



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS
BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

JEYQUISSON THAUAN DA FONSECA LIMA

**ANÁLISE DE RESSOADORES EM DIFERENTES REGIÕES DE UMA ANTENA DE
MICROFITA PARA FREQUÊNCIA 5G**

PAU DOS FERROS – RN

2022

JEYQUISSON THAUAN DA FONSECA LIMA

**ANÁLISE DE RESSOADORES EM DIFERENTES REGIÕES DE UMA ANTENA DE
MICROFITA PARA FREQUÊNCIA 5G**

Monografia apresentada à Banca Examinadora do Curso Ciência e Tecnologia, da Universidade Federal Rural do Semiárido em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Dr. Antonio Diego Silva Farias (UFERSA – Centro Multidisciplinar de Pau dos Ferros)

PAU DOS FERROS – RN

2022

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

L732a Lima, Jeyquisson Thauan.
ANÁLISE DE RESSOADORES EM DIFERENTES REGIÕES DE
UMA ANTENA DE MICROFITA PARA FREQUÊNCIA 5G /
Jeyquisson Thauan Lima. - 2022.
39 f. : il.

Orientador: Antonio Diego Silva Farias.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2022.

1. Antena. 2. Patch. 3. substrato. 4.
ressoadores. 5. Diagrama de radiação. I. Silva
Farias, Antonio Diego, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Pau dos Ferros
Bibliotecária: Erlanda Maria Lopes da Silva
CRB: 1115

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS

**ANÁLISE DE RESSOADORES EM DIFERENTES REGIÕES DE UMA
ANTENA DE MICROFITAS PARA FREQUÊNCIA 5G**

JEYQUISSON THAUANH DA FONSECA LIMA

Monografia apresentada à Banca Examinadora do Curso Ciência e Tecnologia, da Universidade Federal Rural do Semiárido em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

APROVADO EM:

BANCA EXAMINADORA:

Dr. Antonio Diego Silva Farias

Dr. Otávio Paulino Lavor

Dr. Josenildo Ferreira Galdino

PAU DOS FERROS – RN

2022

DEDICATÓRIA

A Deus, e a todos que me tem como
alguém importante em sua vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a cada conjunto de átomos e poeira cósmica que vagou pelo espaço e contribuiu para a formação da vida como a conhecemos, e é claro, ao grande idealizador – Deus – desta complexa engrenagem que é o nosso universo, cujo tentamos observar, entender e descobrir a cada dia, grato a cada bater de asas de borboletas que nos trouxeram até aqui. Agradeço a cada ser vivo com o qual compartilhei tempo, conversas e memórias, pois cada uma deles me fez ser o que sou hoje e chegar até aqui. Em especial agradeço a todos as pessoas que considero minha família, que se provaram pessoas de valor e patronos de felicidade e momentos bons na minha ínfima existência até este ponto, a minha mãe, que sempre sonhou com este momento, e muito me toca saber que de alguma forma pude realizar algum de seus sonhos. Agradeço, e muito, ao meu primeiro orientar Otávio, com quem pude compartilhar experiências, conversas e histórias ao longo deste processo, e também a Diego, que surgiu na parte final do projeto. A todas as pessoas que me consideram algo de bom em suas vidas e me tem como alguém importante, saibam que a recíproca pode ser verdadeira, agradeço realmente a todos, que possamos prosperar juntos ao longo de nossas jornadas neste vasto universo, e possamos contribuir para o bem maior, e a cima de tudo, sermos felizes o máximo que conseguirmos.

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo analisar e idealizar antenas de microfita que funcionem na faixa de frequência do 5G no Brasil, tanto antenas com formato retangular convencional quanto antenas com ressoadores em seus elementos radiadores (*patch*). Iniciando com uma breve introdução histórica sobre antenas e indicando a importância destas para o mundo globalizado atual, que necessita cada vez mais de tecnologias sem fio para as mais diversas áreas do cotidiano. O dimensionamento das antenas foi feito através do método da linha de transmissão, e as simulações computacionais foram feitas através do *software* HFSS, utilizado para projetos eletromagnéticos em 3D, com substrato composto pela fibra de vidro (FR4). Todos os diagramas e parâmetros como perda de retorno, ganho e diagramas de radiação são apresentados no trabalho, dando uma visão geral e detalhada do projeto para as mais variadas geometrias adotadas para as simulações.

Palavras-chave: Antena, *Patch*, substrato, ressoadores, , diagrama de radiação.

ABSTRACT

The present work aims to analyze and idealize microstrip antennas that work in the 5G frequency band in Brazil, both conventional rectangular antennas and antennas with substrates in their radiating elements (patch). Starting with a brief historical introduction about antennas and indicating their importance to the current globalized world, which increasingly needs wireless technologies for the most diverse areas of daily life. The sizing of the antennas was done through the transmission line method, and the computer simulations were done through the HFSS software, used for electromagnetic projects in 3D, with a substrate composed of fiberglass (FR4). All diagrams and parameters such as return loss, gain and radiation diagrams are presented in the work, giving an overview and detailed design for the most varied geometries adopted for the simulations.

Keywords: Microstrip antennas, Patch, substrate, resonators, return loss, radiation diagram

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação de uma antena de microfita	13
Figura 2 - Patch de uma antena de microfita	15
Figura 3 - Componentes de uma antena de microfita	17
Figura 4 - Representação de latência.....	19
Figura 5 - Representação de patch com gap.....	21
Figura 6 - Antena com ressoador retangular	24
Figura 7 - Medidas do ressoador na posição 1	24
Figura 8 - Ressoador na posição 2	25
Figura 9 - Ressoador na posição 3	26
Figura 10 - Ressoador na posição 4	26
FIGURA 11 - Ressoador na posição 5	27
Figura 12 - Interface do programa HFSS e modelo de antena padrão	28
Figura 13 - Diagrama de radiação 2D para a antena padrão	28
Figura 14 - Diagrama de radiação 3D para a antena padrão	29
Figura 15 - Diagrama de radiação 2D para o ressoador na posição 1	29
Figura 16 - Diagrama de radiação 3D para o ressoador na posição 1.....	29
Figura 17 - Diagrama de radiação 2D para o ressoador na posição 2.....	30
Figura 18 - Diagrama de radiação 3D para o ressoador na posição 2.....	30
Figura 19 - Diagrama de radiação 2D para o ressoador na posição 3.....	31
Figura 20 - Diagrama de radiação 3D para o ressoador na posição 3.....	31
Figura 21 - Diagrama de radiação 2D para o ressoador na posição 4.....	31
Figura 22 - Diagrama de radiação 3D para o ressoador na posição 4.....	32
Figura 23 - Diagrama de radiação 2D para ressoador na posição 5.....	32
Figura 24 - Diagrama de radiação 3D para o ressoador na posição 5.....	32
Figura 25 – Gráfico da perda de retorno da antena padrão	34
Figura 26 – Gráfico da perda de retorno com ressoador na posição 1.....	32
Figura 27 – Gráfico da perda de retorno com ressoador na posição 2	35
Figura 28 – Gráfico da perda de retorno com ressoador na posição 3.....	35

Figura 29 – Gráfico da perda de retorno com ressoador na posição 4.....	35
Figura 30 – Gráfico da perda de retorno com ressoador na posição 5	36
Figura 31 – Gráfico da perda de retorno com ressoador na posição 5	36

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Termos e significados.....	21
Quadro 2 - Dimensões do patch da antena padrão.....	23
Quadro 3 - Dimensões posição 1	25
Quadro 4 - Ressonador na posição 2	25
Quadro 5 - Ressonador na posição 3.....	26
Quadro 6 - Ressonador na posição 4.....	26
Quadro 7 - Ressonador na posição 5.....	27
Quadro 8 - Ganho (dB) das antenas	31

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	ANTENAS DE MICROFITA	15
2.1	Partes físicas da antena	17
2.2	Componentes da antena	17
2.3	Parâmetros da antena	18
2.4	Tecnologia 5G.....	19
3	DIMENSÕES E PROJETOS DAS ANTENAS.....	20
3.1	Método da linha de transmissão	21
3.2	Modelos e alterações	24
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
6	REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

É notória a evolução da sociedade com respeito aos meios de comunicação ou transmissão de informações ao longo do tempo. A célebre carta de Pero Vaz de caminha é tida até hoje como a primeira comunicação (postal) em território brasileiro, e ela dista, historicamente, de 357 anos da inauguração do primeiro telégrafo no Brasil.

