIA MÓVEL 6G**

Palmas/TO
2022

OSMAR CELESTINO DOS SANTOS JUNIOR

**PROJETO DE UM ARRANJO PARA A FUTURA
TECNOLOGIA MÓVEL 6G**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à UFT –
Universidade Federal do Tocantins – Câmpus
Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Elétrica,
como requisito parcial para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Humberto Xavier de Araújo.

Palmas/TO
2022


**OSMAR CELESTINO DOS SANTOS
JÚNIOR**

**PROJETO DE UM ARRANJO PARA A FUTURA
TECNOLOGIAMÓVEL 6G**


Monografia foi avaliada e apresentada à UFT –
Universidade Federal do Tocantins – Campus
Universitário de Palmas, Curso de Engenharia elétrica
para obtenção do título de Bacharel e aprovada em sua
forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: Prof. Dr. Humberto Xavier de Araújo


Data de aprovação: 01/ 07/ 2022

Documento assinado digitalmente
 HUBERTO XAVIER DE ARAUJO
Data: 01/07/2022 14:52:17-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Humberto Xavier de Araújo, UFT

Documento assinado digitalmente
 Eliel Poggi dos Santos
Data: 01/07/2022 15:50:42-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Eliel Poggi dos Santos, UFT



Prof. Dr. Ivan Ney Alvizuri Romani, UFT

Palmas, 2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

J95p Junior, Osmar Celestino dos Santos.
Projeto de um arranjo para a futura tecnologia móvel 6G. / Osmar
Celestino dos Santos Junior. – Palmas, TO, 2022.
54 f.

Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus
Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Elétrica, 2022.

Orientador: Humberto Xavier de Araújo

1. Antenas. 2. Microstrip. 3. Arranjo. 4. Metamaterial. I. Título

CDD 621.3

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer
forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte.
A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184
do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

*“No fim tudo dá certo, e se não deu certo é
porque ainda não chegou ao fim”*
(FERNANDO SABINO)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus.

Aos meus pais Osmar Celestino dos Santos e Fabiana Ribeiro de Oliveira pelo apoio incondicional, companheirismo e compreensão ao longo da minha jornada e agradeço também todos os conselhos passados por eles para moldar o ser humano que me tornei.

Aos meus amigos, Álvaro, Felipe, Pedro Mota, Pedro Leal e Paulo Eduardo por todos os momentos compartilhados dentro e fora do ambiente acadêmico.

Ao meu orientador Prof. Dr. Humberto Xavier de Araújo pelo seu apoio, companheirismo e conselhos dados, pois sem ele este trabalho não seria possível.

À professora Dr. Kathy Camila Cardozo Osinski Senhorini tutora do PET por todo conhecimento repassado ao longo da minha participação como petiano.

A todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para a minha formação.

RESUMO

Com o avanço da tecnologia temos mais dispositivos conectados na rede, assim, devido à necessidade de uma baixa latência, alta velocidade e maior largura de banda se torna necessário o estudo de uma nova geração de telefonia móvel (6G) que em contraste com a geração ainda em implantação (5G) a nova geração proporciona uma latência menor que 1ms e uma transmissão de dados na escala Tb/s. Este trabalho busca um estudo da tecnologia móvel 6G na faixa de 116,9 GHz a partir do projeto de uma antena de microfita aplicando os processos de otimização para a frequência esperada, o maior desafio deste trabalho foi obter uma perda por retorno utilizável na frequência desejada, a perda esperada para aplicação é de -10 dB. A partir das células metamateriais e da tecnologia do arranjo de antenas foi obtido uma largura de banda de 7,1 GHz, a menor perda por retorno obtida foi a do arranjo com as células CLL de -20,76 dB e a maior eficiência obtida foi com o *patch* retangular de 95,82%, mostrando que a partir da utilização dos arranjos e dos metamateriais é possível construir uma antena de microfita para a nova geração de telefonia móvel.

Palavras-chave: Microfita; Metamateriais; Arranjo; Telefonia móvel.

ABSTRACT

With the advance of technology, we have more devices connected to the network, therefore, due to the need for low latency, high speed and greater bandwidth, it becomes necessary to study a new generation of mobile communications (6G). In contrast with in progress generation (5G) the new generation provides very low latency, lower than 1ms and a data transmission in the Tb/s scale. This paper is a study of 6G mobile technology in the 116.9 GHz band from the design of a microstrip antenna applying the optimization processes for the expected frequency the biggest challenge of this paper was to obtain a usable return loss at the desired frequency, the expected loss for application is -10 dB. From the metamaterial cells and the antenna array technology, a bandwidth of 7.1 GHz was obtained, the lowest return loss obtained was the array with the CLL cells of -20.76 dB and the highest efficiency obtained was with a rectangular *patch* of 95.82%, showing that using the array and metamaterials it is possible to build a microstrip antenna for the new generation of mobile telephony.

Keywords: Microstrip; Metamaterial; Array; mobile communications.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama de Radiação	22
Figura 2 - Regiões de Campo	23
Figura 3 - <i>Microstrip</i> com <i>patch</i> retangular	24
Figura 4 - Dimensionamento do <i>Patch</i> Retangular	25
Figura 5 - Casamento de Impedância.....	27
Figura 6 - Arranjo Retangular 12x1	29
Figura 7 - Espectro de Onda.....	29
Figura 8 - Diagrama de tecnologias da 6G.....	30
Figura 9 - Expectativa de Dispositivos Conectados	32
Figura 10 - Características elétricas dos materiais	33
Figura 11 - Propagação da onda entre meios	34
Figura 12 - Célula Metamaterial CLL.....	35
Figura 13 - Célula Metamaterial Fractal	36
Figura 14 - Densidade de corrente na superfície CLL.....	36
Figura 15 - Densidade de corrente na superfície Fractal.....	37
Figura 16 - <i>Patch</i> Retangular	38
Figura 17 - Diagrama de Radiação da diretividade para o <i>Patch</i> retangular	39
Figura 18 - Diagrama de radiação do ganho para o <i>Patch</i> retangular	39
Figura 19 - Perda por retorno do <i>Patch</i> retangular	40
Figura 20 - Arranjo 12x1 <i>Patch</i> Retangular em 116,9 GHz	41
Figura 21 - Diagrama de radiação da diretividade do arranjo	42
Figura 22 - Diagrama de radiação do ganho do arranjo.....	42
Figura 23 - Perda por retorno do arranjo.....	43
Figura 24 - Arranjo 12x1 <i>Patch</i> Retangular com células CLL em 116,9 GHz	44
Figura 25 - Diagrama de Radiação da diretividade do Arranjo com células CLL	44
Figura 26 - Diagrama de radiação do ganho do Arranjo com células CLL	45
Figura 27- Perda por retorno do Arranjo com células CLL	45
Figura 28 - Arranjo 12x1 <i>Patch</i> Retangular com célula Fractal em 116,9 GHz	46
Figura 29 - Diagrama de radiação da diretividade do Arranjo com célula Fractal.....	46
Figura 30 - Diagrama de radiação do ganho do Arranjo com célula Fractal	47
Figura 31 - Perda por retorno do Arranjo com célula Fractal	47
Figura 32 - Comparação da perda por retorno dos arranjos	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação da perda por retorno e largura de banda das estruturas.....	48
Tabela 2 - Eficiência das estruturas	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

5G	Quinta Geração
6G	Sexta Geração
THz	Terahertz
GHz	Gigahertz
dB	Decibel
ms	Milisegundo
RL	<i>Return Loss</i> – Perda por Retorno
MIMO	<i>Multiple-Input and Multiple Output</i> – Múltipla-Entrada e Múltipla Saída
RF	Radiofrequência
TE	Modo Transverso Elétrico
TM	Modo Transverso Magnético
TEM	Modo Transverso Eletromagnético
VSWR	<i>Voltage Standing Wave Ratio</i> – Razão de Tensão de Onda Estacionária
DNG	<i>Double Negative</i> – Negativo Duplo
DPS	<i>Double Positive</i> – Positivo Duplo
CLL	<i>Capacitively Load Loop</i> – Loop de Carga Capacitiva
IoT	<i>Internet of Things</i> – Internet das Coisas
mMTC	<i>Massive Machine Type Communications</i> – Larga Comunicação das Máquinas
eMBB	<i>Enhanced Mobile Broadband</i> - Banda Móvel Melhorada
MMIC	<i>Monolithic Microwave Integrated Circuit</i> – Circuito Integrado de Micro-ondas Monolítico

uRLLC

Ultra Reliable low latency communications – Ultra Confiabilidade da
latência baixa

ODS

Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

LISTA DE SÍMBOLOS

ϵ_r	Permissividade Elétrica Relativa
ϵ_0	Permissividade Elétrica do Vácuo
μ_r	Permeabilidade Magnética Relativa
μ_0	Permeabilidade Magnética do Vácuo
ω	Velocidade Angular
k	Constante de Propagação
γ	Constante de Propagação Complexa
β	Constante de Fase
\vec{E}	Campo Elétrico
\vec{H}	Campo Magnético
\vec{D}	Campo de Deslocamento Elétrico
\vec{M}	Vetor Magnetização
\wp	Potência Total
P_{rad}	Potência Radiada
U	Intensidade de Radiação
D	Diretividade
G	Ganho
RL	<i>Return loss - Perda por Retorno</i>
$VSWR$	Voltage Standing Wave Ratio – Relação de Onda Estacionária de Tensão
Γ	Coefficiente de Reflexão
ϵ'	Componente Real da Permissividade Elétrica
ϵ''	Componente Imaginário da Permissividade Elétrica
α	Constante de Atenuação

α_d	Constante de Atenuação no Dielétrico
α_c	Constante de Atenuação no Condutor
\vec{J}	Densidade Superficial de Corrente
Z	Impedância
Z_0	Impedância característica
Z_L	Impedância da Carga
r	Raio
σ	Condutividade Elétrica
R	Resistência Elétrica
R_{in}	Resistência de Entrada
f	Frequência
f_R	Frequência de Ressonância
ϵ_{Ref}	Permissividade Elétrica Relativa
\mathcal{E}	Campo Elétrico Instantâneo
\mathcal{H}	Campo Magnético Instantâneo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	15
1.2 JUSTIFICATIVA	16
1.3 OBJETIVOS	17
1.3.1 Objetivos Gerais	17
1.3.2 Objetivos Específicos	17
1.4 METODOLOGIA	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 TEORIA ELETROMAGNÉTICA	18
2.1.1 Ondas no espaço livre	18
2.2 ANTENAS	20
2.2.1 Diagrama de Radiação	22
2.3 MICROFITAS	23
2.3.1 Método da Linha de Transmissão	24
2.3.2 Método da cavidade ressonante	26
2.3.3 Casamento de impedância	27
2.4 ARRANJOS	28
2.5 TECNOLOGIA 6G	29
2.6 METAMATERIAIS	32
3 RESULTADOS	37
3.1 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	48
4 CONCLUSÕES	50
REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O ritmo da inovação científica e tecnológica no campo da telefonia móvel nunca parou. Da primeira geração (1G) de comunicação analógica para a quinta geração (5G) a telefonia móvel não só mudou drasticamente o estilo de vida das pessoas, mas também acelerou a informatização da sociedade (GUANGYI LIU, 2020).

Prevê-se que o tráfego de IP global em 2022 será o triplo do que era em 2017 e irá alcançar cerca de 400 exabytes (EB) por mês (CISCO, 2018). Notavelmente, o tráfego *wireless* e dos dispositivos móveis são responsáveis por cerca de 71% do tráfego total de IP mundial, que é amplamente impulsionado pela expansão da internet das coisas (IoT), o aumento de dispositivos móveis que necessitam de internet como *smartphones*, *tablets* e televisores, bem como a popularidade de aplicativos baseados em conteúdo de *streaming* como Youtube e Netflix (ZHANG.L, LIANG.Y.C, NIYATO.D, 2019).

A demanda cada vez maior por dispositivos que consomem muita largura de banda, com requisitos de taxa de dados mais altas, estimulou a pesquisa e comunidades reguladoras para discutir a visão para a sexta geração de telefonia móvel (6G) (K. L. M. LATVA-AHO, 2019). Em contraste com a quinta geração, que promete taxas de dados de 100 Gbps no espectro de ondas milimétricas, espera-se que as redes 6G forneçam transmissão de dados na escala de Multi-Tb/s utilizando o espectro não alocado THz (ZHANG et al, 2019).

As três aplicações principais para a 5G, é a ultra confiabilidade da latência baixa (uRLLC), larga comunicação das máquinas (mMTC) e a banda móvel melhorada (Embb), têm uma melhora na sua qualidade e uma evolução na era 6G. É previsto que o índice de desempenho da 6G será de 10-100 vezes maior que a 5G. É esperado que a 6G siga quatro direções: Internet das máquinas, o uso de IA para comunicação *wireless*, a melhora na latência, na velocidade e na sua capacidade de usuários conectados (SAMSUNG, 2020).

A onda no espectro do THz refere-se as ondas eletromagnéticas com o espectro entre 0,1 a 10 THz, com um comprimento de onda de 30 à 3000 μm , o que também cobre um espectro entre as micro-ondas e o infravermelho. Devido as características físicas da própria banda THz, há características como latência muito baixa, excelente diretividade, anti-interferência, alta penetração e baixo requisito para tamanhos de antena. O delay na transmissão na rede será menor que um milissegundo, chegando a sub-milissegundos. Devido à redução do comprimento de onda, o tamanho da antena será muito menor e o nível de integração será muito maior. Isso também torna a tecnologia de antenas integradas possíveis. A antena 6G será provavelmente

uma antena composta de arranjos MIMO, o que integra mais antenas para adaptar ao espectro do terahertz e fornece mais recursos (ZHAO YAJUN, YU GUANGHUI, XU HANQING, 2019).

Devido a essas características uma antena que atende bem a esta tecnologia seria a antena de microfita. Os principais recursos de uma antena *patch* microfita são facilidade de construção, peso leve, baixo custo, a antena pode assumir uma forma arbitrária do espaço que ocupa se o substrato for flexível e o processo de produção tem uma alta nível de integração. Essas vantagens das antenas microfita as tornam populares em muitas comunicações sem fio aplicações como telemetria e comunicações, aviação, comunicações navais, orientação automática de inteligência armamento, radar, sistemas GPS. As desvantagens das antenas de *patch* microfita são: banda de frequência estreita com baixa eficiência, têm grandes perdas e incapacidade de operar em níveis de alta potência do guia de ondas (KOEN W.A. DONGEN. V, PETER M. BERG V. D., NICOLAESCO. I, 2004).

Um metamaterial tem parâmetros constitutivos harmônicos no tempo que são contínuos no espaço - embora possam ser anisotrópicos, não homogêneo, não linear, espacial e temporalmente dispersivo e talvez até magnetoelétrico. Em um limite, a definição estrita de metamateriais usa meta no sentido de além, como na metafísica, e assim implica materiais com propriedades além daquelas dos materiais naturais. Isso essencialmente estreita o intervalo para materiais com permissividade e permeabilidade sendo ambos menores do que os valores do espaço livre (O. BREINBJERG, 2015). O presente trabalho irá utilizar o metamaterial para melhoria do ganho da antena de microfita 6G.

Visto a necessidade por baixa latência, alta velocidade e uma maior largura de banda. Este trabalho visa um projeto de uma antena com a tecnologia móvel 6G que trabalha no espectro terahertz, utilizando metamateriais para atenuação das perdas.