Já no dia 07/09/1922 foi registrada a primeira transmissão radiofônica (utilizando antenas para transmissão e recepção) do país, justo na comemoração do centenário da independência, e o intervalo de tempo entre esta e o penúltimo exemplo citado foi de 65 anos. Torna-se muito visível como a comunicação vem evoluindo de diversas formas em intervalos de tempo cada vez mais curtos, e é necessário que entendamos o papel das antenas nesta história.

Existem vários tipos diferentes de antenas, com outros vários tipos de aplicações distintas, o foco deste trabalho será voltado exclusivamente para antenas de microfita. Apresentando algumas de suas aplicações:

Antenas Patch Microfita (MPA) são largamente utilizadas em sistemas de comunicação sem fio e rádio. Dentre suas principais vantagens, podem-se citar sua pequena dimensão, fácil fabricação, baixo peso e baixo custo. Entretanto, apresentam duas desvantagens que limitam seu uso, a pequena largura de banda e ganho (POZAR, 2011; BALANIS, 2016 Apud CANAVEZ, MARCELO et al, 2019)

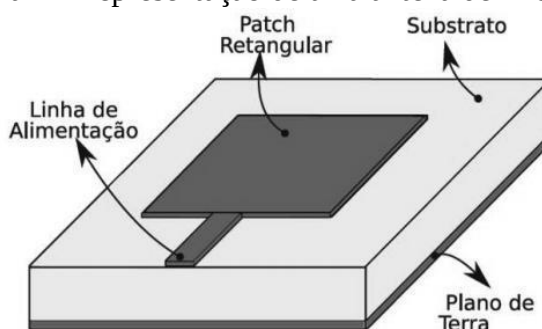
O uso de redes sem fio sempre foi muito requisitado nas últimas décadas, no entanto, com o advento da pandemia do novo coronavírus, o uso destas foi ainda mais acentuado em praticamente todas as áreas possíveis. O número de serviços de *streamings* de alta relevância (como a *Netflix*), por exemplo, mais do que duplicou, com o grande investimento das empresas no ramo de entretenimento durante a pandemia. Já no serviço de vendas online, estimasse que o segmento de *E-commerce* subiu em torno de 75% em meio à pandemia, de acordo com (VILELA, 2021).

Com posse destas estatísticas, podemos estimar o comportamento futuro da sociedade no que se diz respeito à conectividade sem fio, se mostrando cada vez mais promissor e essencial na vida cotidiana de qualquer ser humano, o que possibilita ainda mais

investimentos e avanços científicos nesta área, como por exemplo, o surgimento da rede 5G que será implementada nos celulares, sucessor do 4G.

A frequência utilizada para os celulares no 5G, e neste trabalho, para a antena de microfita, será de acordo com (LOOS, 2019) 3.5 Ghz, que é justamente a frequência intermediária entre o 3G e o 4G na maioria dos roteadores padrão. A estrutura característica de uma antena de microfita de *patch* retangular é apresentada na figura 1, onde podemos observar cada uma de suas partes operantes.

Figura 1 - Representação de uma antena de microfita



Fonte: Oliveira (2016)

Esse tipo de antena tem como algumas de suas aplicações [...] em sistemas de comunicações móveis, radares, satélites e outras aplicações (BALANIS, 2012), e é amplamente explorada por ser uma antena plana, ou seja, que é instalada paralelamente à superfície, daí entende-se seu uso em redes de comunicação móveis, já que as percas e interferências na aerodinâmica são baixas para este tipo de antena, possibilitando assim, que sejam a opção mais utilizada em sistemas que presem pela locomoção e alta aerodinâmica, o que seria impossível utilizando antenas convencionais.

Entretanto as vantagens deste tipo de antena não se resumem apenas a sua estrutura aerodinâmica, também existem o baixo custo de produção e o fato de serem compatíveis com circuitos integrados, por exemplo. Por outro lado, as desvantagens destas antenas, são, de acordo com (LAVOR, 2015) apresentarem desvantagens como banda de frequências pequena, por operarem num espaço restrito de frequências, perda de retorno baixa em determinados casos, além disso, as complexas estruturas de alimentação podem gerar radiação indesejável.

Com base nestas características das antenas, podemos entender o porquê das alterações em seu aspecto físico, como alterações no plano de terra com a inserção de fractais, ou mesmo no *patch* da antena adicionando substratos e variando suas posições ao longo do elemento radiador, que será o caso deste trabalho. Ambas as mudanças tem por objetivo uma

melhora na eficiência da antena e entender melhor como cada parâmetro se altera de acordo com as mudanças físicas feitas em seu corpo.

As principais variações feitas nas antenas neste trabalho serão a inserção de ressoadores que são segundo (LAVOR, 2015) constituídos por anéis concêntricos, que são gravados no *patch* da antena, tem por finalidade fazer com que a antena opere em mais de uma faixa de frequência. Tais elementos serão inseridos em diferentes regiões do elemento radiador, utilizando o *software* HFSS para cada simulação, entenderemos como cada parâmetro da antena responderá para as distintas posições dos ressoadores no elemento radiador, bem como serão calculadas as dimensões da antena através de métodos numéricos.

Após a apresentação deste tipo de antena neste capítulo, prosseguiremos aprofundando as explicações sobre as antenas de microfita e quais parâmetros queremos calcular para obter uma análise completa de sua eficiência. A seguir, no capítulo 3, serão apresentados os métodos utilizados para o cálculo das dimensões das antenas, bem como as modificações que serão feitas em sua estrutura, por fim, os resultados serão apresentados no capítulo 4, após as simulações feitas pelo software utilizado para o projeto das antenas, e depois no capítulo 5 as considerações finais sobre as simulações.

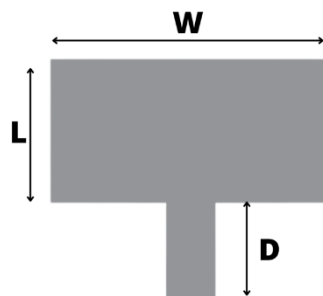
2 ANTENAS DE MICROFITA

Segundo (SANCHES, 2007, p. 23 apud LASKA, MARCO) as antenas são elementos de extrema importância para o correto dimensionamento de uma rede sem fio, e seu objetivo é focalizar ou direcionar a energia transmitida, pois elas não amplificam o sinal. Para a evolução e consolidação da tecnologia de comunicação e transmissão de informações sem fio, foi essencial a utilização de antenas. De acordo com o *Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE)* a antena é tida como sendo uma parte de um sistema de comunicação, onde é capaz de emitir e receber ondas eletromagnéticas.

As antenas de microfita são tidas como antenas impressas, que são antenas de dimensões cada vez menores. De acordo com Gonçalves (2012), a miniaturização de antenas é um reflexo da procura contínua por parte dos fabricantes de equipamentos eletrônicos e de telecomunicações, onde se procura um equipamento cada vez mais compacto e que retorne no mínimo o mesmo resultado do equipamento maior que fora substituído.

Por se tratar de uma antena com geometria plana - Como representado na Figura 2 -, é ideal para sistemas de comunicação móveis, tanto em superfícies curvas ou planas, se aproveitando das características físicas deste tipo de antena de transmissão.

Figura 2 - Patch de uma antena de microfita



Fonte: O autor

Através desta figura, podemos observar a parte superior do elemento radiador de dimensões quaisquer L , W e D , que representam respectivamente o comprimento do *patch*, largura do *patch* e o comprimento da linha de alimentação. Para o cálculo destas partes, será

utilizado o método da linha de transmissão, que permite que sejam calculadas as dimensões da antena para que possa funcionar na frequência desejada, método este que será abordado mais adiante neste trabalho. As equações deste método são definidas de acordo com (SANTOS, 2016) e (BALANIS, 2005), como:

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

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\left(1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-1/2} + 0.041 \left(1 - \frac{w}{h} \right) \right], \frac{w}{h} \geq 1 \quad (2)$$

$$F_r = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3)$$

$$W = \frac{c}{2Fr} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (4)$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{\text{eff}} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{eff}} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (5)$$

$$D = \frac{c}{4f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (6)$$

$$L = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_r}} + 2\Delta L \quad (7)$$

Os demais termos são classificados no Quadro 1. Existem mais algumas partes físicas da antena a serem exploradas, como, seu plano de terra, linha alimentação e os demais quesitos que serão estudados neste trabalho, com a intenção de entender ainda melhor sobre este tipo particular de antena.

Para que seja uma antena que trabalhe em conformidade com o que se pede nesta época, será uma antena que atuará na frequência 5G, mais especificamente na frequência de 3.5 GHz, permitindo assim, que este estudo se aproxime da tecnologia mais atual de transmissão e recepção de dados sem fio.

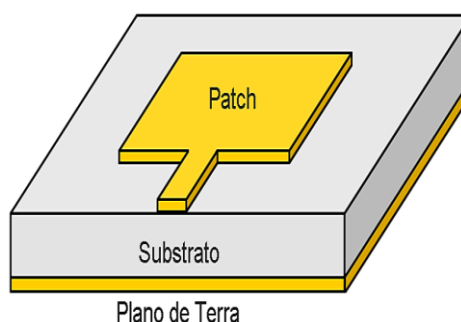
2.1 Partes físicas da antena

Conhecendo a configuração padrão de um *patch* retangular de uma antena de microfita, podemos agora, conhecer um pouco de suas outras partes, como: Plano de terra, substrato dielétrico, linha de alimentação, e também o que se pretende estudar a partir delas, e quais são os parâmetros que se observa em uma antena de microfita.

2.2 Componentes da antena

A Figura 3 mostra os componentes de uma antena de microfita padrão, aquela em que ainda não foram realizadas modificações em sua estrutura.

Figura 3 - Componentes de uma antena de microfita



Fonte: <https://allelectronicsgr.com.br/antenas-de-microfita/>

Com base na Figura 3, podemos entender como é a formação de uma antena de microfita convencional de *patch* retangular, que é basicamente composta por um substrato dielétrico, e um plano de terra, além do elemento radiador. De acordo com Weingaertner (2021) algumas das vantagens deste tipo de antena são: baixo peso, pequeno volume e baixo custo. De posse desta informação, devemos utilizar os elementos que compõem as antenas da melhor forma possível, e tentar selecionar os melhores materiais para sua construção.

O material do *patch* geralmente é composto de ouro ou cobre já que são elementos de uma boa condutividade elétrica. Neste projeto, será utilizado um *patch* feito de cobre. Já para o material dielétrico (ou substrato) com base em Weingaertner (2021) tem-se que quanto

menor for a tangente de perdas do material, melhor este material será, o material dielétrico escolhido para este projeto foi o FR-4, que é a fibra de vidro e resina epóxi. Enquanto o plano terra, é um material condutor, onde mais uma vez será utilizado um componente de cobre.

Após conhecer e entender sobre as partes físicas de uma antena, deve se seguir com a alimentação desta. São várias as técnicas de alimentação existentes para este tipo de antena. De acordo com (FREITAS apud SANTOS, 2016) algumas destas formas seriam a alimentação por linha de microfita, por cabo coaxial, por guia de onda coplanar, entre outros. Será adotado para o presente trabalho o método de alimentação da linha de transmissão.

2.3 Parâmetros da antena

Para que possamos analisar realmente uma antena de microfita, devemos levar em consideração três parâmetros que são fundamentais para isto: diagrama de radiação, perda de retorno e largura de banda.

De acordo com (FREITAS apud POZAR, 2011) a perda de retorno é gerada devido às reflexões que ocorrem na fronteira da linha de transmissão, pelo fato de que quando uma onda incide na antena, parte dela acaba sendo refletida para o meio exterior, sendo assim, a mesma região contém as duas ondas (onda incidente e refletida), ocorrendo uma superposição destas ondas, originando ondas estacionárias. É natural em trabalhos com antenas impressas que a perda de retorno seja dada por:

$$\text{Perda de retorno (RL)} = -20 \log \Gamma \quad (8)$$

Onde Γ é chamado de coeficiente de reflexão, que por sua vez, é dado pela equação 9.

$$\Gamma = \frac{Z_a - 50}{Z_a + 50} \quad (9)$$

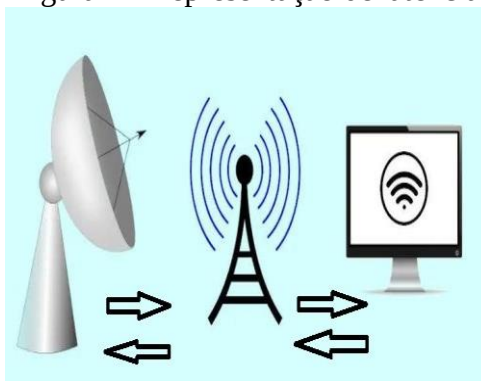
A incógnita Z_a representa a impedância de entrada da placa ressoadora, Neste trabalho, o valor de perda de retorno aceitável serão aqueles menores ou iguais a -10dB.

A largura de banda é o intervalo de frequências que fica entre valores a direita e a esquerda de uma frequência central em que a perda de retorno assume valores aceitáveis (BALANIS apud FREITAS, 2005). Por fim, o diagrama de radiação é definido entre os campos elétrico $\vec{E}$ e magnético $\vec{H}$, desta forma, ele é definido onde estes dois campos possuem maior radiação.

2.4 Tecnologia 5G

O 5G é tido atualmente não só como o sucessor do 3G e do 4G, mas sim como um grande passo para a tecnologia em geral. O 5G é potencialmente a futura plataforma universal de acesso móvel a uma conexão de banda larga (MUNDO, 2019). Aliado a essa nova tecnologia vem não só uma conexão móvel mais rápida, mas também uma latência muito mais baixa.

Figura 4 - Representação de latência



Fonte: <https://wi2be.com.br/blog/internet-via-radio-e-o-envio-do-sinal-por-antenas/>

Dessa forma, com uma latência mais baixa, quando executamos um comando, esse comando é enviado pela rede e volta até nós num tempo bem mais baixo, com antenas bem dimensionadas otimizando esse processo. Sendo assim, é nítido que chamadas e *streamings* serão cada vez mais explorados com base nessa estimativa de latência menor.

3 DIMENSÕES E PROJETOS DAS ANTENAS

Após o entendimento das partes que constituem uma antena de microfita e alguns dos parâmetros que se deseja calcular a partir delas, podemos agora começar o processo de construção. Tendo em vista que a antena funcionará na frequência 5G, devemos encontrar as medidas necessárias para que esta condição seja aceita e viável, com base nos métodos de análise que sejam escolhidos.

Existem diversos métodos para se calcular as dimensões de uma antena e assim fazer com que trabalhe na frequência desejada, e estes variam de acordo com a geometria do *patch*. De acordo com (BALANIS, 2005) os métodos mais comumente utilizados são o método da cavidade para antenas com elemento radiador circular e o método da linha de transmissão, que é utilizado para antenas com geometria retangular.

Sendo assim, o método que será utilizado para o cálculo das dimensões desta antena será o método da linha de transmissão, que é o ideal para antenas com um *patch* do tipo retangular. Como cita (MORAIS, 2011), o método da linha de transmissão é um método aproximado:

Os métodos aproximados são menos precisos em relação aos métodos de onda completa, fundamentam-se na distribuição de corrente magnética equivalente ao redor da borda do campo. Eles apresentam algumas simplificações no que diz respeito ao mecanismo de radiação da antena, sendo precisos até determinada faixa de frequência.

Uma das principais causas desse método ser adotado é pelo fato de que ele é simplista e apresenta uma boa compreensão física (MORAIS, 2011). Tal método é citado por (BALANIS, 2005) como sendo uma modelagem por seções LT, essa modelação ocorre no *patch* e na linha de transmissão.

3.1 Método da linha de transmissão

Esse método de cálculo das dimensões de uma antena consiste em algumas equações, que como era de se esperar, entregam as medidas corretas para o elemento radiador da antena para que ela trabalhe na frequência que se deseja, como demonstra a figura 2.