1.2 Justificativa

Considerando que a cada 10 anos temos uma nova tecnologia móvel, em 2030 estima-se que já teremos a 6G, como mostrado anteriormente o aumento de aparelhos conectados à rede, uma alta busca pela velocidade, a baixa latência e suas aplicações como inteligência artificial, automação nos veículos e hologramas se torna necessário os estudos relacionados à tecnologia móvel 6G.

O estudo da tecnologia 6G com aplicações em antenas de microfita melhoradas com os metamateriais para aumentar sua eficiência é importante, pois a arquitetura da microfita favorece a aplicação para telefonia móvel, justificando a relevância deste trabalho.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivos Gerais

Apresentar o estudo de um projeto de antena microfita para a tecnologia 6G e melhorar seu ganho com o auxílio dos metamateriais.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Analisar o processo de criação das antenas de microfita e suas características para seu projeto;
- Estudo da tecnologia móvel 6G;
- Compreender as características dos metamateriais para aplicar no projeto da antena de microfita buscando uma otimização;
- Projetar uma antena de microfita que suporte à tecnologia 6G no espectro terahertz;
- Analisar as perdas devido à alta frequência;
- Aprimoramento das antenas de microfita projetadas com o metamaterial.

1.4 METODOLOGIA

Inicialmente é feito um levantamento bibliográfico sobre o assunto. São abordados os conceitos de ondas, propagação de ondas e teoria das ondas guiadas. A segunda etapa consiste em compreender a antena que será abordada no projeto, a microfita. Na terceira etapa temos o levantamento bibliográfico acerca dos metamateriais para seu dimensionamento no projeto. Na quarta etapa temos o projeto e a simulação da antena, analisando seu ganho, diretividade, eficiência e suas perdas a quinta parte consiste em aplicar os metamateriais na antena e comparar os resultados obtidos com a primeira simulação e a última parte consiste na apresentação do resultado e estudo da sua viabilidade para aplicação da tecnologia móvel 6G.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 TEORIA ELETROMAGNÉTICA

Para analisar a antena de microfita proposta neste trabalho é preciso entender os conceitos da teoria eletromagnética pois temos ondas se propagando no guia de onda e ondas se propagando no espaço livre, as equações de Maxwell são dispostas fasorialmente pois assim é possível quantificar as perdas, o ganho e a largura de banda da antena.

2.1.1 Ondas no espaço livre

A transformada de Fourier pode ser usada para converter uma solução para as equações de Maxwell do domínio da frequência para o domínio do tempo (POZAR, 2012), assim na forma fasorial temos:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -j\omega\vec{B} - \vec{M} \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = j\omega\vec{D} + \vec{J} \quad (2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (4)$$

As fontes de corrente elétrica e magnética, \vec{J} e \vec{M} , em (1) e (2) são as densidades de corrente com unidades $\frac{A}{m^2}$ e $\frac{V}{m^2}$. Em muitos casos, no entanto, as correntes reais estarão na forma de uma corrente de linha ou uma corrente de dipolo infinitesimal (POZAR, 2012).

Nas equações de Maxwell apresentadas, presumiu-se que os campos elétricos e magnéticos estavam no espaço livre, sem a presença de corpos materiais. Na prática, os corpos materiais costumam estar presentes; isto complica a análise, mas também permite a aplicação útil das propriedades do material para componentes de microondas (POZAR, 2012).

Com a presença de corpos materiais há perdas no meio e perdas no condutor e estas perdas presentes nos RF e micro-ondas são representadas por uma tangente de perdas, que relaciona a razão entre a corrente de condução e o coeficiente da corrente imaginária (POZAR, 2012).

$$\tan \delta = \frac{\omega \epsilon'' + \sigma}{\omega \epsilon'} \quad (5)$$

Em um meio livre linear, isotrópico e homogêneo as equações de Maxwell na forma fasorial são (POZAR, 2012):

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \quad (6)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = j\omega\epsilon\vec{E} \quad (7)$$

Aplicando o rotacional em ambos os lados e utilizando as propriedades do operador nabla temos a equação de Helmholtz para estudar os comportamentos da onda.

$$\nabla^2 \vec{E} + \omega^2 \mu \epsilon \vec{E} = \mathbf{0} \quad (8)$$

$$\nabla^2 \vec{H} + \omega^2 \mu \epsilon \vec{H} = \mathbf{0} \quad (9)$$

Uma constante \mathbf{k} é definida chamada de constante de propagação (POZAR, 2012).

$$\mathbf{k} = \omega \sqrt{\mu \epsilon} \quad (10)$$

Em um meio sem perdas μ e ϵ são números reais, assim k também é real. Uma solução para as equações de Helmholtz pode ser encontrada considerando um campo elétrico com somente uma componente \hat{x} uniforme nas direções x e y , há assim duas soluções independentes para o campo elétrico e magnético na qual o campo elétrico se propaga na direção x e o campo magnético na direção y (POZAR, 2012).

$$E_x(z) = E^+ e^{-jkz} + E^- e^{-jkz} \quad (11)$$

$$H_y(z) = \frac{1}{\eta} E^+ e^{-jkz} + E^- e^{-jkz} \quad (12)$$

Onde $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ é conhecido como a impedância intrínseca do meio. A proporção dos campos elétrico e magnético é dado em unidades de impedância, conhecida como a impedância da onda, para ondas planas a impedância da onda é igual a impedância intrínseca do meio (POZAR, 2012).

Em um meio com perdas, se o meio for condutor com uma condutividade σ temos o rotacional do campo elétrico igual ao meio sem perdas e a equação (14) para o rotacional do campo magnético (POZAR, 2012).

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = j\omega\epsilon\vec{E} + \sigma\vec{E} \quad (13)$$

A equação 14 é similar a equação do meio sem perdas (7) a única diferença é que há uma componente a mais resultando em uma constante de propagação constante para o meio (POZAR, 2012).

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (14)$$

Onde α é a constante de atenuação, ou seja, a constante que representa as perdas, e β é denominada constante de fase. A constante de atenuação também está presente no meio sem perdas, entretanto, no meio sem perdas $\alpha = 0$ e $\beta = k$ (POZAR, 2012).

Muitos problemas práticos envolvem os bons condutores, no caso dos bons condutores há uma análise especial, no qual a corrente de condução é muito maior que a corrente de deslocamento, o que significa que $\sigma \gg \omega\epsilon$. A maioria dos metais podem ser caracterizados como bons condutores, assim a constante de propagação pode ser obtida através de um valor aproximado (POZAR, 2012).

$$\gamma = (1 + j)\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \quad (15)$$

2.2 ANTENAS

Uma antena é definida como uma estrutura de transição entre o espaço livre e um guia de onda, é um meio para irradiar ou receber ondas de rádio (BALANIS, 2016).

Para descrever a performance de uma antena, as definições de vários parâmetros são necessárias. As ondas eletromagnéticas são usadas para transportar informações através de um meio sem fio ou um guia de onda, de um ponto ao outro. Assim, é natural supor que a potência e a energia estão associadas à campos eletromagnéticos. A forma como é expressada a potência associada a uma onda eletromagnética é o vetor de Poynting definido como (BALANIS, 2016):

$$\mathbf{\Phi} = \mathbf{\Sigma} \times \mathbf{H} \quad (16)$$

Como o vetor de Poynting representa a densidade de potência a potência total que passa por uma superfície fechada pode ser obtida integrando a componente normal do vetor de Poynting sobre toda a superfície (BALANIS, 2016).

$$\wp = \oint \mathbf{\Phi} \cdot d\mathbf{s} \quad (17)$$

O vetor de Poynting, entretanto quantifica a potência instantânea em determinado momento para estimar a potência média de radiação temos que (BALANIS, 2016):

$$P_{rad} = \frac{1}{2} \oint \text{Re}(E \times H^*) \cdot ds \quad (18)$$

A partir da potência radiada é possível encontrar a intensidade e a radiação, que é definida com a potência radiada de uma antena por unidade de ângulo sólido (BALANIS, 2016).

$$U = r^2 W_{rad} \quad (19)$$

A diretividade de uma antena é definida como o quantitativo de intensidade de radiação em uma dada direção sobre a intensidade de radiação média de todas as direções (BALANIS, 2016).

$$D = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (20)$$

O ganho de uma antena em uma dada direção é definido como a razão da intensidade, em uma dada direção, para a intensidade de radiação que seria obtida se a potência aceita pela antena fosse irradiada isotropicamente (BALANIS, 2016).

$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (21)$$

A amplitude da tensão refletida normalizada com a amplitude da tensão incidente é definida como coeficiente de reflexão (POZAR, 2012).

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (22)$$

Quando a carga não está casada, nem toda potência disponível do gerador é entregue a carga, há uma perda chamada perda de retorno (RL) dada em dB definida por (POZAR, 2012):

$$RL = -20 \log|\Gamma| \quad (23)$$

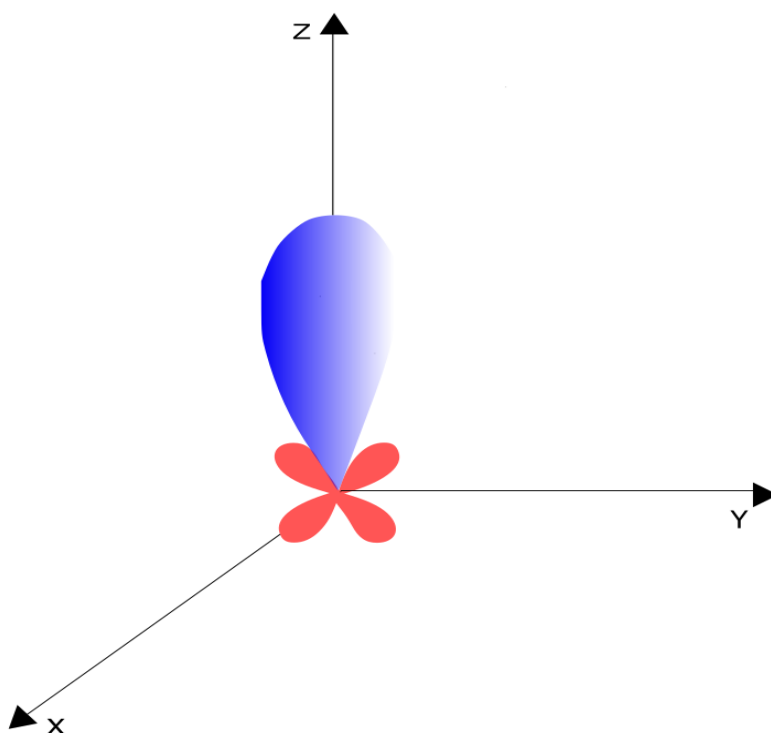
O parâmetro que determina quantitativamente o quanto a carga está casada é chamado de VSWR é a razão da tensão máxima com a tensão mínima relacionada com o a constante de reflexão e é definido por (POZAR, 2012):

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (24)$$

2.2.1 Diagrama de Radiação

O diagrama de radiação de uma antena é definido como uma função matemática ou representação gráfica das propriedades de radiação da antena. Na maioria dos casos o diagrama de radiação é determinado na região de campo distante e é representado como uma função de coordenadas direcionais (BALANIS, 2016). O diagrama de radiação fornece informações das propriedades das antenas como densidade de fluxo de potência, intensidade de radiação, força do campo, diretividade, fase e polarização (BALANIS, 2016). Um exemplo de um diagrama de radiação é mostrado na Figura 1.

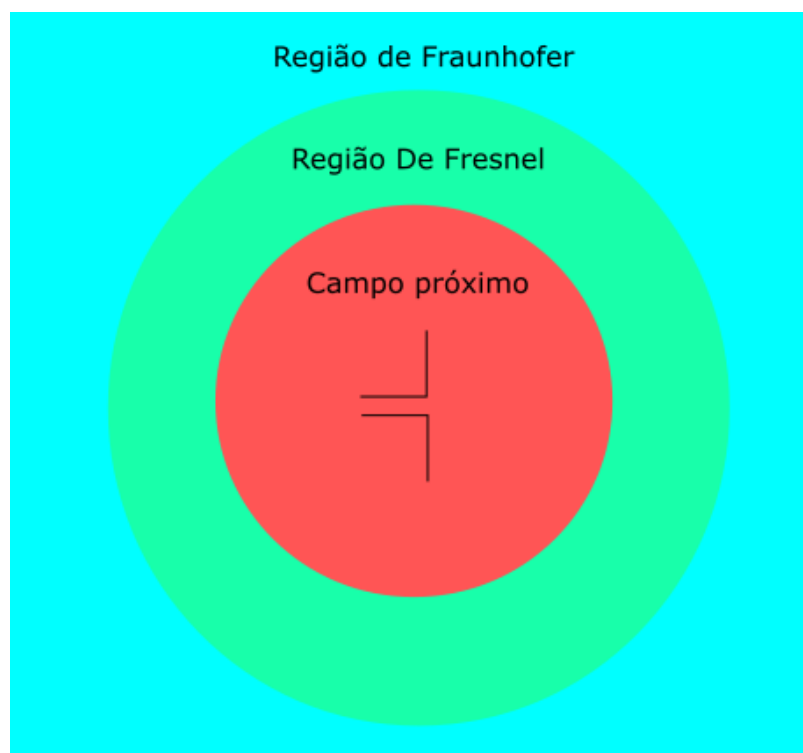
Figura 1 - Diagrama de Radiação



Fonte: Adaptado de Balanis, 2016.

O espaço no entorno da antena é subdividido em três regiões: (a) campo próximo reativo, (b) campo próximo radiante (Zona de Fresnel) e (c) campo distante (Região de Fraunhofer). A região de campo próximo reativo é definida como a porção de campo próximo que está mais próxima da antena onde o campo reativo predomina. A região da Zona de Fresnel é definida como a região de campo da antena entre a parte próxima reativa e o campo distante, nesta região a distribuição angular do campo é dependente da distância. Se a antena possui uma dimensão máxima que não seja larga comparada ao comprimento de onda, essa região não existe. A região de campo distante é a região em que o campo é independente da distância da antena (BALANIS, 2016). As regiões são mostradas a seguir na Figura 2.

Figura 2 - Regiões de Campo



Fonte: Adaptado de Balanis, 2016.