Em um primeiro momento, essas são as dimensões necessárias para a antena, que são calculadas pelo método da linha de transmissão para seu *patch*, onde o cálculo destas dimensões, segundo (BALANIS, 2005) e (SANTOS, 2016) são as equações de 1 a 7 expostas neste trabalho, que tem seus termos representados de acordo com o quadro 1:

Quadro 1 - Termos e significados

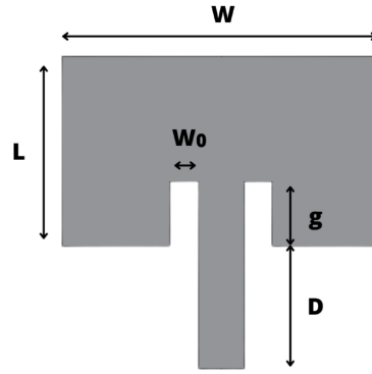
Termo	Significado
$\mathcal{E}_r$	Permissividade elétrica relativa do substrato
$\mathcal{E}_{eff}$	Permissividade elétrica efetiva do substrato
h	Espessura do substrato
W	Largura do <i>patch</i>
L	Comprimento do <i>patch</i>
D	Comprimento da linha de alimentação
Fr	Frequência de ressonância
f	Frequência de operação
c	Velocidade da luz

Fonte: O autor

Após os primeiros termos serem encontrados, devemos nos preocupar com o casamento de impedância, da linha e da antena. De acordo com (JUNIOR, 2021) é necessário para o casamento de impedância entre o *patch* e a linha de transmissão uma reentrância (*Gap*), para que a reflexão seja minimizada, sendo assim, ambos os elementos passarão a ter o mesmo valor, e deixarão de ter valores distintos.

Com a inserção do *gap*, o elemento radiador passará a ter um formato diferente do apresentado na figura 2 e passará a ter um formato descrito como o da figura 5. Através da imagem podemos ver que duas novas dimensões (g , w_0) surgiram, fazendo assim com que novos cálculos de dimensões sejam necessários, especificamente para o cálculo das de g e w_0 .

Figura 5 - Representação de patch com gap



Fonte: O autor

No entanto, as equações apresentadas até agora não são úteis para calcular as novas dimensões que surgiram no *patch*, para isto, seguiremos (LAVOR, 2015 apud ITOH; MENZEL) e Balanis (2005), que nos fornecerão respectivamente as dimensões w_0 e g . Para o cálculo de w_0 utilizaremos a equação 10.

$$w_0 = c \cdot \frac{4.65 \times 10^{-2}}{Fr \sqrt{2} \epsilon_{eff}} \quad (10)$$

Já para o cálculo da dimensão g , serão necessários alguns cálculos mais complexos e extensos, utilizando Balanis (2005) que nos diz que para o cálculo da dimensão, devemos primeiro determinar as condutâncias que serão chamadas de G_1 e G_2 e dadas pelas equações 11 e 12:

$$G_1 = \frac{I_1}{120 \pi^2} \quad (11)$$

$$G_2 = \frac{I_1}{120 \pi^2} \int_0^\pi \left[\frac{\text{sen}\left(\frac{k_0 w \cos\theta}{2}\right)}{\cos\theta} \right]^2 J_0(L k_0 \text{sen}\theta) \text{sen}^3 \theta d\theta \quad (12)$$

Para encontrarmos o I_1 na equação 12, utilizamos a equação 13

$$I_1 = \int_0^\pi \left[\frac{\text{sen}\left(\frac{k_0 w \cos\theta}{2}\right)}{\cos\theta} \right]^2 \text{sen}^3 \theta d\theta \quad (13)$$

Como podemos notar, os termos k_0 e j_0 que representam respectivamente o número de onda no espaço livre e a função de Bessel de primeira espécie e ordem zero, e representados pelas equações 13 e 14.

$$K_0 = \frac{2\pi f}{c} \quad (14)$$

$$x^2 \frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{dy}{dx} + (x^2 + v^2)y = 0 \quad (15)$$

Na equação 15, para que seja uma EDO de primeira espécie e ordem zero e siga os conceitos de Boyce e Diprima (2009), o termo v representará a ordem da equação e será um número real, desta maneira, o termo v terá de ser igual a zero, com essa alteração, a equação deverá ter o formato da equação 16.

$$x^2 \frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{dy}{dx} x^2 y = 0 \quad (16)$$

Para resolvermos a equação, devemos utilizar o método de Frobenius e resolver as derivadas de primeira e segunda ordem da equação 16, e assim chegaremos a equação 17. que é a função de Bessel de primeira espécie e ordem zero, assim como se desejava para o cálculo dos coeficientes que restavam definir da equação 13.

$$y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n x^{r+n} \quad (17)$$

Dessa forma, devemos calcular as derivadas de primeira e segunda ordem para a equação 17 e depois, substituí-las na equação 16, e com isso termos a equação de Bessel de ordem primeira ordem multiplicada por um termo constante.

$$y(x) = A_0 \left[1 + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n x^{2n}}{2^{2n} (n!)^2} \right] \quad (18)$$

Substituindo teremos:

$$J_0 = 1 + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n x^{2n}}{2^{2n} (n!)^2} \quad (19)$$

Após conhecermos os termos k_0 e j_0 , devemos agora determinar o termo g que representa a dimensão no *patch* da antena através da equação da resistência de entrada, definida por Balanis (2005) determinando a equação 20, e com algumas manipulações chegamos a equação 21, com o elemento g isolado na igualdade para que seja enfim determinado. Importante ainda citar que a resistência de entrada $R_{in}(g)$ adotada com o valor de 50Ω como é padrão para este tipo de antena.

$$R_{in}(g) = \frac{\cos^2\left(\frac{\pi g}{L}\right)}{2(G1 \pm G2)} \quad (20)$$

Agora, para que achemos o termo g , basta manipular a equação.

$$g = \frac{L}{\pi} \text{Arccos}\left(\sqrt{2(G1 \pm G2)R_{in}(g)}\right) \quad (21)$$

As dimensões para a antena representada na figura 5 serão:

Quadro 2 - Dimensões do patch da antena padrão

Dimensão	Medida (mm)
W	26
L	20
D	10.1
W0	1.5

g	6.6
-----	-------

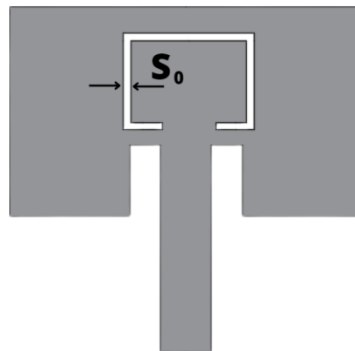
Fonte: O autor

3.2 Modelos e alterações

Tendo como antena padrão a antena representada na Figura 5, podemos usá-la para nossa primeira simulação, no entanto, como o intuito do trabalho é analisar o máximo de antenas possíveis com ressoadores inseridos em seu patch e analisarmos cada um de seus parâmetros, devemos ainda inserir esses ressoadores no corpo do elemento radiador.

Ressoadores são segundo (LAVOR, 2015) dois anéis metálicos concêntricos, sejam eles retangulares ou circulares gravados no patch ou no substrato dielétrico. E tais elementos são inclusos nas antenas pelo fato de suportarem comprimentos de onda maiores que seu diâmetro. Sendo assim, ao adicioná-los podemos ver como se comporta a antena e como seus parâmetros são alterados, como largura de banda, perda de retorno e diagrama de radiação. Um exemplo de antena com essas características seria:

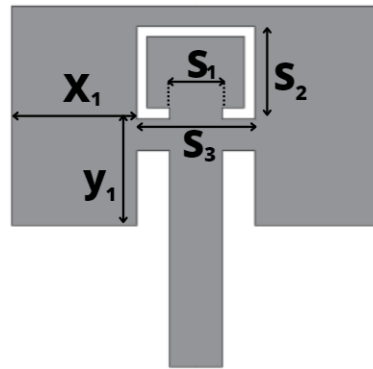
Figura 6 - Antena com ressoador retangular



Fonte: O autor

Neste trabalho, o modelo da figura 6 também será utilizado e calcularemos seus parâmetros, nos resta apenas determinar as dimensões do ressoador utilizado.

Figura 7 - Medidas do ressoador na posição 1



Fonte: O autor

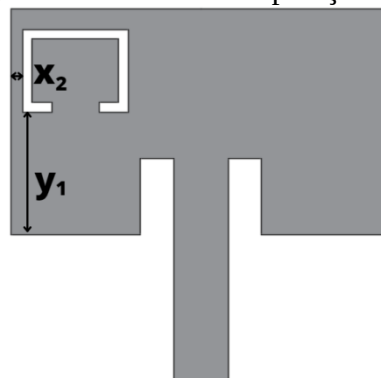
Quadro 3 - Dimensões posição 1

Elemento	Dimensão (mm)
S ₀	1
S ₁	6.5
S ₂	9.5
S ₃	7.5
X ₁	16.325
y ₁	17.35

Fonte: O

É importante citar que mudaremos a posição dos ressoadores, para analisarmos completamente sua funcionalidade, aproveitando ao máximo sua estrutura para que novos parâmetros sejam gerados e analisados, podendo acarretar ou não melhorias para a antena.

Figura 8 - Ressorador na posição 2



Fonte: O autor

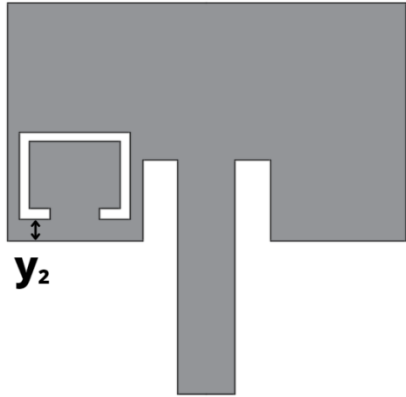
Quadro 4 - Ressorador na posição 2

Elemento	Posição (mm)
X ₂	8.325

Y_1	17.35
-------	-------

Fonte: O autor

Figura 9 - Ressorador na posição 3



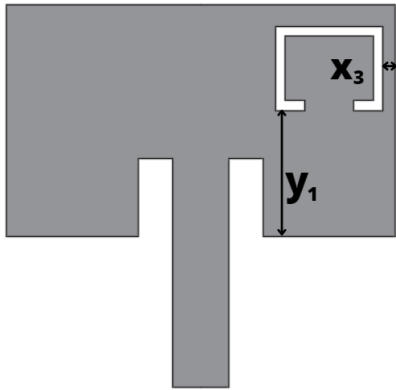
Fonte: O autor

Quadro 5 - ressoador na posição 3

Elemento	Posição (mm)
X_2	8.325
Y_2	12.35

Fonte: O autor

Figura 10 - Ressorador na posição 4



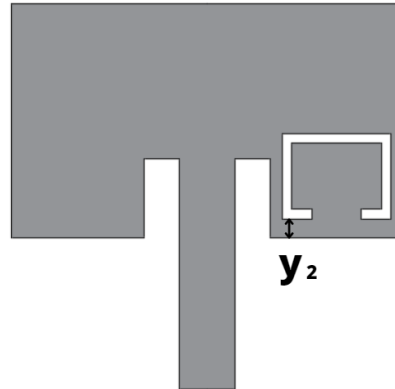
Fonte: O autor

Quadro 6 - Ressorador na posição 4

Elemento	posição (mm)
X_3	24.325
Y_1	17.35

Fonte: O autor

Figura 11 - Ressorador na posição 5



Fonte: O autor

Quadro 7 - Ressorador na posição 5

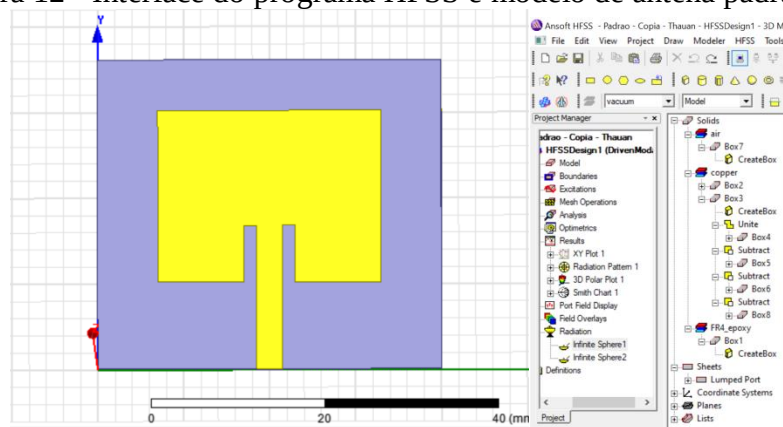
Elemento	posição (mm)
X_3	24.325
Y_2	12.35

Fonte: O autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após todos os cálculos de dimensões do *patch*, *gaps*, ressoadores e suas posições, foram feitas as simulações das antenas, através do *software* HFSS, apropriado para simulações eletromagnéticas em 3D, que nos retorna após as simulações valores precisos para a perda de retorno, diagrama de radiação e ganho.

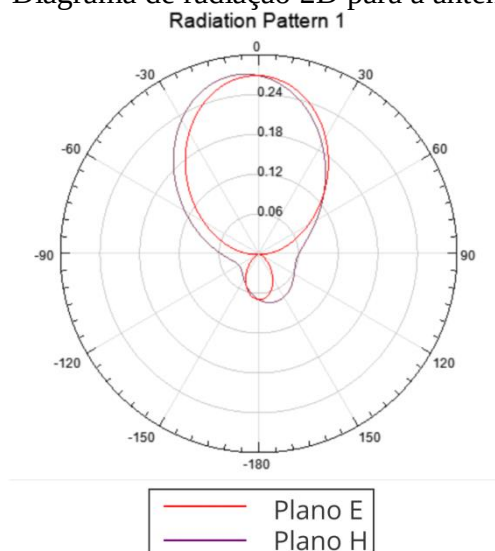
Figura 12 - Interface do programa HFSS e modelo de antena padrão



Fonte: O autor

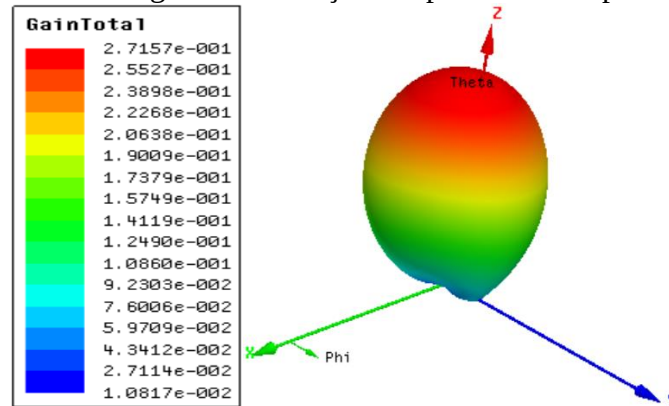
A primeira simulação feita foi na antena padrão, que apresentou os resultados mostrados nas Figuras 13 e 14 para ganho e diagrama de radiação em 2D e 3D, respectivamente.

Figura 13 - Diagrama de radiação 2D para a antena padrão



Fonte: O autor

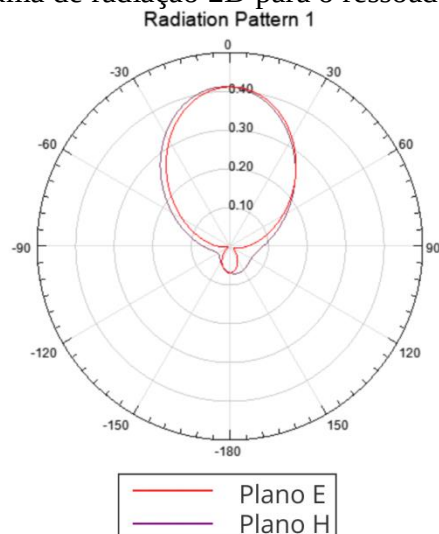
Figura 14 - Diagrama de radiação 3D para a antena padrão



Fonte: O autor

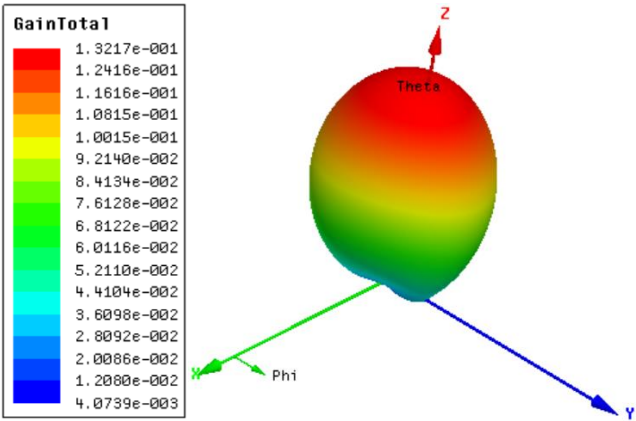
Continuando com as simulações, agora foi vez das antenas que tiveram um ressoador inserido em seu *patch*, respectivamente serão apresentados os resultados das antenas com ressoadores das posições de 1 a 5:

Figura 15 - Diagrama de radiação 2D para o ressoador na posição 1



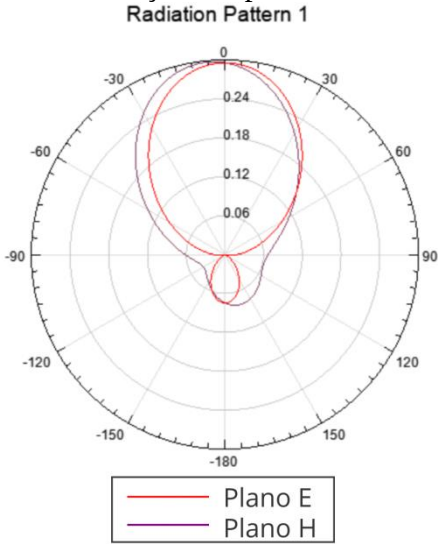
Fonte: O autor

Figura 16 - Diagrama de radiação 3D para o ressoador na posição 1



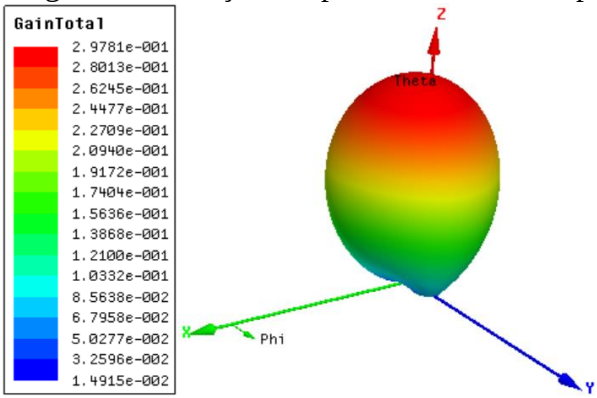
Fonte: O autor

Figura 17 -- Diagrama de radiação 2D para o ressoador na posição 2



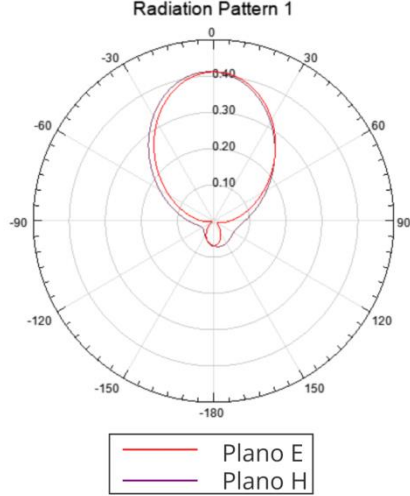
Fonte: O autor

Figura 18 - Diagrama de radiação 3D para o ressoador na posição 2



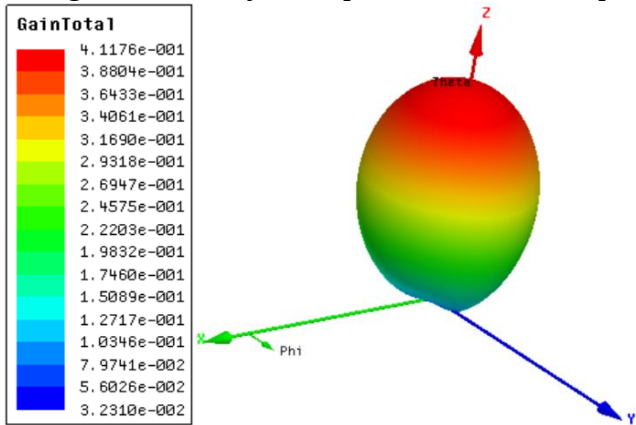
Fonte: O autor

Figura 19 - Diagrama de radiação 2D para o ressoador na posição 3



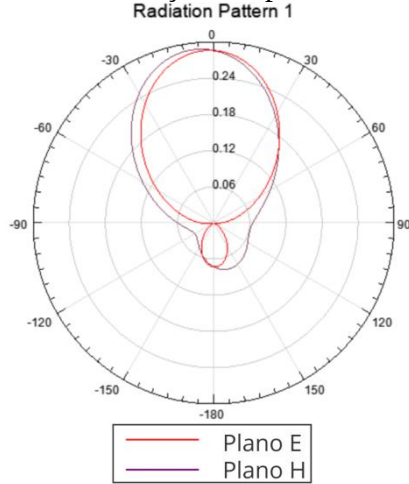
Fonte: O autor

Figura 20 - Diagrama de radiação 3D para o ressoador na posição 3



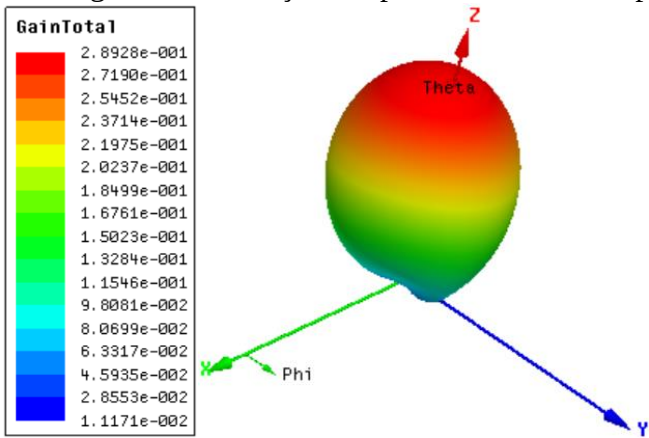
Fonte: O autor

Figura 21 - Diagrama de radiação 2D para o ressoador na posição 4



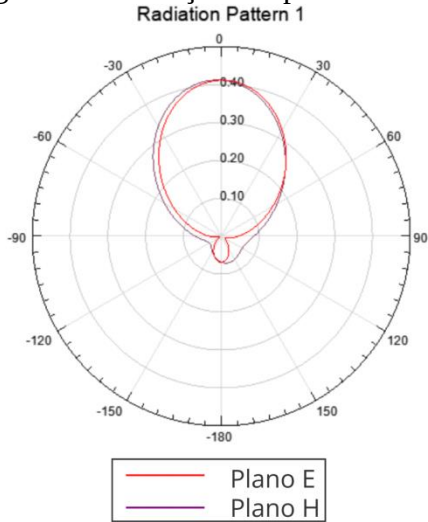
Fonte: O autor

Figura 22 - Diagrama de radiação 3D para o ressoador na posição 4



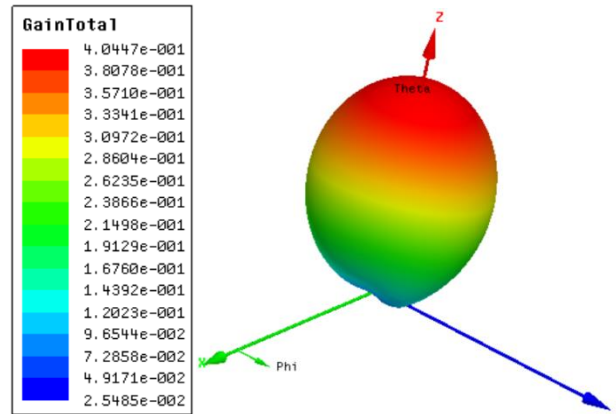
Fonte: O autor

Figura 23 - Diagrama de radiação 2D para ressoador na posição 5



Fonte: O autor

Figura 24 - Diagrama de radiação 3D para o ressoador na posição 5



Fonte: O autor

Quadro 1 - Ganho (dB) das antenas

Antena	Ganho total (dB)
Padrão	2,7157
Ressorador 1	1,3217
Ressorador 2	2,9781
Ressorador 3	4,1176
Ressorador 4	2,8928
Ressorador 5	4,0447

Fonte: O autor

Tendo posse dos dados para o ganho das antenas podemos analisar a diretividade delas em cada tipo de arranjo, e em quais direções radiam. Como as antenas de microfita são do tipo planar, é normal que se radie em apenas uma direção, ou seja, da direção perpendicular à superfície para cima, no entanto, notamos que em todas as antenas há dissipação de energia também na direção oposta, o que é normal, desde que a eficiência das antenas seja boa. Podemos ver isso nitidamente nos diagramas de radiação 3D, onde as ondas radiadas na direção oposta têm cor azul e apresentam uma pequena protuberância na região de baixo do gráfico.