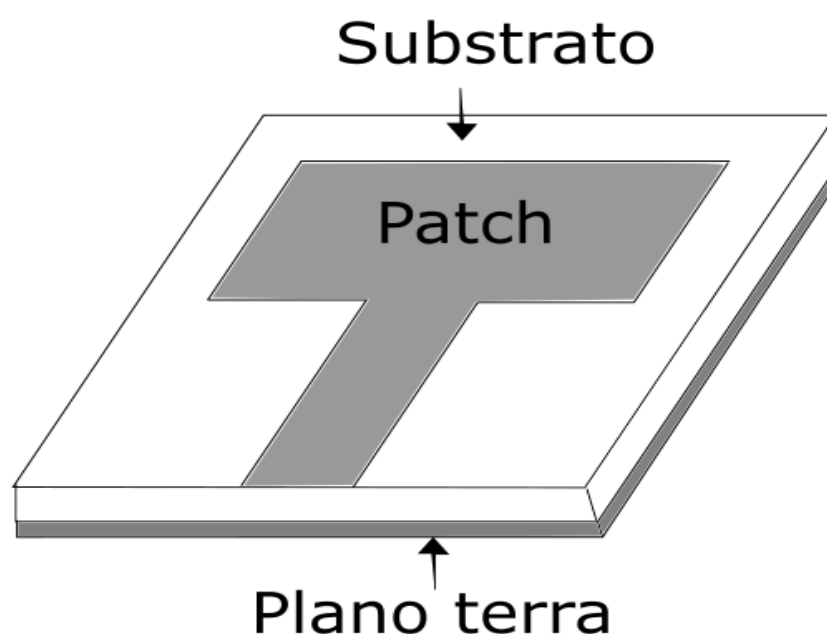
2.3 MICROFITA

Em aeronaves de alta performance, naves espaciais, satélites e mísseis, onde tamanho, peso, custo, performance, e perfis aerodinâmicos, antenas mais discretas são solicitadas. Atualmente há várias outras aplicações governamentais e comerciais como a rede móvel e aplicações em comunicações *wireless* que necessitam das mesmas especificações. As antenas de microfita são discretas, compatíveis com superfícies planares e não planares, simples e barata para produção quando comparada com outras antenas, utilizando a tecnologia moderna do

circuito impresso para sua fabricação, compatível com designs MMIC e são bastante versáteis em termos de ressonância, frequência, polarização e impedância (BALANIS, 2016).

A antena de microfita é composta por três componentes, uma faixa metálica fina chamada de *patch*, o substrato e o plano terra. O *patch* pode ter diversas formas, mas a forma retangular é a mais usada devido a facilidade na análise, que pode ser feita utilizando o método da linha de transmissão, e o método da cavidade (BALANIS, 2016). A Figura 3 apresenta uma antena de microfita com *patch* retangular.

Figura 3 – Microfita com *patch* retangular



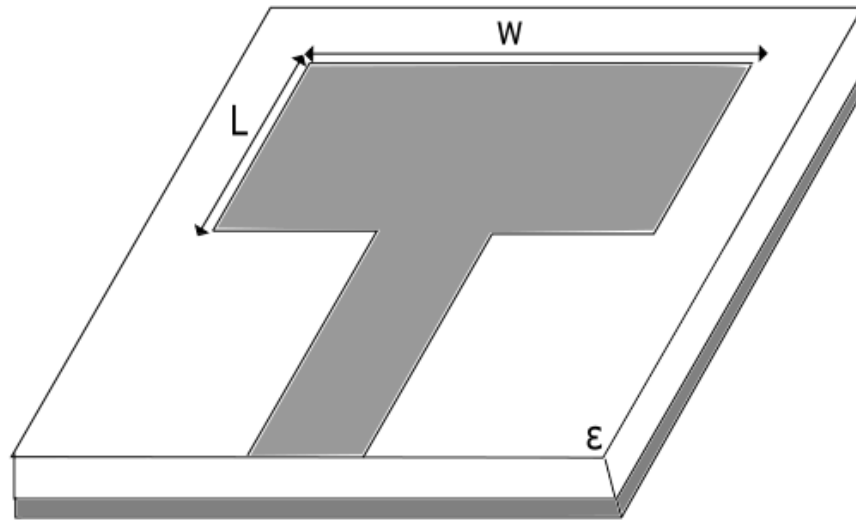
Fonte: Adaptado de Balanis, 2016.

2.3.1 Método da Linha de Transmissão

O método da linha de transmissão é o mais simples de todos, mas seus resultados são menos precisos. Basicamente o método de linha de transmissão representa uma antena *de* microfita de duas aberturas separadas por uma baixa impedância Z_c e uma linha de transmissão de comprimento L (BALANIS, 2016).

A permissividade elétrica é uma constante que pode ser definida como a constante dielétrica do material dielétrico uniforme levando em consideração as interferências e a velocidade de propagação na linha de microfita (BALANIS, 2016). A Figura 4 apresenta o dimensionamento do *patch* retangular.

Figura 4 - Dimensionamento do *Patch* Retangular



Fonte: Adaptado de Balanis, 2016.

No *patch* retangular é observado uma permissividade elétrica efetiva essencialmente constante em frequências baixas. Em frequências intermediárias essa constante aumenta e eventualmente é aproximada ao valor da constante dielétrica do substrato (BALANIS, 2016).

$$\epsilon_{ref} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} + \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{w}}} \right]^2 \quad (25)$$

Devido as interferências o *patch* da antena de microfita aparenta ser maior que suas dimensões físicas. A dimensão do *patch* é dada pela distância L e sua altura é dada por h (BALANIS, 2016). Podem ser calculadas de acordo com as equações a seguir.

$$\frac{\Delta L}{h} = 0,412 \frac{(\epsilon_{ref} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{ref} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8 \right)} \quad (26)$$

O projeto do *patch* retangular pode ser feito seguindo um roteiro, para isso é preciso conhecer a constante dielétrica do substrato, a frequência ressonante e a altura do substrato.

Primeiramente é calculado a largura para que possa ter uma boa eficiência de radiação (BALANIS, 2016).

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (27)$$

Onde c representa a velocidade da luz no espaço livre, após calculado a sua largura é determinado a sua constante dielétrica efetiva utilizando a equação (23). Assim o comprimento do *patch* pode ser determinado na seguinte equação.

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{ref} \mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (28)$$

2.3.2 Método da cavidade ressonante

As antenas de microfita se assemelham a cavidades carregadas com dielétrico, os campos normalizados dentro do substrato podem ser encontrados com mais precisão, tratando essa região como uma cavidade limitada por condutores elétricos acima e abaixo dela e por paredes magnéticas ao longo do perímetro do *patch* (BALANIS, 2016).

Devido à altura do substrato ser muito pequena, as variações de campo ao longo da altura serão constantes, e os efeitos de interferência do *patch* são desconsiderados. Assim apenas campos TM são considerados na cavidade (BALANIS, 2016).

O volume ao longo do *patch* pode ser considerado uma cavidade retangular carregada com um material dielétrico, sendo a permissividade elétrica do material dielétrico constante ϵ_r . Assim o vetor potencial A_x precisa satisfazer a seguinte equação de onda (BALANIS, 2016).

$$\nabla^2 A_x + k^2 A_x = 0 \quad (29)$$

Utilizando o método de separação de variáveis é possível encontrar a solução geral para o potencial.

$$A_x = A_{mnp} \cos(k_x x') \cos(k_y y') \cos(k_z z') \quad (30)$$

A_{mnp} representa o coeficiente de amplitude de cada modo mnp , os números de onda k_x , k_y e k_z são iguais a:

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \left(\frac{m\pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{W}\right)^2 \quad (31)$$

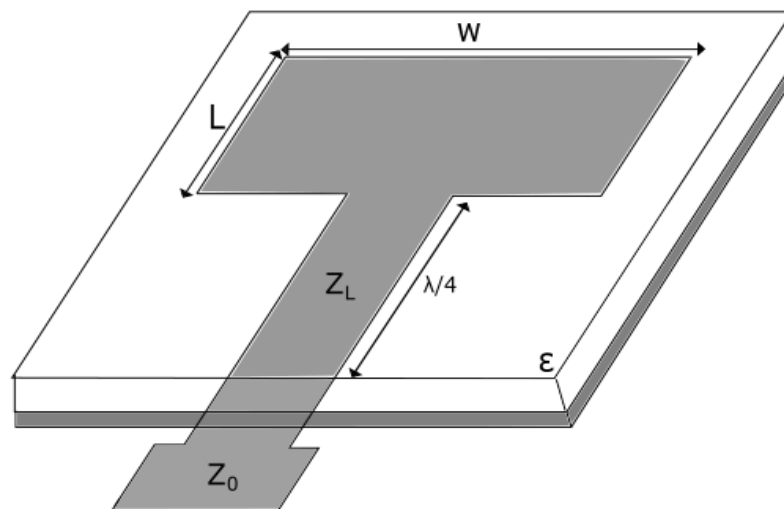
A frequência de ressonância para a cavidade é (BALANIS, 2016):

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{W}\right)^2} \quad (32)$$

2.3.3 Casamento de impedância

O casamento de impedância é uma importante parte projetos de antenas. A ideia básica neste método está na inserção de uma impedância colocada entre a carga e a linha de transmissão. A impedância colocada é sem perdas, para evitar perdas desnecessárias de energia, esta impedância é chamada de impedância característica Z_0 . As reflexões serão eliminadas na linha de transmissão a partir do casamento. Este método é utilizado pois promove a máxima energia entregue, melhora o sinal eliminando o ruído, e quando utilizada em arranjos pode reduzir os erros de amplitude e de fase. Desde que a carga Z_L tenha uma parte real positiva, uma rede de casamento pode ser encontrada assim como mostrado na Figura 5 (POZAR, 2012).

Figura 5 - Casamento de Impedância



Fonte: Adaptado de Balanis, 2016.

Para as antenas de microfita, onde utilizamos arranjos podemos utilizar o casamento de um quarto de comprimento de onda, onde é utilizando uma impedância Z_0 na entrada com uma resistência de entrada R_{in} , o comprimento de $\frac{\lambda}{4}$, a impedância Z_L é dada por (BALANIS, 2016).

$$Z_L = \sqrt{Z_0 R_{in}} \quad (33)$$

2.4 ARRANJOS

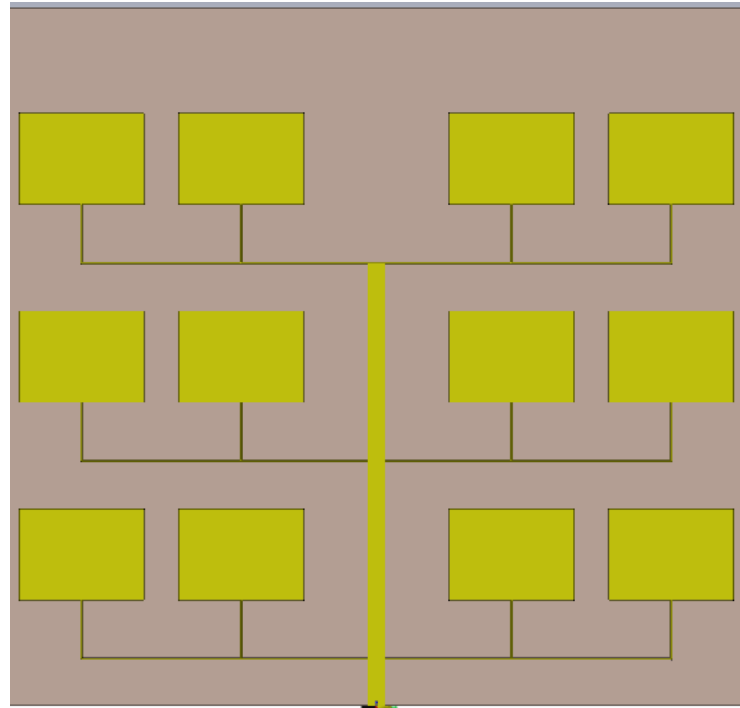
Normalmente, cada elemento fornece baixos valores de diretividade. Em muitas aplicações, é necessário projetar antenas com características muito diretivas para atender às demandas de comunicação de longa distância. Isso só pode ser feito aumentando o tamanho elétrico da antena. Aumentar as dimensões de um elemento individualmente pode levar a características mais diretivas. Outro método de ampliar as dimensões da antena sem necessariamente aumentar o tamanho dos elementos individuais é formar um conjunto de elementos radiantes em uma configuração elétrica e geométrica. Essa nova antena, formada por multielementos, é chamada de matriz, na maioria dos casos os elementos da matriz são idênticos por ter uma maior praticidade. O campo total irradiado da matriz é determinado pela soma vetorial dos campos irradiados pelos elementos individuais (BALANIS, 2016).

Há cinco pontos a serem considerados para modelar a matriz. Estes são apresentados a seguir.

- A configuração geométrica do arranjo (linear, circular, retangular, esférico).
- A disposição relativa entre os elementos
- A amplitude de excitação dos elementos individuais
- A fase de excitação dos elementos individuais
- O padrão relativo dos elementos individuais

As configurações utilizadas serão feitas com arranjos com *patch* retangular e *patch* circular, conforme é apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Arranjo Retangular 12x1



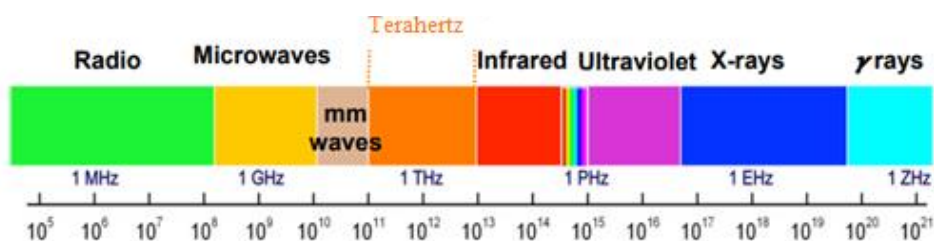
Fonte: Adaptado de Balanis, 2016.

A configuração utilizada é o arranjo com *patch* retangular 12x1 onde há 12 *patches* retangulares conectados à uma linha de transmissão.

2.5 TECNOLOGIA 6G

Frequências de 100GHz a 3THz são bandas promissoras para a próxima geração de *wireless* por causa das amplas faixas de espectro não utilizadas e inexploradas. Essas frequências também oferecem o potencial para aplicações revolucionárias que possibilitaram um novo pensamento, avanço em dispositivos, circuitos, e processamento de sinais e sistemas, o espectro de onda da tecnologia 6G é apresentado na Figura 7 (GUANGYI LIU, 2020).

Figura 7 - Espectro de Onda



Fonte: Claudio Macedo, 2021

Um desafio das últimas décadas é gerar sinais THz e desenvolver um sistema de comunicação nessa faixa devido à falta de transceptores, tornando esta banda uma das menos estudadas do espectro de onda eletromagnético. No entanto, com os avanços da tecnologia a comunicação THz está prevista para se tornar realidade nos próximos anos e se tornará a principal na era 6G (Y. HE et al, 2020).

Sinais THz sofrem com uma alta perda no espaço livre, que provêm da perda por espalhamento e da perda por absorção molecular. A perda por espalhamento é causada pela expansão da onda eletromagnética no espaço e aumenta em uma razão quadrática com a frequência de operação e a distância entre os dois pontos de comunicação baseado na lei de Friis. A perda por absorção molecular é causada pelo fato da energia parcial do sinal THz é convertida em energia interna cinética da molécula no ar (Y. HE et al, 2020).

Com a chegada da era 6G há também o surgimento de novas tecnologias e aprimoramento de tecnologias já existentes.

Figura 8 - Diagrama de tecnologias da 6G



Fonte: M. A. UUSITALO, 2021

O desenvolvimento sustentável foca particularmente na ODS da ONU para reduzir as desigualdades ao fornecer acesso global aos serviços digitais. Um exemplo de uso é “e-saúde para todos”, que contará com a 6G para fornecer serviços de saúde em todos os lugares, mesmo

em áreas remotas por exemplo, áreas rurais ou ambientes agressivos, onde a implantação de fibra não é possível (M. A. UUSITALO, 2021).

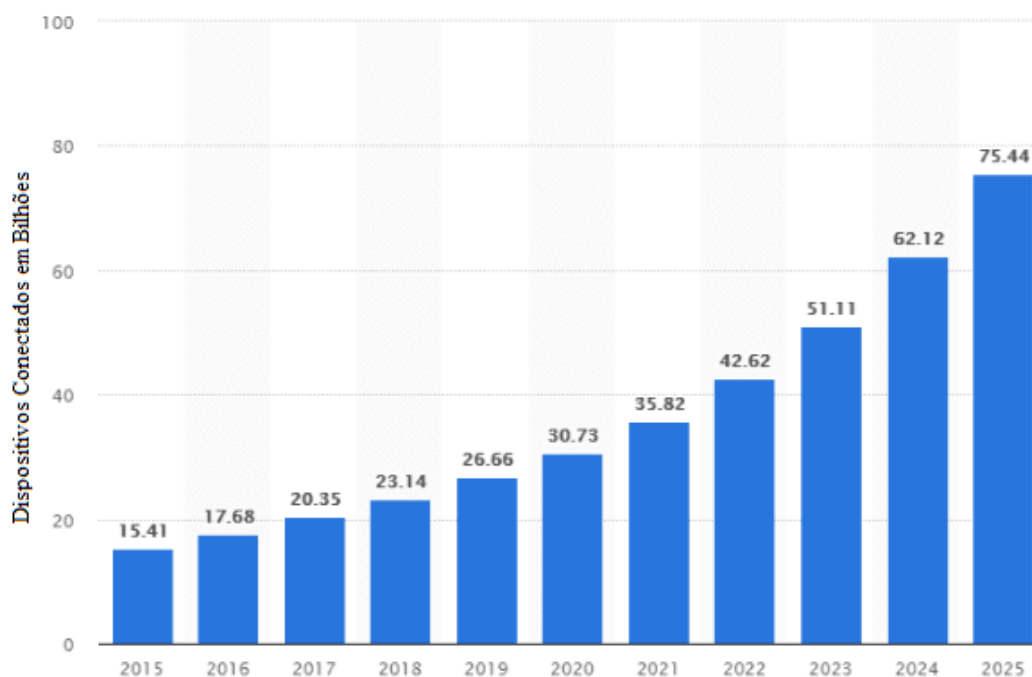
O *massive twinning* expande o uso de representações digitais do mundo aproveitando para poder controlar qualquer aspecto do mundo físico para melhorar a eficiência em diversas áreas, desde a otimização da automação na produção e fabricação tanto para prevenção de ameaças ou doenças na agricultura, este conceito pode se estender para cidades inteligentes. Um exemplo desse caso são as “Cidades Inteligentes Imersivas”, onde as representações digitais permitirão gerenciar vários fluxos por exemplo, transporte público, tráfego, água, energia, qualidade do ar. As representações digitais modelarão todos esses fluxos e permitirá prever eventos e fazer um gerenciamento de acordo (M. A. UUSITALO, 2021).

Novas tecnologias como realidade aumentada e comunicação holográfica irão ser possíveis com a era 6G, essas tecnologias dependem de uma alta taxa de dados. Para a comunicação holográfica temos que o tamanho de uma foto é 7-8Gbyte, um vídeo é cerca de 1,68-1,92Tbps, alcançando o nível de Tbp/s, a 6G é capaz de alcançar essa velocidade. Com a aplicação da realidade aumentada e dos hologramas, todos os tipos de sentidos de informação como visão, audição, toque, cheiro e gosto serão integrados para proporcionar uma experiência imersiva verdadeira a qualquer momento e em qualquer lugar, o sistema de wireless precisa entregar uma alta confiabilidade, baixa latência e alta taxa de dados. Para usuários individuais a taxa de dados tem uma estimativa de crescimento de pelo menos 10Gbps até 100Gbps (GUANGYI LIU, 2020).

A evolução dos robôs para robôs interativos, sistemas autônomos e a interação humana com esses sistemas, em casa e na sociedade para facilitar a vida cotidiana, bem como em ambiente industriais para melhorar a eficiência dos processos. Um exemplo são os “robôs de consumo”, onde a presença de robôs nas residências aumentará, realizando as diversas tarefas domésticas (M. A. UUSITALO, 2021).

A confiabilidade é necessária em casos específicos como controle industrial e cirurgia remotas as quais apenas o erro de bit em um bilhão transmitido é permitido. A confiabilidade da rede 6G deverá alcançar 99,99999%, o que é próximo da confiabilidade de uma rede cabeada, por outro lado a confiabilidade da 5G é de 99,999%, o que não satisfaz o requisito da rede 6G (GUANGYI LIU, 2020). Na tecnologia 5G temos um dispositivo conectado por metro quadrado, enquanto na 6G devido à alta capacidade de tráfego teremos dez dispositivos conectados por metro quadrado, ou 10 milhões de dispositivos por quilômetro quadrado, na Figura 9 há a expectativa de dispositivos conectados (GUANGYI LIU, 2020).

Figura 9 - Expectativa de Dispositivos Conectados



Fonte: Internet das coisas, 2021

O gráfico da Figura 9 mostra um crescimento de dispositivos conectados na rede de cerca de 20% a cada ano a partir de 2023, assim estima-se que em 2030 com a 6G tenhamos 150 bilhões de dispositivos conectados.

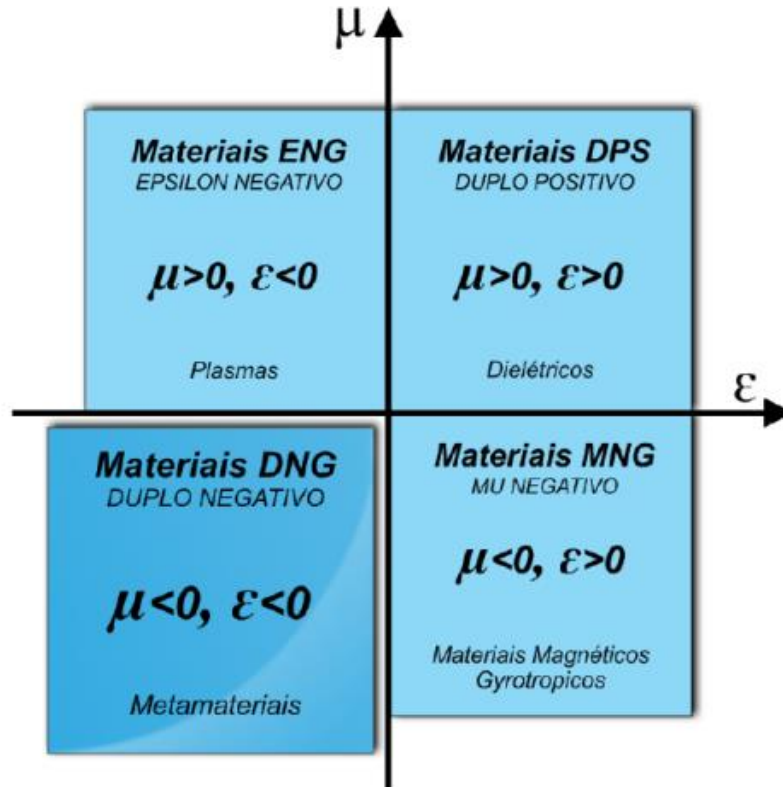
2.6 METAMATERIAIS

O conceito de material artificial foi amplamente explorado por Rodger M. Walser, em 1999 em seu trabalho sobre componentes macroscópicos com arquitetura celular sintética e periódica. Na verdade, a primeira tentativa de explorar o conceito de material "artificial" foi feita em 1898 com Jagadis Chunder Bose por seu experimento sobre estruturas torcidas. Mais tarde, em 1914, o trabalho sobre mídia quiral artificial foi publicado por Lindman. No entanto, foi apenas nos últimos 20 anos que o interesse na tecnologia de metamateriais teve um forte aumento, com trabalho intensivo de pesquisa de superlentes para dispositivos de telecomunicações, incluindo linha de transmissão e antenas (ARAUJO, 2012).

O metamaterial é um composto macroscópico com estrutura periódica ou não periódica, cujo comportamento é determinado por sua arquitetura celular e sua composição química. Na presença de um campo eletromagnético, este comportamento pode ser descrito pelos parâmetros

macroscópicos, permissividade ϵ e permeabilidade μ (ARAÚJO, 2012). Os metamateriais são classificados como DNG (*Double Negative*) possuem a permissividade elétrica e permeabilidade magnética em valores negativos conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Características elétricas dos materiais



Fonte: LIMBERGER, 2017

Esses parâmetros classificam os materiais em diferentes categorias: plasmas, dielétricos, metamateriais e materiais magnéticos gyrotrópicos.

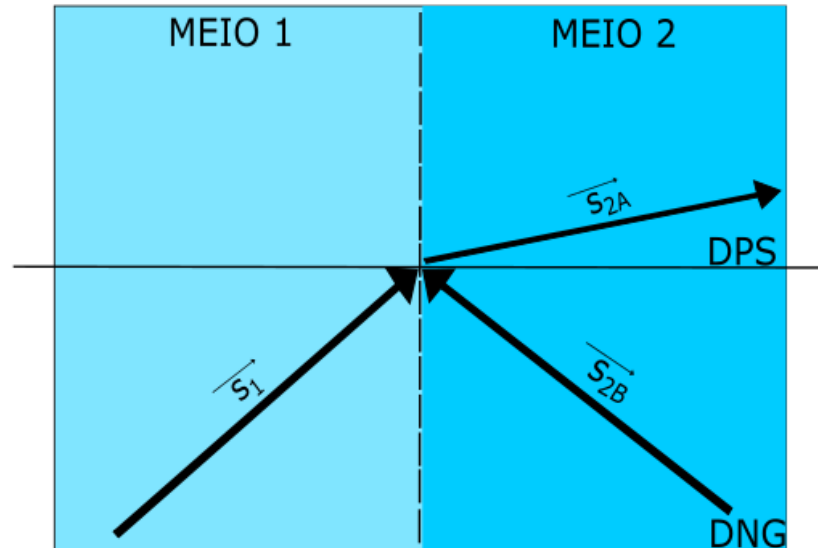
O índice de refração também é negativo nos metamateriais e sua parte real está relacionada à velocidade de propagação da onda no meio. O índice de refração ser negativo é devido à permissividade elétrica e a permeabilidade magnética serem, ambas negativas (MUNIZ,2013). O índice de refração é dado pela seguinte equação.

$$n = \pm\sqrt{\mu\epsilon} \quad (34)$$

A refração é apresentada na Figura 11. Onde há dois meios o meio “A” e o meio “B” para o meio “A” há um dielétrico, ou seja, um material DPS e para o meio “B” há um metamaterial DNG assim se torna visível o efeito do índice de refração negativo, é possível

perceber que no meio “A” tem uma refração em direção continua já no meio “B” a refração é no sentido contrário orientada para a origem.

Figura 11 - Propagação da onda entre meios

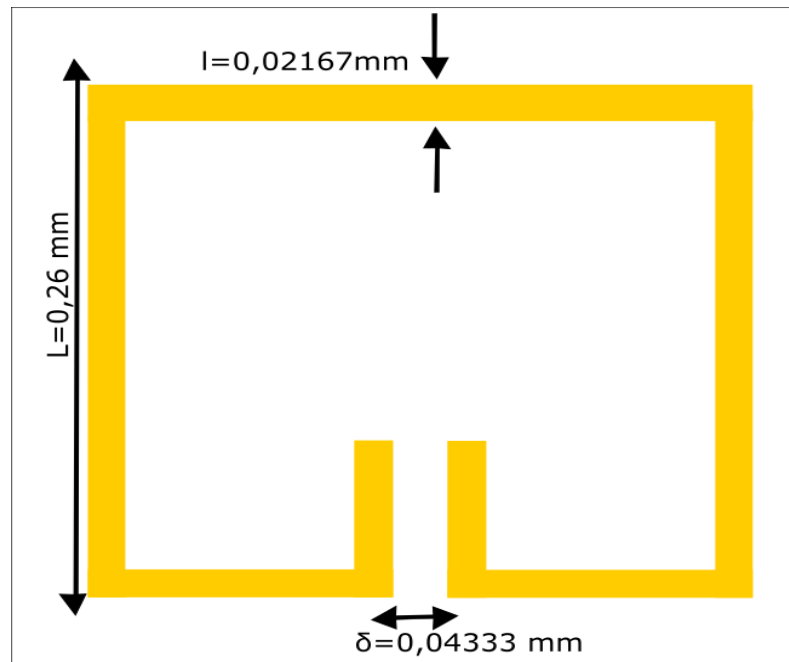


Fonte: Adaptado de (GUELBER,2014)

Duas estruturas metamateriais serão utilizadas e seus resultados serão apresentados. A estrutura CLL (*Capacitively Load Loop*) e a estrutura Fractal. Estas estruturas foram escolhidas devido ao seu desempenho prévio em artigos publicados.

A topologia da estrutura CLL pode apresentar um comportamento de condutor magnético ou condutor elétrico dependendo da direção da onda. Quando a onda plana é polarizada na parte inferior da célula seu comportamento é similar ao de um condutor elétrico, entretanto, a sua performance é análoga a um condutor magnético quando a onda plana é polarizada na parte superior da célula (ARAUJO,2012). A Figura 12 representa essa estrutura.

Figura 12 - Célula Metamaterial CLL



Fonte: Autor, 2021

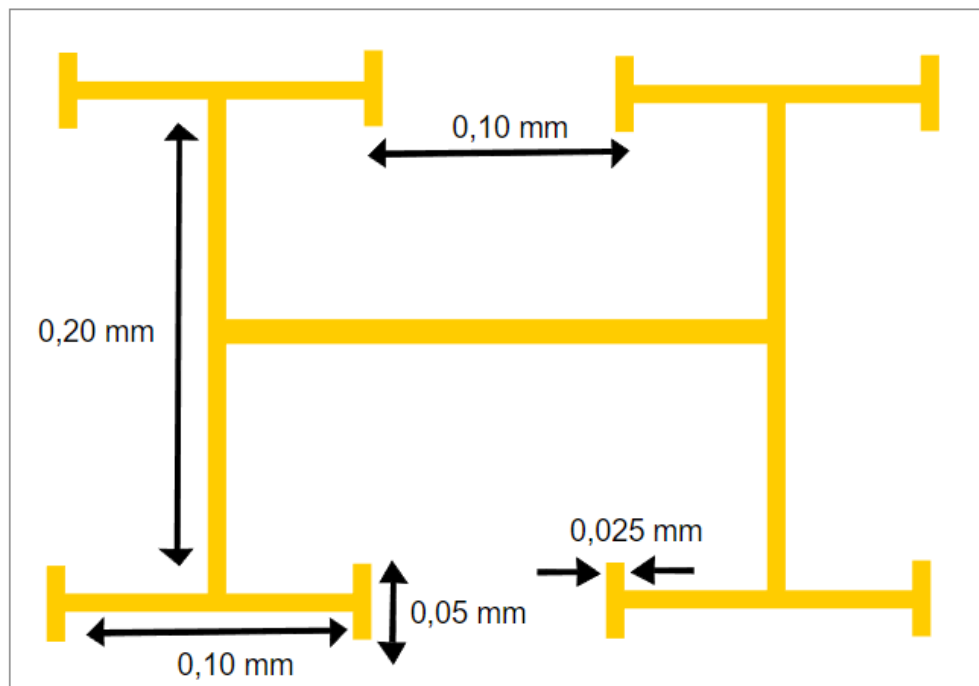
As dimensões da célula CLL que são utilizadas no projeto são calculadas com as seguintes equações:

$$L = \frac{\lambda}{10}, \quad \delta = \frac{L}{6}, \quad l = \frac{1}{2}\delta \quad (35)$$

A principal característica dos padrões fractais são seus ramos, no padrão apresentado na Figura 13 há uma linha principal que é a base da estrutura e quatro ramificações, essa estrutura possui o nível 4, que diz respeito ao número de ramificações que a célula possui, o seu formato é semelhante ao da letra H.