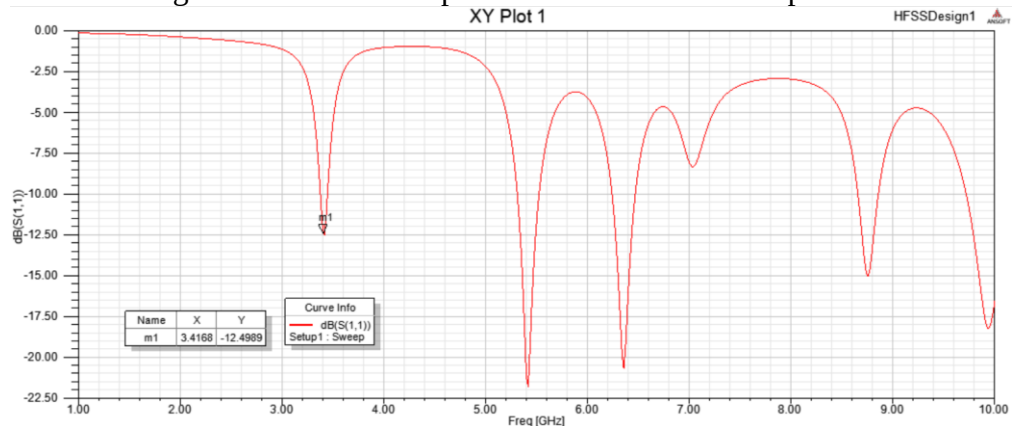
Os ganhos para essas partes do gráfico também são apresentados em módulo nas figuras, mas apresentando ganhos bem inferiores a radiação emitida na direção em que se deseja, representada num tom mais vermelho à medida que cresce, onde a antena que apresentou o melhor ganho foi antena com ressoador na posição 5, e a que demonstrou menor ganho foi a que possuía ressoador na posição 1.

Resta agora analisarmos nas antenas a perda de retorno em cada uma delas, e julgar quais apresentaram o melhor resultado na frequência de 3.5 GHz, como se deseja. É importante salientar que para este tipo de antena serão consideradas apenas as perdas de

retorno que ultrapassem em módulo o valor de -10dB, o valor padrão que representa quanto da potência que incide no *patch* é refletida de volta e tida como perda.

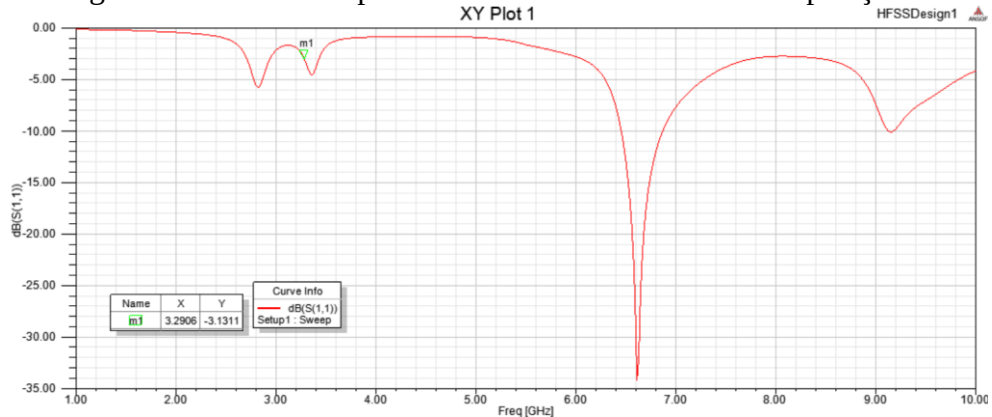
Esse parâmetro é dado quantitativamente pelas equações 8 e 9, onde o coeficiente de reflexão é expressado em função de decibéis através da equação da perda de retorno, onde o coeficiente de reflexão representa uma relação entre a tensão que entra no sistema e que é refletida, em um projeto ideal, o coeficiente de reflexão deve se aproximar o máximo possível de zero, transferindo isso para a equação da perda de retorno, vemos que o que se busca é uma perda de retorno que se aproxime do infinito.