A principal vantagem da estrutura fractal em formato H está na sua versatilidade de aplicação devido as suas características de sub-comprimento de onda, o que fornece um menor tamanho em comparação com o comprimento de onda ao longo das direções de ressonância (ARAÚJO,2012).

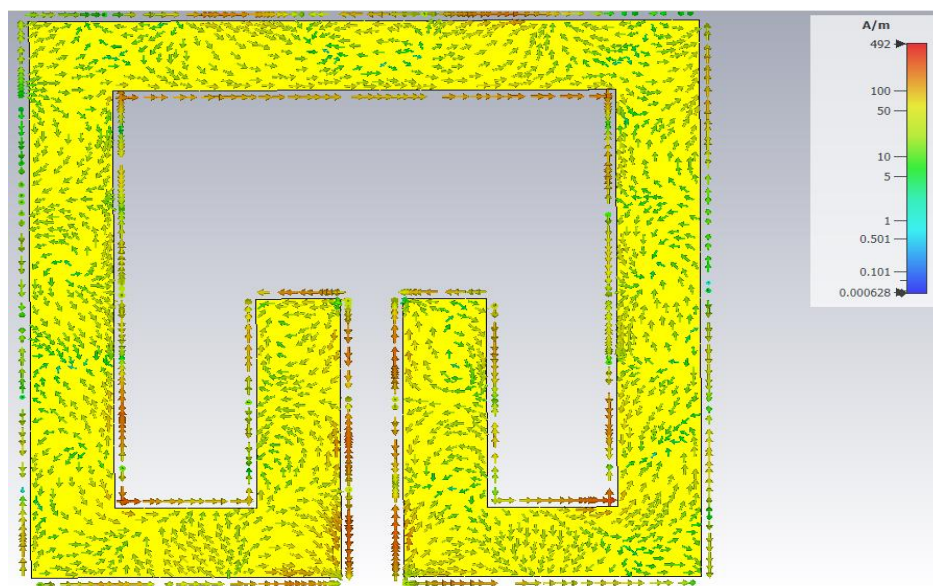
Figura 13 - Célula Metamaterial Fractal



Fonte: Autor, 2021

A figura 14 apresenta a densidade de corrente na superfície da célula metamaterial CLL apresentada anteriormente.

Figura 14 - Densidade de corrente na superfície CLL

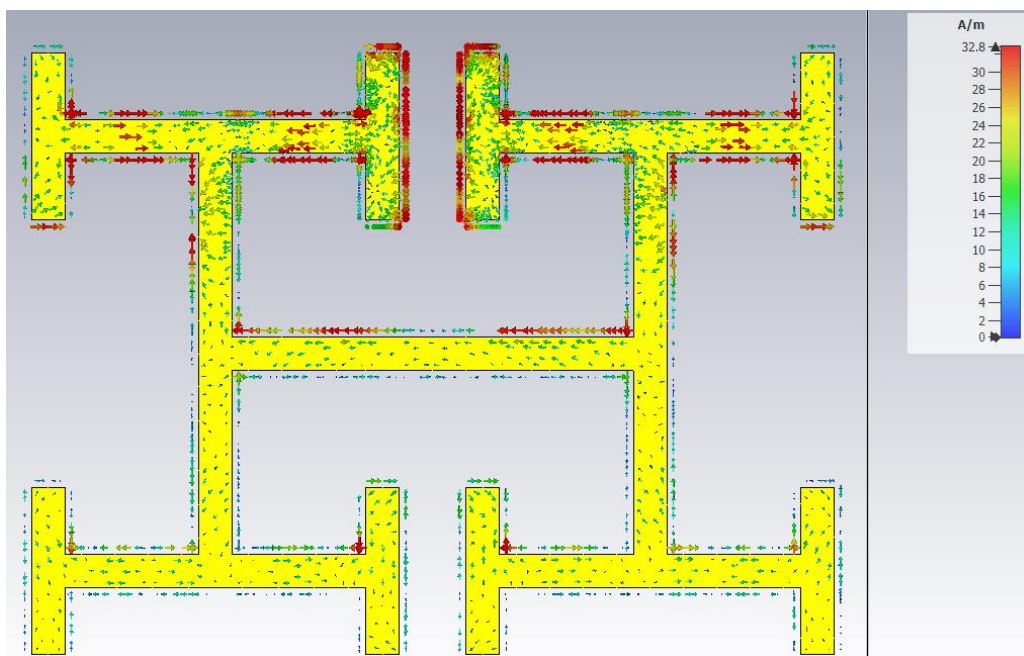


Fonte: Autoria Própria

A partir da frequência proposta no projeto (116,9 GHz) foi montado a densidade de corrente na superfície da célula CLL, onde é possível ver uma maior intensidade de corrente nas extremidades dos metamateriais.

A Figura 15 representa a densidade de corrente na superfície da célula metamaterial fractal apresentada anteriormente.

Figura 15 - Densidade de corrente na superfície Fractal



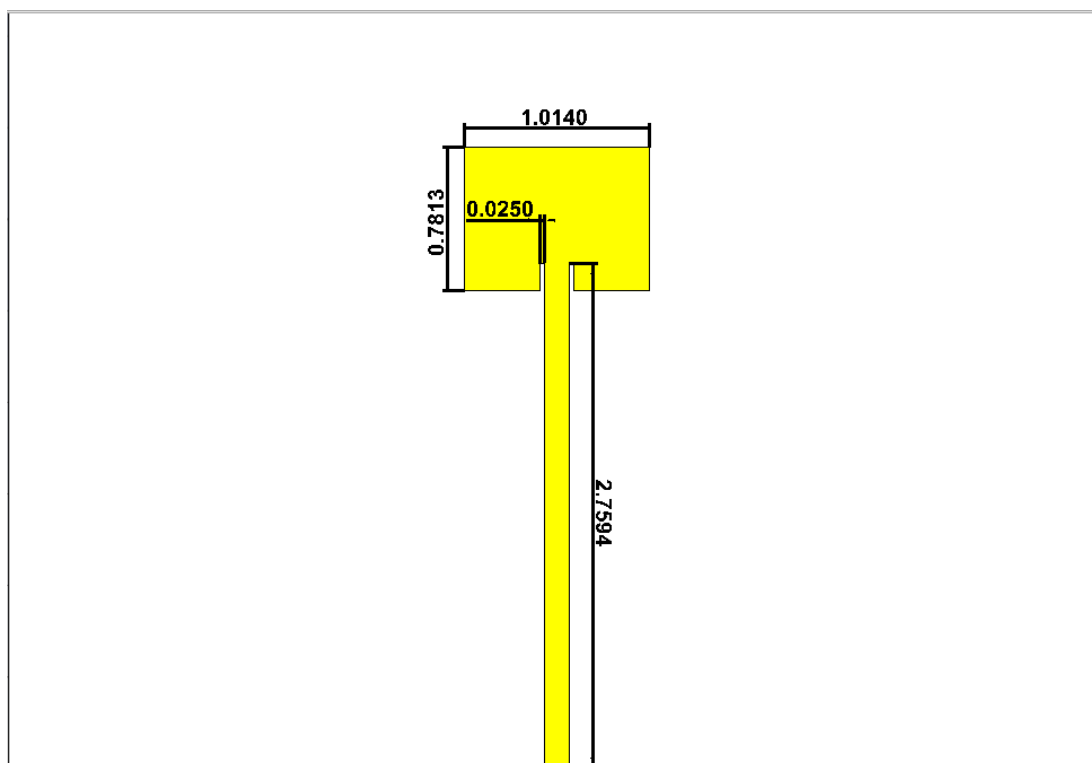
Fonte: Autoria Própria

A densidade de corrente na estrutura Fractal também apresentou uma maior intensidade na linha central e nas extremidades utilizando a frequência de projeto (116,9 GHz), foi apresentado uma maior densidade de corrente na parte superior devido ao posicionamento da fonte de excitação.

As estruturas apresentadas foram dimensionadas a partir de tentativa e erro afim de obter a melhor resposta para o metamaterial, foram feitas assim inúmeras simulações e seus resultados são apresentados na seção a seguir.

3 RESULTADOS

Os resultados apresentados a seguir são resultados preliminares. Primeiramente para a antena projetada foi utilizado o substrato Rogers RT5880, com uma permissividade elétrica de 2,2. O *patch* foi projetado para uma frequência de 116,9 GHz e seus resultados foram analisados, a Figura 15 apresenta o *patch* simulado.

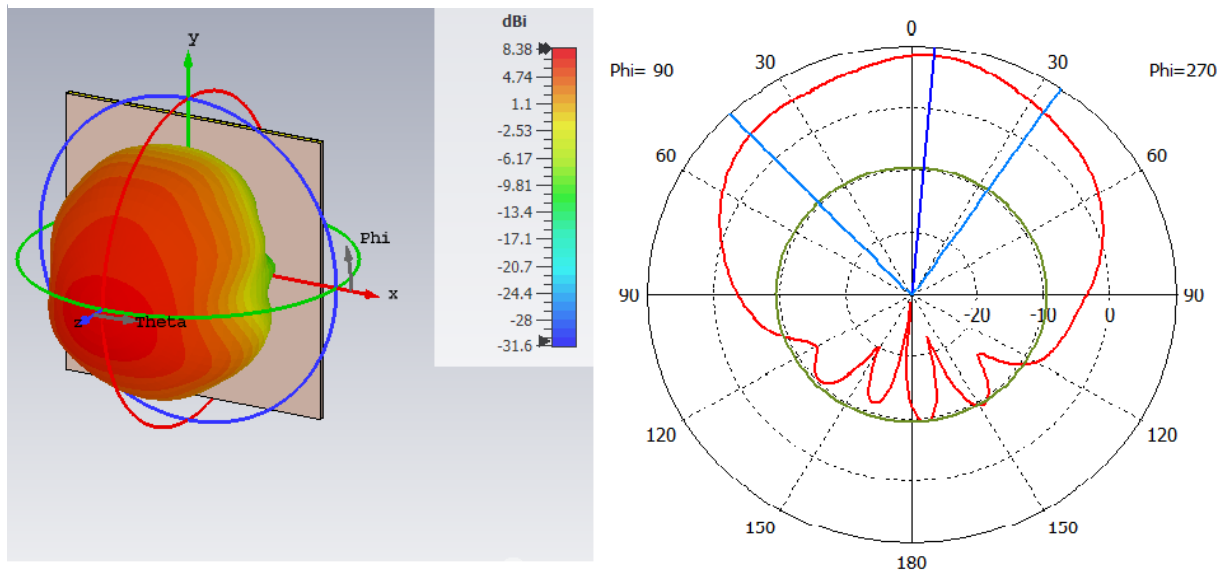
Figura 16 - *Patch* Retangular

Fonte: Autoria Própria

Para análise da simulação foram obtidos os parâmetros S_{11} , *Fairfield* e o diagrama de radiação. Para o diagrama de radiação a antena apresentou uma ressonância alta para a frequência projetada. Na Figura 17 é possível observar os lóbulos do diagrama de radiação da diretividade, a região vermelha apresenta maior intensidade com uma diretividade de 8,38 dBi e a região azul menor intensidade com -31,6 dBi. Na Figura 18 temos o diagrama de radiação de ganho com um ganho máximo de 8,03 dBi e na região de menor intensidade -32 dBi

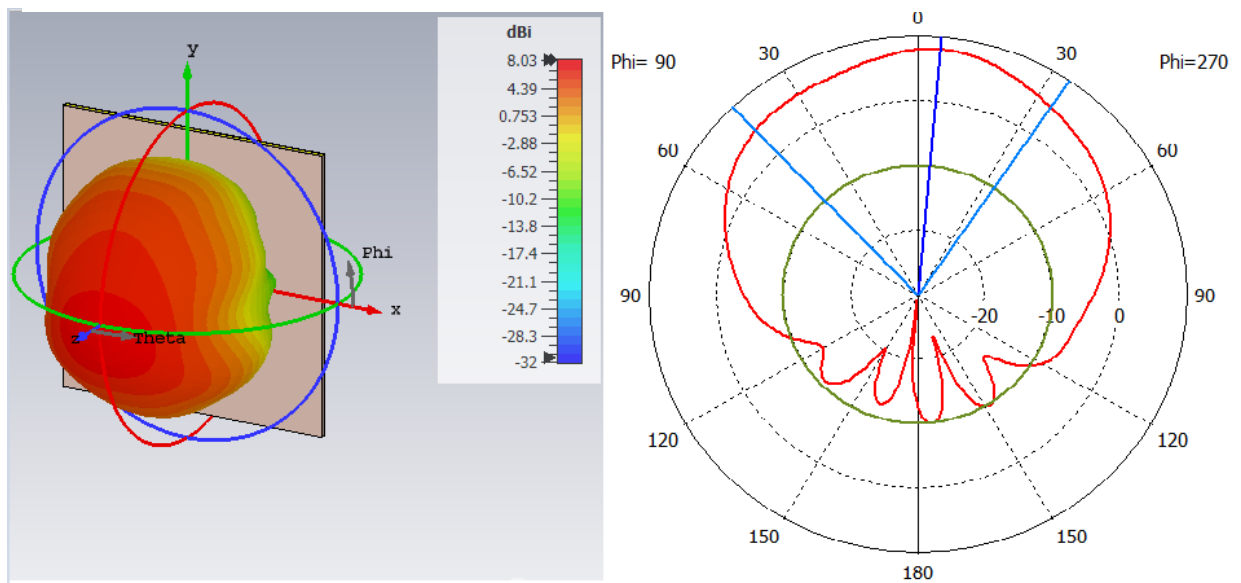
Na Figura 19 temos o gráfico S_{11} que representa a perda por retorno obtida na simulação indicando as regiões em que a perda de retorno torna a antena utilizável, o ideal esperado para as simulações é que as antenas possuam um parâmetro mínimo de -10 dB na frequência projetada, ou seja, 116,9 GHz.

Figura 17 - Diagrama de Radiação da diretividade para o Patch retangular

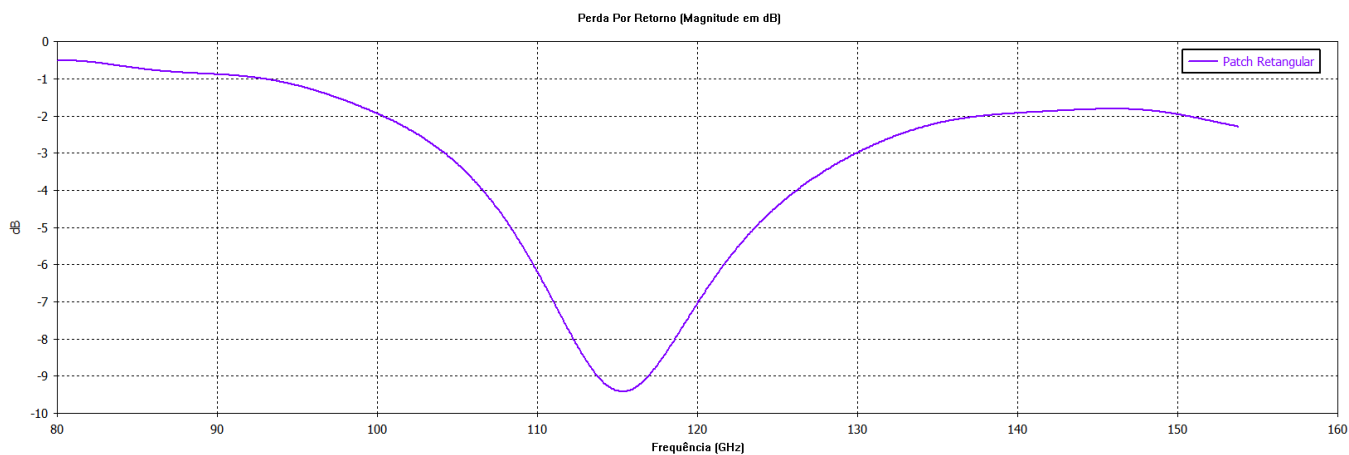


Fonte: Autoria Própria

Figura 18 - Diagrama de radiação do ganho para o Patch retangular



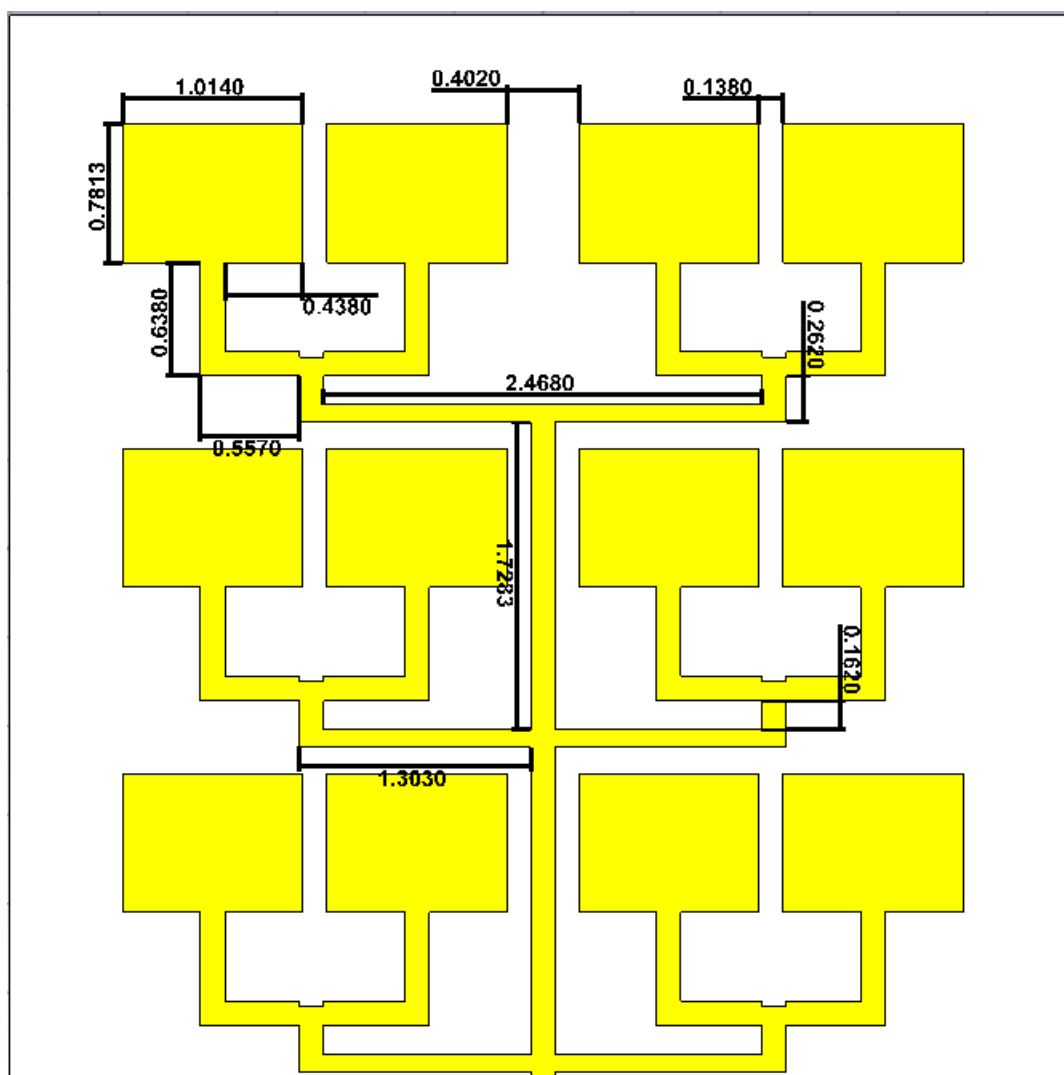
Fonte: Autoria Própria

Figura 19 - Perda por retorno do *Patch* retangular

Fonte: Autoria Própria

Na perda por retorno do *patch* sem modificações temos uma banda de sintonia de 110 GHz à 120 GHz com uma perda por retorno de -6,19 dB e -7,03 dB para a frequência desejada foi obtido uma perda por retorno de -9 dB, não servindo para os fins do projeto pois tem uma perda por retorno maior que -10 dB. Após feito a simulação do *patch* retangular foi feita a simulação utilizando o arranjo retangular apresentado na Figura 6 afim de deslocar a banda de sintonia para a banda desejada e aumentar também o ganho, diminuindo assim a perda por retorno.

Figura 20 - Arranjo 12x1 Patch

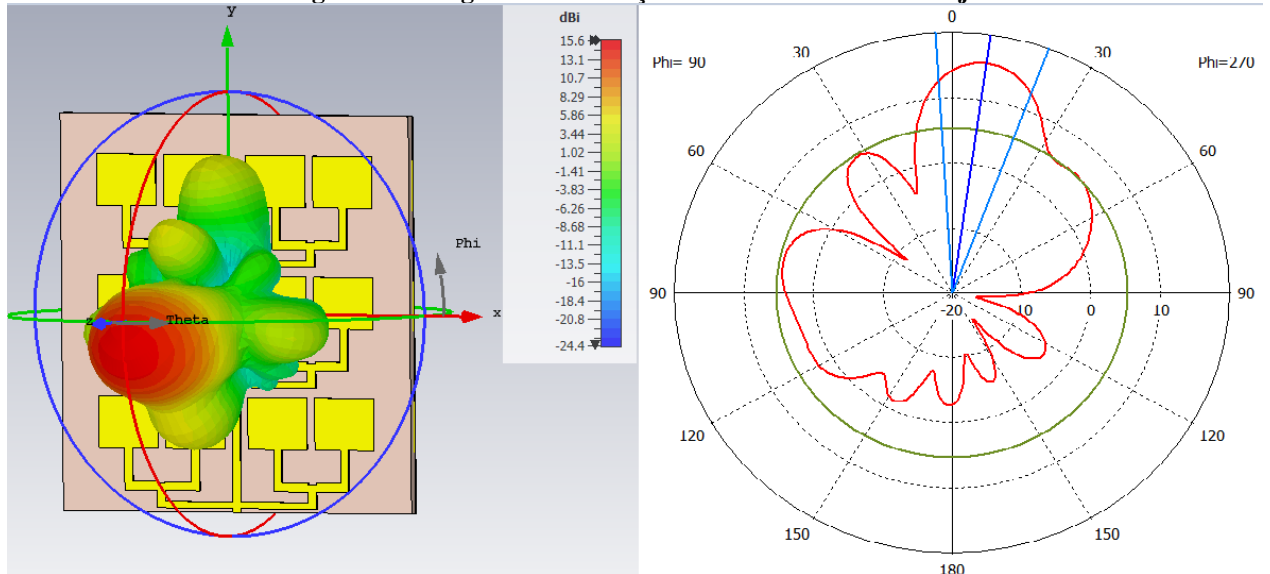


Retangular em 116,9 GHz

Fonte: Autoria Própria

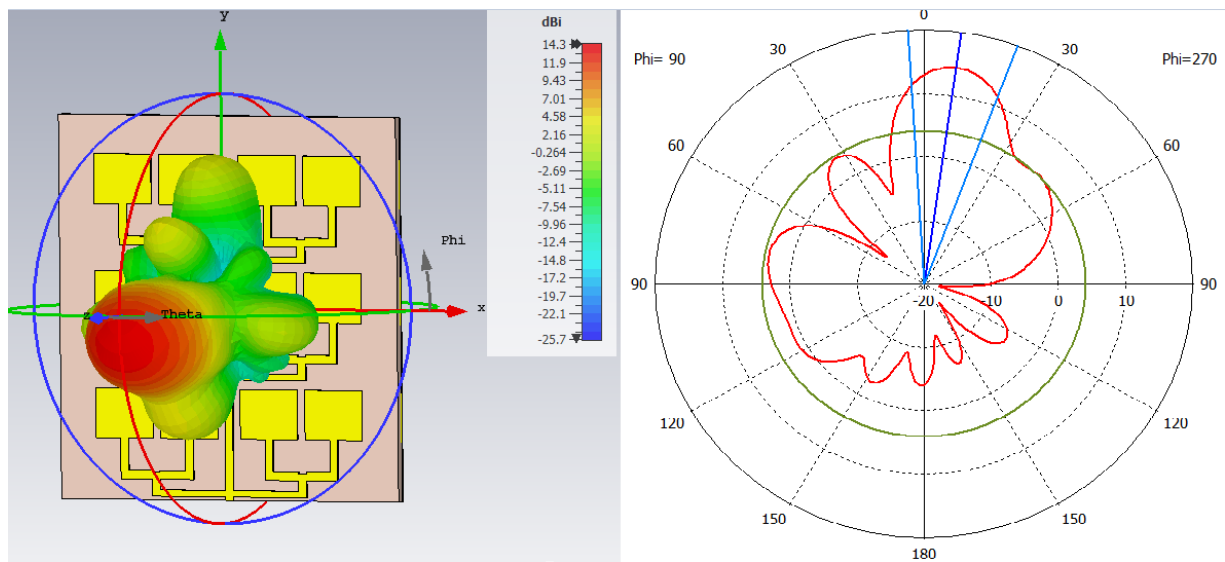
Para o arranjo foi obtido uma alta ressonância para o diagrama de radiação, o diagrama de radiação de diretividade e ganho é apresentado na Figura 21 e 22 respectivamente, temos um aumento de 6,27 dBi no ganho e para o parâmetro S11 apresentado na Figura 23, foi obtido um resultado satisfatório onde há uma perda por retorno de -10 dB em cinco regiões diferentes, a primeira região de 100,97 GHz à 103,62 GHz com uma perda por retorno de -28,33 dB, a segunda região de 118,52 GHz à 121,77 GHz com uma perda por retorno de -26,96 dB, a terceira de 158,49 GHz à 164,66 GHz com uma perda por retorno de -15,645 dB, a quarta de 151,62 GHz à 164,65 GHz com uma perda por retorno de -26,063 dB, a quinta de 199,22 GHz à 208,81 GHz com uma perda por retorno de -20,319 dB, entretanto não houve aplicabilidade para a frequência projetada. É esperado que com a aplicação dos metamateriais e com o arranjo otimizado a possibilidade de obter aplicabilidade da antena para 116,9 GHz.