Figura 25 - Gráfico da perda de retorno da antenna padrão



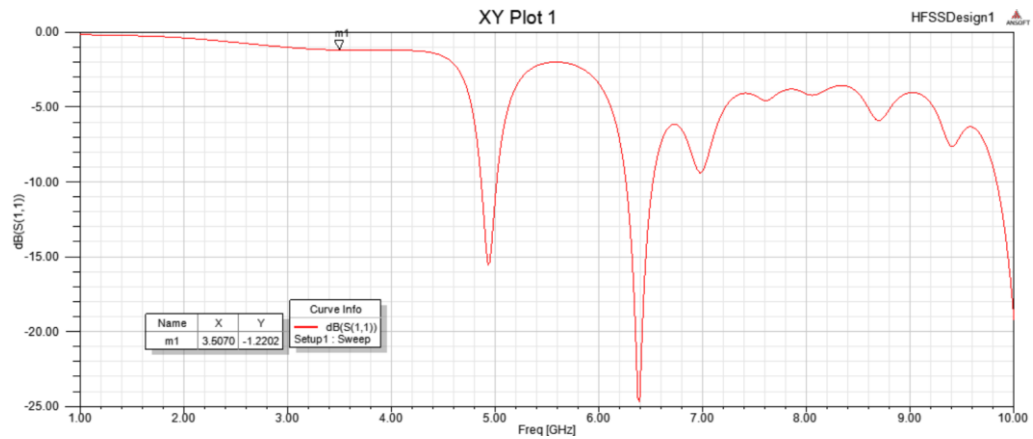
Fonte: O autor

Figura 26 - Gráfico da perda de retorno com ressonador na posição 1



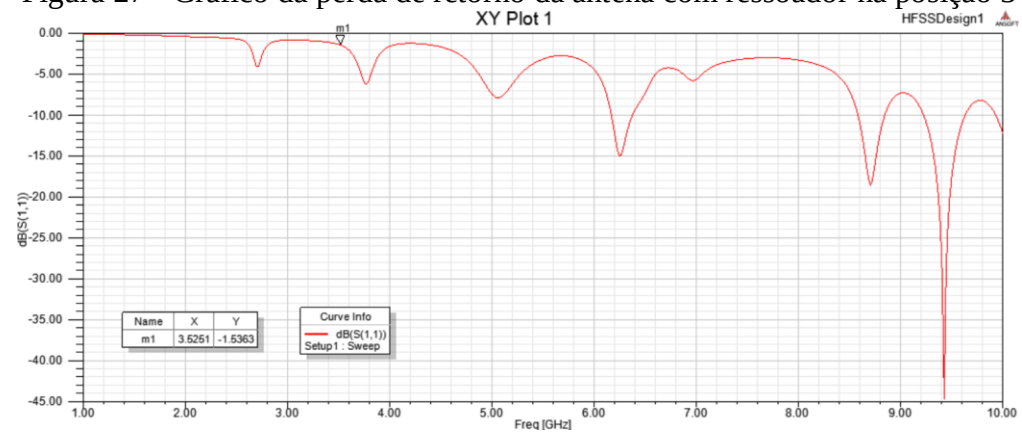
Fonte: O autor

Figura 26 - Gráfico da perda de retorno da antenna com ressonador na posição 2



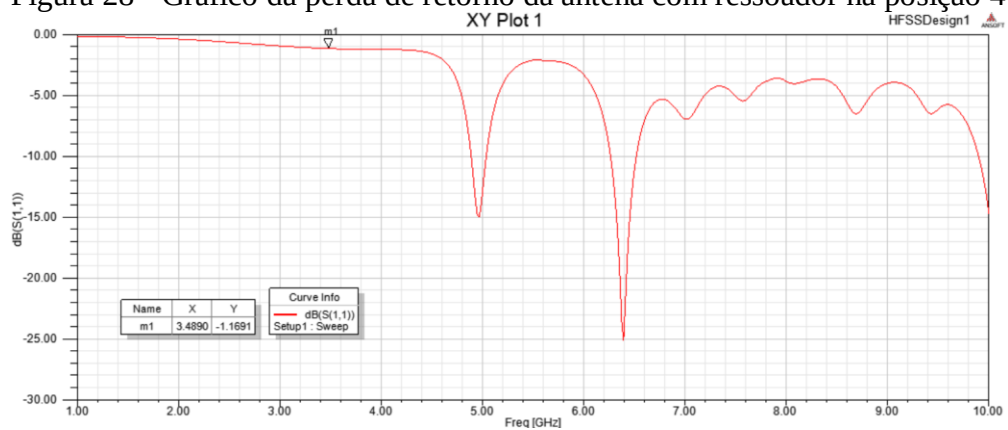
Fonte: O autor

Figura 27 - Gráfico da perda de retorno da antenna com ressoador na posição 3



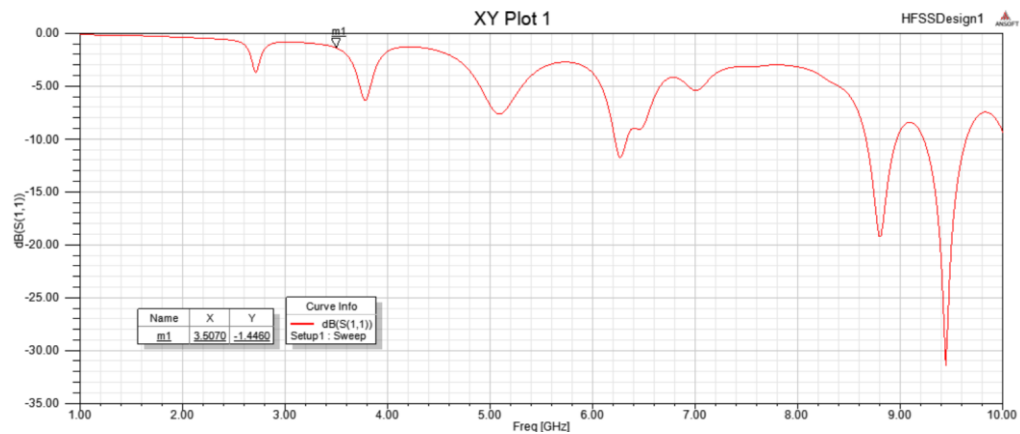
Fonte: O Autor

Figura 28 - Gráfico da perda de retorno da antenna com ressoador na posição 4



Fonte: O autor

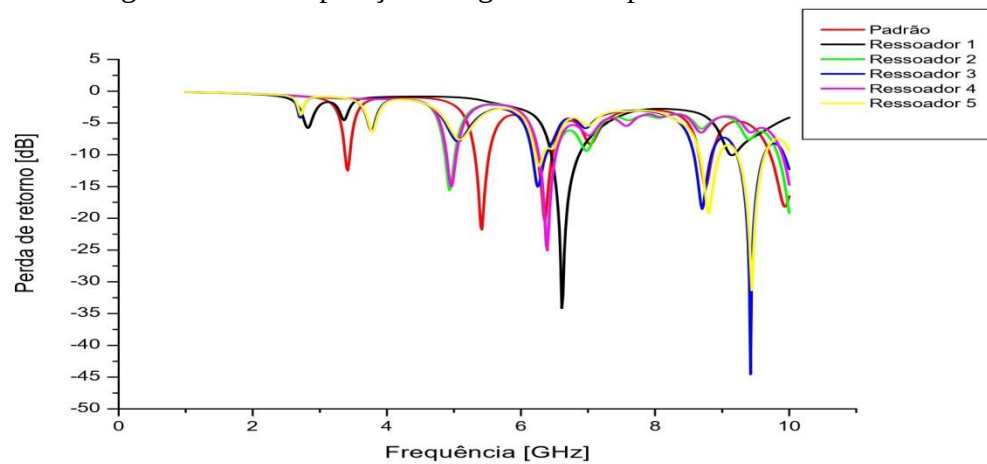
Figura 29 - Gráfico da perda de retorno da antenna com ressoador na posição 5



Fonte: O autor

Através dos gráficos de perda de retorno, podemos analisar que a única antenna que tem valor menor que -10dB (valor considerado adequado) para valores próximos de 3,5Ghz, é o gráfico da antenna padrão. Todas as demais antenas, não apresentam perdas de retorno adequadas para este valor de frequência.

Figura 30 - Sobreposição dos gráficos de perda de retorno



Fonte: O autor

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar de a antena na posição padrão ter sido a única a ter valores de perda de retorno adequados para frequências de 3,5GHz, não podemos descartar as outras faixas de frequência em que as demais antenas funcionam, podendo ter outros tipos de funcionalidades e aplicações, como em enlaces de rádio, por exemplo, que funcionam em frequências mais elevadas.

Algumas das antenas apresentaram uma perda de retorno relativamente alta em frequências de 6GHz e 9 GHz, sendo regiões onde se pode ter uma gestão de dados mais eficientes, onde um dos pontos fortes pode ser a redução da sobrecarga e interferências. Quanto ao ganho das antenas, apresentaram resultados satisfatórios, e também boa diretividade em faixas específicas de frequência, onde a perda de retorno é mais elevada.

De acordo com os gráficos podemos ver que a antena padrão apresentou uma largura de banda entre 3,3GHz e 3,45GHz, ou seja, uma largura de banda de aproximadamente 150MHz, e outras bandas funcionais e mais largas do que as citadas anteriormente.

6 REFERÊNCIAS

BALANIS, C. A. *Antenna Theory: Analysis and design*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & sons. Inc, 2005.

C. A. Balanis, *Antena theory: analysis and design.*: Wiley, 2012

CANAVEZ, Marcelo et al, 2019. **RADOMES COMPOSTOS POR ANÉIS RESSONADORES EM ANTENAS DE MICROFITA EM 18 GHZ**. Conferência: IX CONGRESSO DE ENGENHARIAS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI

FREITAS, João Victor Análise de ressoadores em antenas de microfita. **Revista JMOe**, Journal of Microwaves, Opto electronics and Electromagnetic Applications, Vol.20, No.1, Journal of Microwaves, Opto electronics and Electromagnetic Applications, Vol.20, No.1, March 2021.

IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas. IEEE Std 145-2013 (Revision of IEEE Std 145-1993), p. 1–50, Março 2014.

JUNIOR, Walter Pereira Carpes. AULA 23 - Antena impressa: projeto simplificado, casamento de impedâncias e polarização circular. Direção de Walter Pereira Campos Junior. Florianópolis: Youtube, 2021. (19 min.), P&B. Série Antenas impressas. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=8-S1hZyMkzeQ&t=4s>. Acesso em: 13 maio 2022.

LASKA, Marco. **Rádio Enlace I**: Estudo de Caso de Dimensionamento Empregando Geociências. Teleco. Disponível em: <https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialrenlace1/default.asp>. Acesso em: 20.09.2021

Loss, P. E. (20 de Julho de 2019). *1 vídeo (10 min). Os Efeitos do 5G no Corpo Humano*. Acesso em 30 de 09 de 2021, disponível em Publicaod pelo canal ciência todo dia : <https://www.youtube.com/watch?v=znHrQIbmsTA&t=310s>

OLIVEIRA, M. A. et al. Técnicas de casamento de impedâncias por linha de microfita em antenas patch circular para tecnologia ISM em 2,4 Ghz. **Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo 17º SBMO**

Disponível em: <https://docplayer.com.br/53024045-Tecnicas-de-casamento-de-impedancias-por-linha-de-microfita-em-antenas-patch-circular-para-tecnologia-ism-em-2-4-ghz.html>

Acesso em: 05 abr. 2022.

R. Goncalvez e P. Pinho, Antena Impressa Reconfigurável de Pequena Dimensão, 2012. **6º Congresso do comitê português da URSI**. Disponível em: https://www.anacom.pt/streaming/RicardoGoncalves_CongressoURSI2012.pdf?contentId=1148353&field=ATTACHED_FILE. Acesso em: 06 abr. 2022

Mundo, T. (20 de mar de 2019). *1 vídeo (6 min) Entenda: por que o 5G é tão revolucionário?* Acesso em 04 de out de 2021, disponível em Publicado pelo canal Tecmundo: <https://www.youtube.com/watch?v=44R0gsslRE>

MORAIS, J. H. C. de. Estudo de Antenas Patches de Microfita Miniaturizadas em Banda Larga Para Aplicação em Dispositivos móveis e portáteis. Dissertação (Mestrado – Engenharia Elétrica e da Computação) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2011.

SANTOS, H. W. dos. Desenvolvimento de antenas de microfita miniaturizadas com polarização circular para sistema de comunicação sem fio. Dissertação (mestrado – Engenharia elétrica e da computação) – Universidade federal do Rio Grnade do Norte, 2016.

VILELA, Luiza. **E-commerce**: o setor que cresceu 75% em meio à pandemia. Disponível em: <https://www.consumidormoderno.com.br/2021/02/19/e-commerce-setor-cresceu-75-crise-coronavirus/>. Acessado em: 29.09.2021