Figura 21 - Diagrama de radiação da diretividade do arranjo

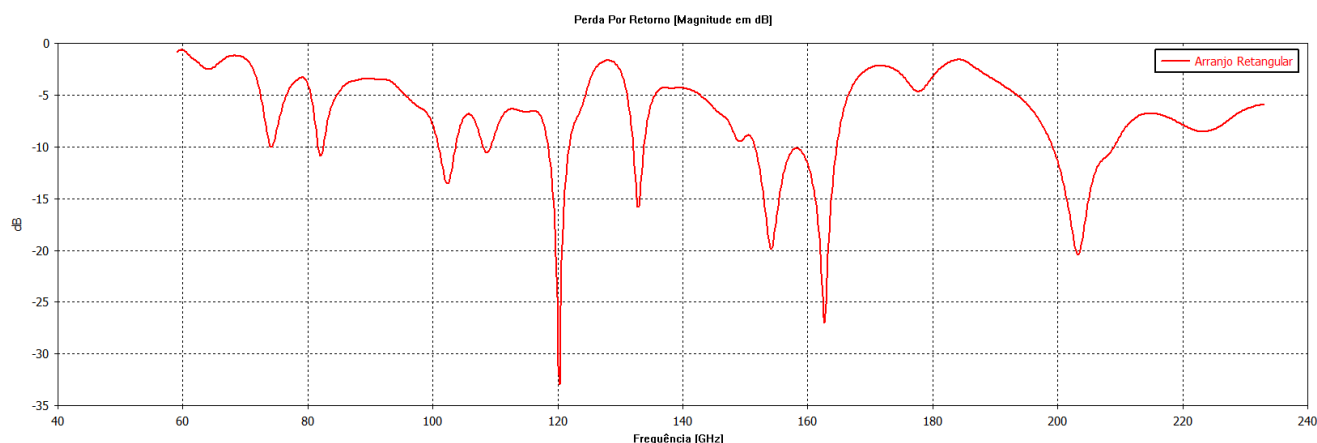


Fonte: Autoria Própria

Figura 22 - Diagrama de radiação do ganho do arranjo



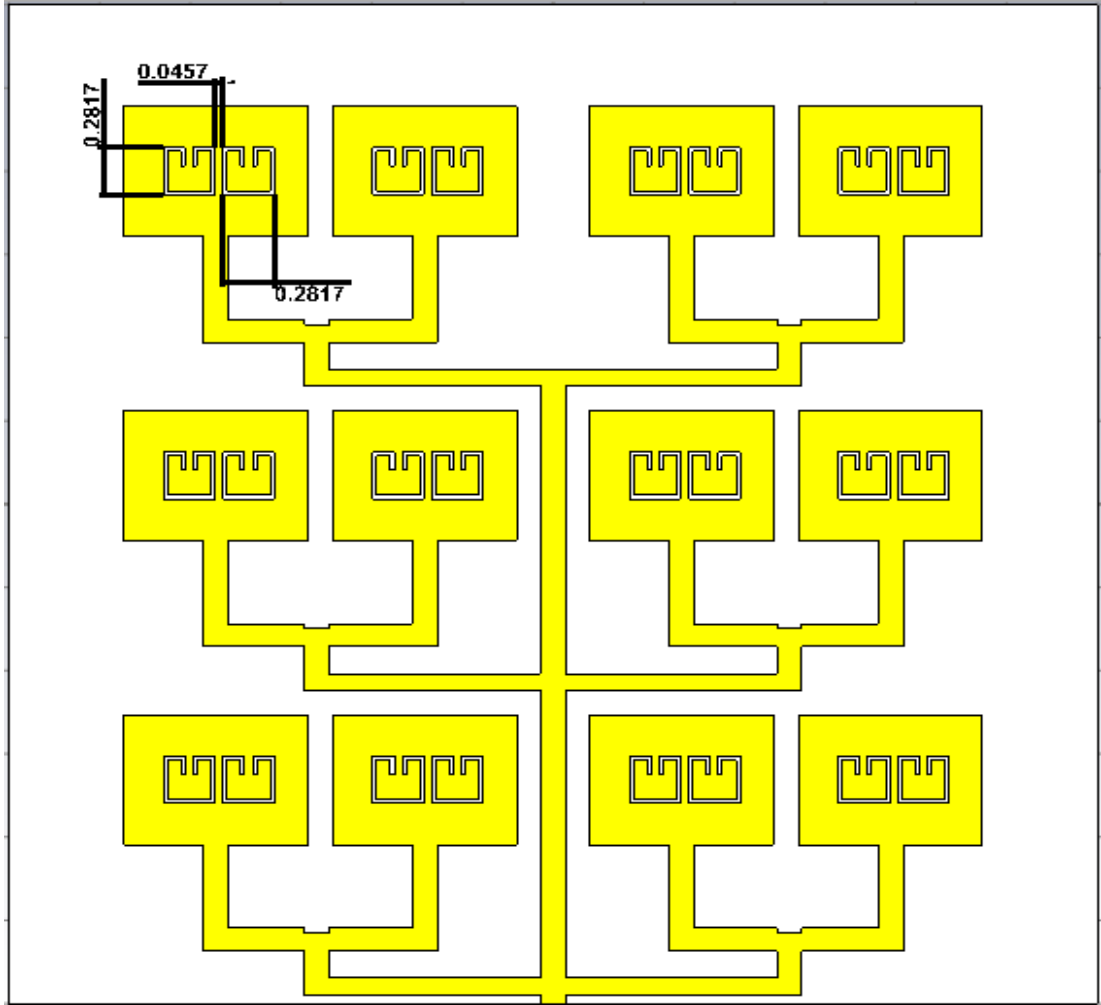
Fonte: Autoria Própria

Figura 23 - Perda por retorno do arranjo

Fonte: Autoria Própria

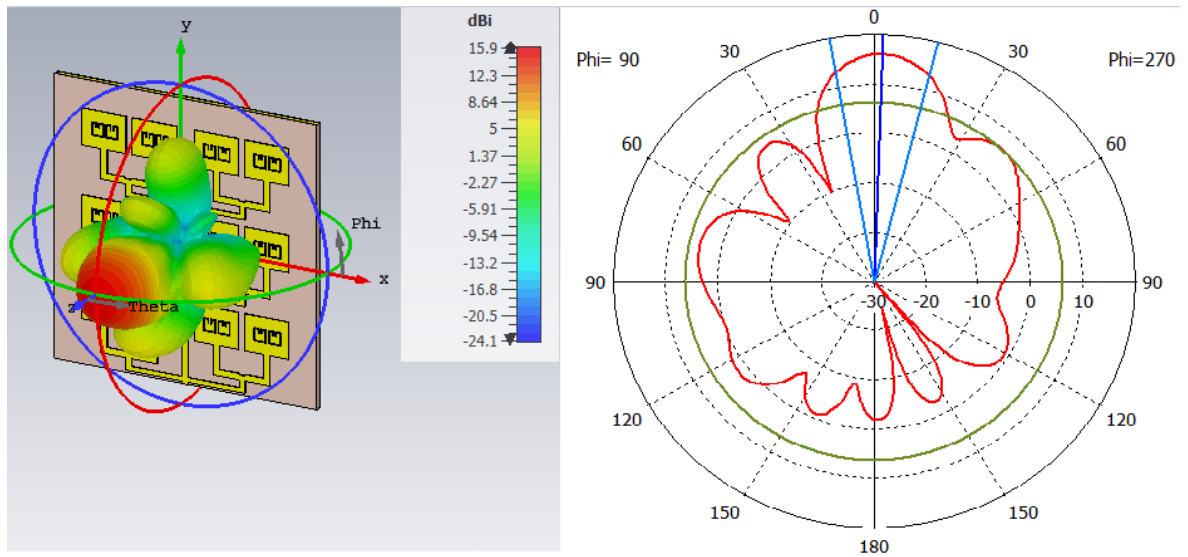
A seguir foi aplicado as células metamateriais CLL como é apresentado na Figura 24. Com a aplicação das células CLL foi possível obter um aumento no ganho de 0,1 dBi comparado ao arranjo sem as células conforme é mostrado a seguir na Figura 26. A Figura 27 mostra a perda por retorno obtida a partir do arranjo com o metamaterial. Com o CLL foi possível obter uma perda por retorno aceitável para a frequência de projeto (116,9 GHz) foram obtidas 7 faixas de banda sendo a primeira de 94,5 GHz à 96,125 GHz com -19,25 dB, a segunda de 108,19 GHz à 110,53 GHz com uma perda por retorno de -21,1 dB, a terceira de 114,6 GHz à 121,7 GHz com uma perda por retorno de -23,46 dB, a quarta de 132,14 GHz à 133,81 GHz com uma perda por retorno de -13,99 dB, a quinta de 151,97 GHz à 157,17 GHz com uma perda por retorno de -18,53 dB, a sexta de 159,62 GHz à 164,46 GHz com uma perda por retorno de -23,84 dB e a sétima de 200 GHz à 209,75 GHz com uma perda por retorno de -23,866 dB. Para a frequência de projeto foi encontrado uma perda por retorno de -20,76 dB.

Figura 24 - Arranjo 12x1 Patch Retangular com células CLL em 116,9 GHz



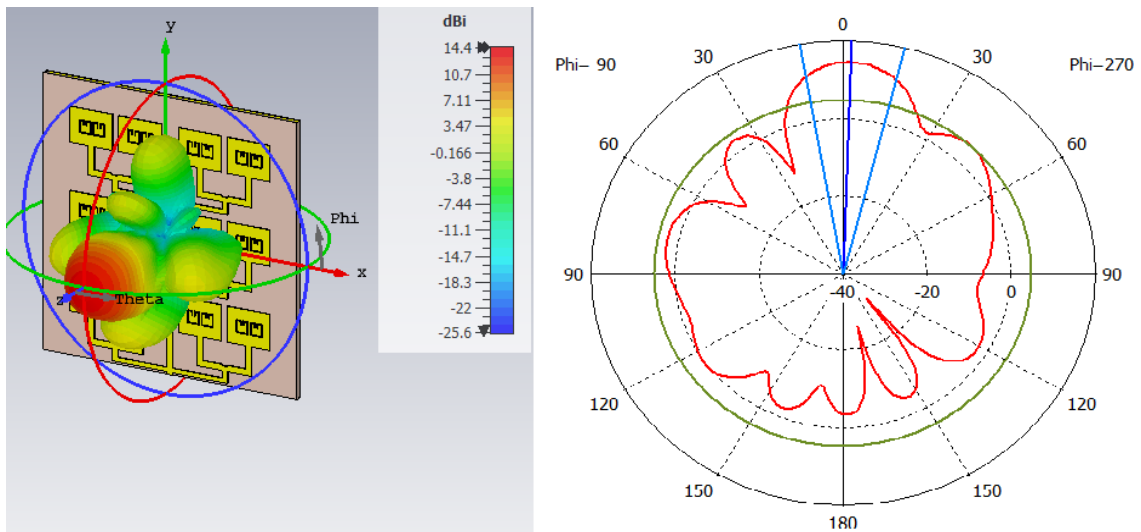
Fonte: Autoria Própria

Figura 25 - Diagrama de Radiação da diretividade do Arranjo com células CLL



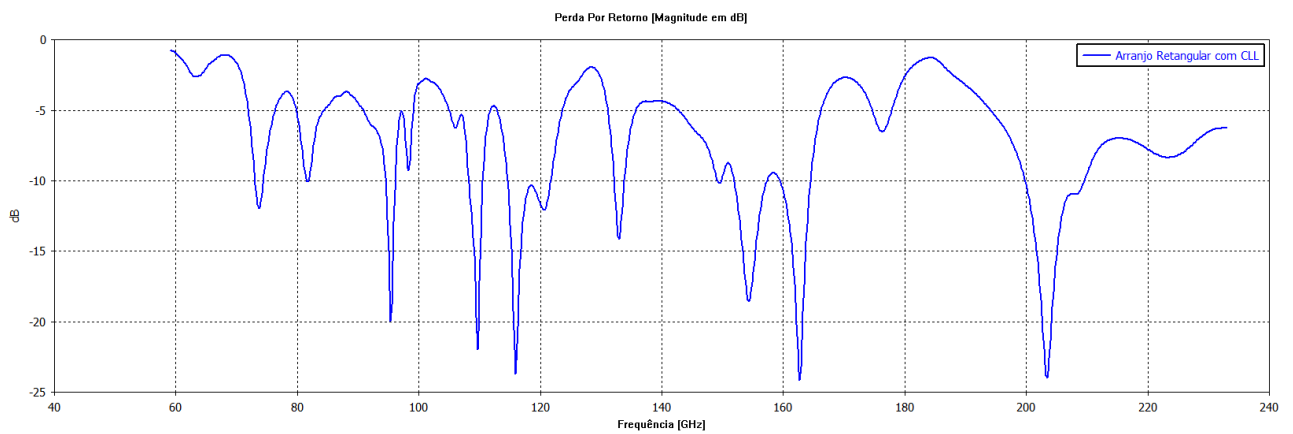
Fonte: Autoria Própria

Figura 26 - Diagrama de radiação do ganho do Arranjo com células CLL



Fonte: Autoria Própria

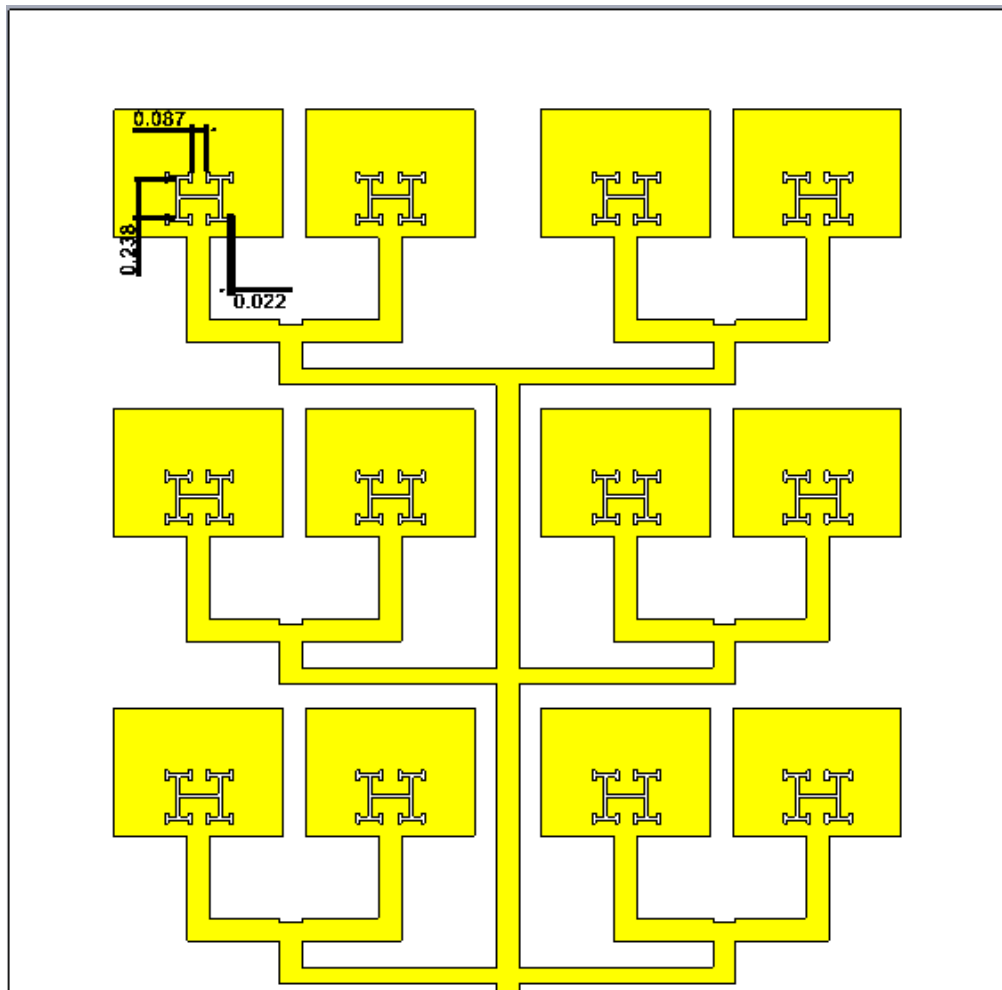
Figura 27- Perda por retorno do Arranjo com células CLL



Fonte: Autoria Própria

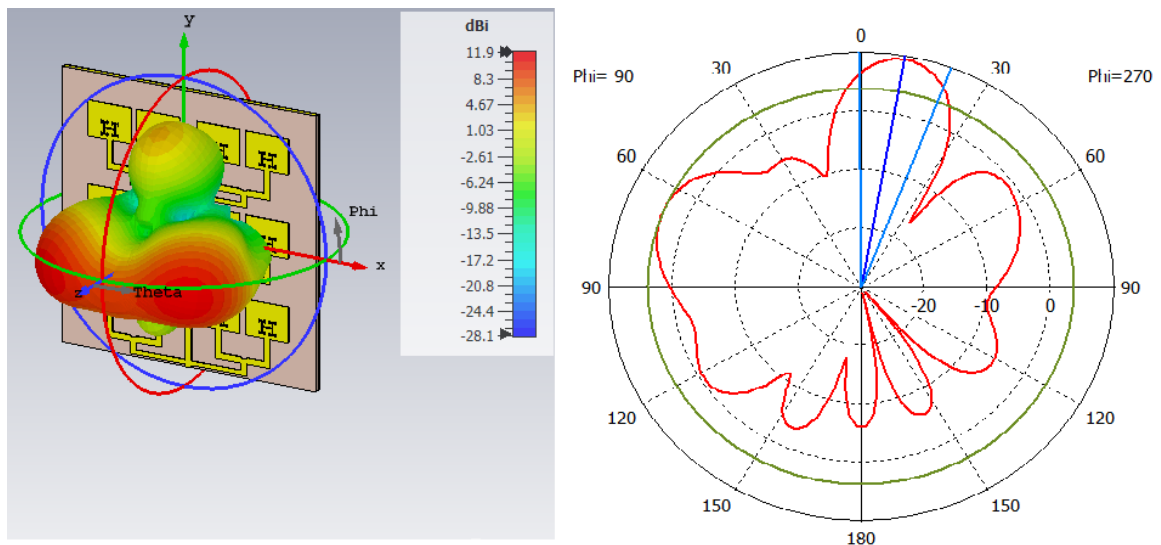
Após realizada a simulação com as células metamateriais CLL, foi aplicado sobre o arranjo células metamateriais do tipo Fractal para análise e comparação dos resultados conforme ilustrado na Figura 28.

Figura 28 - Arranjo 12x1 Patch Retangular com célula Fractal em 116,9 GHz



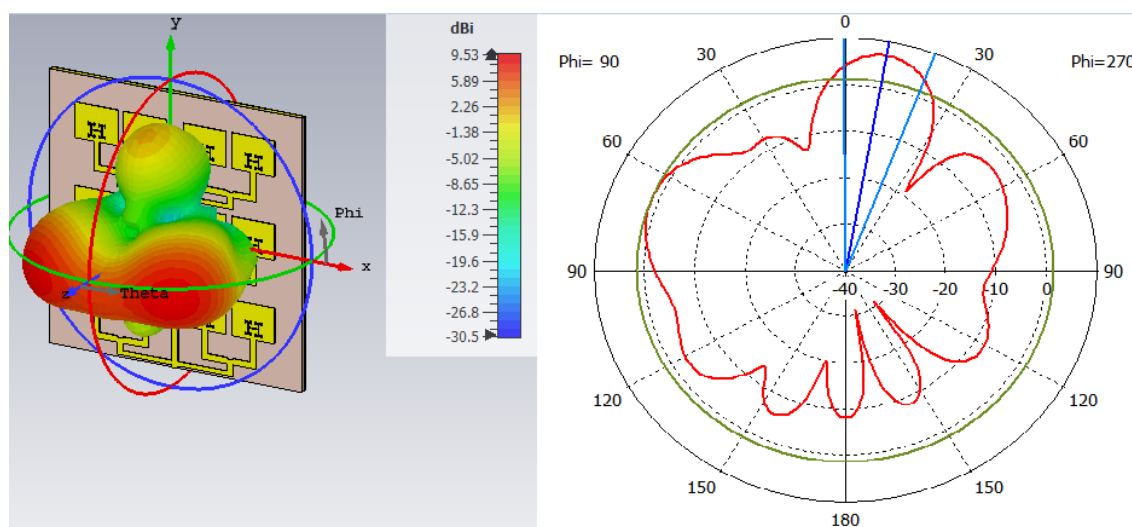
Fonte: Autoria Própria

Figura 29 - Diagrama de radiação da diretividade do Arranjo com célula Fractal



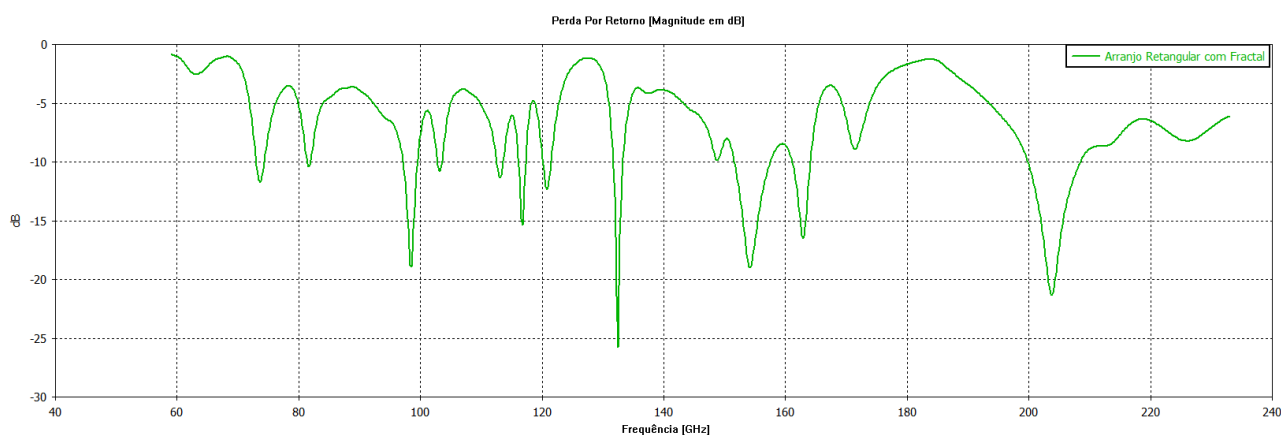
Fonte: Autoria Própria

Figura 30 - Diagrama de radiação do ganho do Arranjo com célula Fractal



Fonte: Autoria Própria

Figura 31 - Perda por retorno do Arranjo com célula Fractal



Fonte: Autoria Própria

A Figura mostra o diagrama de radiação do ganho, em relação ao arranjo sem metamaterial houve uma redução de 4,77 dBi. A perda por retorno na frequência de projeto foi menor que a encontrada com as células CLL, -14,41 dB, para o arranjo com fractal foram encontradas 6 Bandas, sendo a primeira de 73 GHz à 74,305 GHz com -11,63 dB, a segunda de 97,137 GHz à 99,5 GHz com uma perda por retorno de -18,84 dB, a terceira de 116,11 GHz à 117,32 GHz com uma perda por retorno de -15,36 dB, a quarta de 131,68 GHz à 133,28 GHz com uma perda por retorno de -22,77 dB, a quinta de 151,62 GHz à 157,38 GHz com uma perda por retorno de -18,87 dB, a sexta de 161,15 GHz à 164,07 GHz com uma perda por retorno de -16,41 dB e a sétima de 200 GHz à 208,31 GHz com uma perda por retorno de -20,82 dB.

3.1 Comparação dos Resultados

Este capítulo se resume a comparação dos resultados obtidos afim de analisar qual a melhor antena para a aplicação da tecnologia móvel 6G. A tabela 1 apresenta a perda por retorno obtida na frequência de projeto dos arranjos

Tabela 1 - Comparação da perda por retorno e largura de banda das estruturas

Arranjo	Início da Banda(GHz)	Fim da banda (GHz)	Largura da Banda (GHz)	Perda Por Retorno em 116.9 GHz
Arranjo Retangular	100,97	103,62	2,65	-
	118,52	121,77	3,25	-
	132,05	133,8	1,75	-
	151,62	164,65	13,03	-
	199,22	208,81	9,59	-
Arranjo Retangular com CLL	94,5	96,125	1,625	-
	108,19	110,53	2,34	-
	114,6	121,7	7,1	-20,76 dB
	132,14	133,81	1,67	-
	151,97	157,17	5,2	-
	159,62	164,46	4,84	-
	200	209,75	9,75	-
Arranjo Retangular com Fractal	73	74,305	1,305	-
	97,137	99,5	2,363	-
	116,11	117,32	1,21	-14,41 dB
	131,68	133,28	1,6	-
	151,62	157,38	5,76	-
	161,15	164,07	2,92	-

Fonte: Autoria Própria

De acordo com a tabela temos que a estrutura que apresentou a menor perda por retorno na frequência de projeto foi o arranjo retangular com as células CLL, tornando-a assim a melhor para aplicação da tecnologia móvel 6G dentre as estruturas comparadas.

A tabela 2 apresenta o ganho e a diretividade máxima de cada antena e sua eficiência.

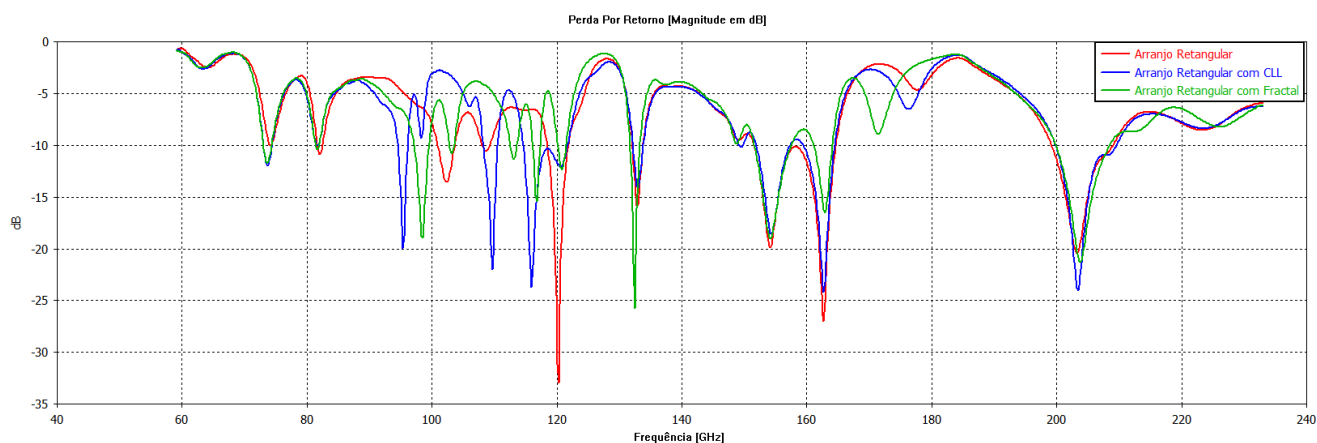
Tabela 2 - Eficiência das estruturas

Antena	Ganho	Diretividade	Eficiência
<i>Patch</i> Retangular	8,03	8,38	95,82%
Arranjo Retangular	14,3	15,6	91,67%
Arranjo Retangular com CLL	14,4	15,9	90,57%
Arranjo Retangular com Fractal	9,53	11,9	80,08%

Fonte: Autoria Própria

A antena que apresentou a maior eficiência foi a de *patch* retangular, entretanto não é aplicável para a faixa de frequência proposta, a antena CLL que se mostrou a com menor perda por retorno apresentou uma eficiência de 90,57%.

Figura 32 - Comparação da perda por retorno dos arranjos



Fonte: Autoria Própria

A Figura 31 apresenta a comparação da perda por retorno do arranjo retangular, arranjo retangular com CLL e arranjo retangular com Fractal. Apresentando as larguras de banda e perda por retorno em cada ponto como descrito na tabela 1.

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado uma introdução dos conceitos de antenas e telefonia móvel que serviram de base para a obtenção dos resultados do projeto de uma antena para tecnologia móvel 6G utilizando o software *CST Studio*, um sistema de projeto e análise 3D de antenas, que fornece todos os parâmetros necessários para análise de uma antena.

Como mostrado no capítulo 2 (Fundamentação Teórica), por se tratar de um projeto de antena do tipo microfita espera-se ótimos resultados, entretanto, com a frequência aplicada no projeto é necessário de mecanismos para otimizar o ganho da antena e diminuir sua perda por retorno na frequência desejada. Este capítulo apresenta também algumas otimizações que foram utilizadas para melhorar os resultados da antena como: casamento de impedância, aplicação do metamateriais e arranjos.

No capítulo 3 (Resultados) é apresentado as simulações e comparação de resultados para a observação da melhoria do sinal da antena, primeiramente foi projetado uma antena com *patch* retangular e não foi obtido a perda por retorno mínima esperada para aplicação, após a simulação foi repetida com o arranjo e as estruturas metamateriais foi possível deslocar a banda da antena para a faixa desejada, e também com a aplicação dessas estruturas a antena passou a ter multibandas.

A estrutura que apresentou a menor perda por retorno para a frequência desejada foi a estrutura com células CLL, que apresentou -20,76 dB de perda por retorno na faixa aplicável a sua eficiência foi de 90,57% e sua largura de banda de 7,1 GHz. A estrutura que apresentou a maior eficiência e a maior largura de banda foi o *patch* retangular, entretanto não é aplicável para a frequência do projeto.

Conclui-se que este trabalho teve seu objetivo geral e específicos cumpridos, apresentando um estudo sobre a tecnologia móvel 6G, a partir do estudo feito é possível a fabricação do protótipo da antena. Durante o trabalho desenvolvido o tempo foi um limitante, fica como sugestão para trabalhos futuros o projeto utilizando outras estruturas metamateriais existentes afins de comparação para obtenção do melhor resultado possível.

REFERÊNCIAS

- ARAUJO, H. X. D. **Projeto e Implementação de Câmara GTEM – Giga Hertz Transverse Electromagnetic Para Testes de Compatibilidade Eletromagnética de Circuitos e Sistemas Eletrônicos**, UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, KRETLY.L.C, Campinas, 31 Janeiro 2012.
- BALANIS, C. *Antenna Theory: Analysis and Design*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2016.
- CISCO. **Visual Networking Index**, nov.2018. Disponível: <<http://www.Cisco.com>>. Acesso em: 04 de outubro de 2021.
- MACEDO. C. **Observando objetos ocultos através de imagens em terahertz**. Disponível: <http://www.saense.com.br/2016/06/observando-objetos-ocultos-atraves-de-imagens-em-terahertz/>. Acesso em 02 de novembro de 2021.
- GUANGYI LIU, **Requirements and Network Architecture of 6G Mobile Network beyond 2030**, **China Mobile Research Institute**, Beijing China:,p. 2020.
- GUELBER, E. F. **Aplicações Da Tecnologia Metamaterial Em Dispositivos**, Ouro Branco, Julho, 2014. Trabalho de Conclusão de Curso.
- Internet das coisas**, agosto.2021. Disponível: <<https://encontreumnerd.com.br/blog/o-que-e-internet-das-coisas>>. Acesso em: 01 de novembro de 2021.
- K. L. M. LATVA-AHO, “**6g research visions 1 - key drivers and research challenges for 6g ubiquitous wireless intelligence**, ” **IEE**, p. 1–33, setembro. 2019.
- KOEN W.A. DONGEN. V, PETER M. BERG V. D., NICOLAESCO. I, “**Subsurface imaging using measured near-field antenna footprints**”, **Near Surface Geophysics**, Fevereiro 2004, Vol. 2, n.1, p. 31-37.
- LIMBERGER, P. **Projeto De Antenas Multibandas Modificadas Com Metamateriais Para A Futura Quinta Geração De Telefonia Móvel**, Palmas, 2017.

L.V. MUNIZ. **Projet, Fabricação e caracterização Experimental de Metamateriais Quirais para Biossensoriamento na faixa de Micro-ondas**, São Paulo, 2013. 134.

M. A., UUSITALO *et al.*, "**6G Vision, Value, Use Cases and Technologies From European 6G Flagship Project Hexa-X**," *IEEE Access*, vol. 9, 2021.

N. H. MAHMOOD, H. ALVES, O. A. LÓPEZ, M. SHEHAB, D. P. M. OSORIO AND M. LATVA-AHO, "**Six Key Features of Machine Type Communication in 6G**," 2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT), 2020.

O. BREINBJERG, **Metamaterial Antennas – The most successful Technology? 9th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics**, Oxford UK:,p. 37-39 2015.

P. C. BAUER, R. Q. MARTINS, E. V. V. CAMBERO, C. E. CAPOVILLA, H. X. ARAUJO, "**A modified metamaterial antenna for the new wireless communications network**," 2016 IEEE International Symposium on Consumer Electronics (ISCE), 2016.

POZAR, D. **Microwave Engineering**. 4^a. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012.

Rogers Corporation. (Novembro de 2021). Disponível: <<https://www.rogerscorp.com/>>

SAMSUNG. **The Next Hyper-Connected Experience for All**, julho.2020. Disponível: <news.samsung.com/global/samsungs-6g-white-paper-lays-out-the-companys-vision-for-the-next-generation-of-communications-technology>. Acesso em: 04 de outubro de 2021.

Y. HE, Y. CHEN, L. ZHANG, S. WONG AND Z. N. CHEN, "**An overview of terahertz antennas**," in *China Communications*, vol. 17, no. 7, pp. 124-165, Julho 2020

ZHAO YAJUN, YU GUANGHUI, XU HANQING. **6G mobile communication network: vision, challenges and key technologies**. *Science in China: Information Science*, 2019.

Z. ZHANG, Y. XIAO, Z. MA, M. XIAO, Z. DING, X. LEI, G. K. KARAGIANNIDIS, P. Fan, "**6g wireless networks: Vision, requirements, architecture, and key Technologies**," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 14, no. 3, p. 28–41, Setembro. 2019.

ZHANG.L, LIANG.Y.C, NIYATO.D, **“6g Visions: Mobile Ultra Broadband, Super Internet of Things, and Artificial Inteligence,” IEEE Vehicular Technology Magazine,** Agosto. 2019.