

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

AMELIZA SOUZA CORRÊA

## **Concepção de antenas em ondas milimétricas**

São José - SC

Agosto/2022



# CONCEPÇÃO DE ANTENAS EM ONDAS MILIMÉTRICAS

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Telecomunicações do campus São José do Instituto Federal de Santa Catarina, para a obtenção do diploma de Engenharia de Telecomunicações.

Orientadora: Evanaska Maria Barbosa Nogueira, Dra.

São José - SC

Agosto/2022

AMELIZA SOUZA CORRÊA

## CONCEPÇÃO DE ANTENAS EM ONDAS MILIMÉTRICAS

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheira de Telecomunicações, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

São José - SC, 30 de agosto de 2022:

---

**Evanaska Maria Barbosa Nogueira,**  
**Dra.**

Orientadora  
Instituto Federal de Santa Catarina

---

**Ramon Mayor Martins, Me.**  
Instituto Federal de Santa Catarina

---

**Carlyle Câmara Santos Junior, Me.**  
Instituto Federal de Santa Catarina

*Este trabalho é dedicado a minha mãe, que esteve sempre ao meu lado durante minha trajetória acadêmica e me deu todo o apoio para que eu pudesse concluí-la.*



*Se alguém te oferecer uma oportunidade incrível, mas você não tem certeza de que consegue fazer, diga sim - e depois aprenda como fazer.*

*Richard Branson*



# RESUMO

Com os avanços tecnológicos para a constante miniaturização, exige-se cada vez mais velocidade nos sistemas de comunicação e a faixa de ondas milimétricas vêm para atender essa demanda, já que possui uma larga banda disponível. Este trabalho propõe o projeto e simulação de uma antena *patch* retangular na frequência de 60 GHz utilizando o *software Ansys HFSS* ©. Após a análise da simulação, são necessárias otimizações no dimensionamento da antena para um melhor casamento de impedância e conseqüentemente um bom funcionamento. Neste trabalho, será comparada uma antena com melhorias de adaptação usando reentrâncias e uma antena sem reentrâncias, que também possui um desempenho satisfatório. Com os resultados foi possível comparar a diferença entre os gráficos de perda de retorno e identificar que a antena com reentrâncias tem apenas 0,14% de perdas por reflexão, enquanto a sem reentrância tem 13%.

**Palavras-chave:** Antena. Ondas milimétricas. Casamento de impedâncias. Simulação. Telecomunicações.



# ABSTRACT

With technological advances for constant miniaturization, more and more speed is required in communication systems and the millimeter wave band comes to attend this demand, since it has a wide available bandwidth. This work proposes the design and simulation of a rectangular patch antenna at a frequency of 60 GHz using software Ansys HFSS ©. After the analysis of the simulation, optimizations are necessary in the antenna sizing for a better impedance matching and, consequently, a good operation. In this work, an antenna with adaptation improvements using recesses and an antenna without recesses, which also has a satisfactory performance, will be compared. With the results, it was possible to compare the difference between the return loss graphs and identify that the antenna with recesses has only 0.14% of reflection losses, while the one without recess has 13%.

**Keywords:** Antenna. Millimeter waves. Matching of impedances. Simulation. Telecommunications.



# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Antena de microfita com <i>patch</i> retangular . . . . .	24
Figura 2 – Formas geométricas do <i>patch</i> . . . . .	24
Figura 3 – Fendas radiantes do <i>patch</i> . . . . .	25
Figura 4 – Visão superior dos efeitos de borda do <i>patch</i> . . . . .	25
Figura 5 – Dimensões da linha de microfita . . . . .	26
Figura 6 – Alimentação por cabo coaxial . . . . .	27
Figura 7 – Alimentação por acoplamento . . . . .	27
Figura 8 – Alimentação por fenda . . . . .	28
Figura 9 – Alimentação por CPW e GCPW . . . . .	28
Figura 10 – Alimentação por <i>pads</i> . . . . .	29
Figura 11 – Dimensões do <i>patch</i> com reentrância . . . . .	29
Figura 12 – Antena <i>patch</i> utilizando transformador de quarto de onda . . . . .	30
Figura 13 – Circuito com transformador de quarto de onda . . . . .	30
Figura 14 – Sentidos da polarização circular . . . . .	32
Figura 15 – Antena <i>patch</i> com polarização circular . . . . .	33
Figura 16 – Ângulos da perda de polarização . . . . .	33
Figura 17 – Largura de banda para $S_{11} = -10dB$ . . . . .	34
Figura 18 – Diagrama de radiação comum em antenas <i>patches</i> . . . . .	35
Figura 19 – <i>Design</i> da antena <i>patch</i> com reentrâncias . . . . .	38
Figura 20 – Gráfico da perda de retorno ( $S_{11}$ ) . . . . .	38
Figura 21 – Diagrama de radiação . . . . .	39
Figura 22 – <i>Design</i> da antena <i>patch</i> . . . . .	41
Figura 23 – Gráfico da perda de retorno ( $S_{11}$ ) . . . . .	41
Figura 24 – Diagrama de radiação . . . . .	42
Figura 25 – Configuração do sistema automatizado para câmara anecoica . . . . .	49
Figura 26 – Posicionamento da ponta de prova no <i>patch</i> . . . . .	50



# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Substratos mais utilizados . . . . .	31
Tabela 2 – Parâmetros retirados do projeto de simulação . . . . .	38
Tabela 3 – Comparação dos valores calculados com os valores simulados . . . . .	40



# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>AUT</b> <i>Antenna Under Test</i> . . . . .	50
<b>CI</b> s <i>Circuitos Integrados</i> . . . . .	29
<b>CNPq</b> <i>Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico</i> . . . . .	21
<b>CPW</b> <i>Coplanar Waveguide</i> . . . . .	26
<b>EHF</b> <i>Extremely High Frequency</i> . . . . .	21
<b>EPUSP</b> <i>Escola Politécnica da USP</i> . . . . .	49
<b>FEM</b> <i>Finite-Element Method</i> . . . . .	37
<b>GCPW</b> <i>Grounded Coplanar Waveguide</i> . . . . .	28
<b>GSG</b> <i>Ground-Signal-Ground</i> . . . . .	28
<b>HFSS</b> <i>High Frequency Structure Simulator</i> . . . . .	37
<b>LME-USP</b> <i>Laboratório de Microeletrônica da Universidade de São Paulo</i> . . . . .	37
<b>PLF</b> <i>Polarization Loss Factor</i> . . . . .	33
<b>PMF</b> <i>Polarization Matching Factor</i> . . . . .	33
<b>RF</b> <i>Radiofrequência</i> . . . . .	28
<b>UNESP</b> <i>Universidade Estadual Paulista</i> . . . . .	21
<b>USP</b> <i>Universidade de São Paulo</i> . . . . .	21
<b>VNA</b> <i>Vetorial Network Analyser</i> . . . . .	29
<b>VSWR</b> <i>Voltage Standing Wave Ratio</i> . . . . .	34



# LISTA DE SÍMBOLOS

$\lambda$	Comprimento de onda
$f_r$	Frequência de ressonância
$\varepsilon$	Permissividade elétrica
$\varepsilon_r$	Permissividade elétrica relativa
$\varepsilon_{ref}$	Permissividade elétrica relativa efetiva
$h$	Espessura do substrato dielétrico
$c$	Velocidade da luz no vácuo
$W$	Largura
$L$	Comprimento
$L_{ef}$	Comprimento efetivo
$Z_0$	Impedância característica da linha
$Z_L$	Impedância da carga
$t$	Espessura da linha de microfita
$y_0$	Comprimento da reentrância do <i>patch</i>
$x_0$	Largura da reentrância do <i>patch</i>
$R_{in}$	Resistência de entrada
$\vec{E}$	Vetor campo elétrico
$\phi$	Ângulo do vetor campo elétrico
$\psi_p$	Ângulo de polarização
$S_{11}$	Perda de retorno
$tg(\delta)$	Tangente de perdas do substrato dielétrico



# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>21</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivo geral</b>	<b>21</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos específicos</b>	<b>22</b>
<b>1.3</b>	<b>Organização do texto</b>	<b>22</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>23</b>
<b>2.1</b>	<b>Antena impressa</b>	<b>23</b>
2.1.1	Antenas <i>patch</i>	23
2.1.1.1	Tipos de alimentação	26
2.1.1.2	Técnicas para casamento de impedâncias	29
2.1.1.3	Substratos	31
2.1.1.4	Parâmetros importantes	31
2.1.1.4.1	Polarização	31
2.1.1.4.2	Largura de banda	34
2.1.1.4.3	Diagrama de radiação	34
2.1.1.4.4	Reflexão	34
2.1.1.5	Antenas em ondas milimétricas	35
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>37</b>
<b>3.1</b>	<b>Simulação</b>	<b>37</b>
3.1.1	Análise	37
3.1.2	Testes	41
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>43</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>45</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>47</b>
	<b>ANEXO A – MEDIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE ANTENAS EM ONDAS MILIMÉTRICAS</b>	<b>49</b>



# 1 INTRODUÇÃO

A disponibilidade de uma banda significativa não licenciada, aumentou a procura e interesse em projetos de ondas milimétricas (WANG; CAHOON, 2008), também conhecidas como ondas lentas, que refere-se a banda *Extremely High Frequency* (EHF) (30 GHz e 300 GHz). Atualmente o espectro mais utilizado é o das micro-ondas, principalmente a faixa entre 900 MHz e 2,5 GHz e é notável que ele encontra-se saturado por conter a maior parte das aplicações e protocolos de comunicações sem fio (GOMES, 2017). Por esse motivo, surgiu o projeto universal do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) entre a Professora Orientadora Evanaska Maria Barbosa Nogueira e os professores Rafael Abrantes Penchel da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Gustavo Pamplona Rehder e Ariana L. C. Serrano da Universidade de São Paulo (USP). Logo, a antena em desenvolvimento neste trabalho, faz parte desse projeto.

Visando o futuro, a frequência de 60 GHz é promissora e será amplamente utilizada para diversas aplicações, como possivelmente a rede móvel 6G. Segundo Gomes (2017), desde o início do ano 2000 essa faixa de frequência tem se destacado pela alta velocidade de transmissão de dados sem fio em curtas distâncias, podendo ser a solução para *streaming* de vídeos de alta definição.

Neste trabalho foi feito um experimento através do simulador Ansys HFSS ©, em que foram analisados e posteriormente modificados os parâmetros da simulação de uma antena com reentrâncias afim de retirar seus recuos. Com a antena em sua forma básica, sem reentrâncias, foram analisados os resultados obtidos por meio do gráfico de perda de retorno ou *return loss* ( $S_{11}$ ) e do diagrama de radiação, como por exemplo o casamento de impedâncias, largura de banda e ganho.

## 1.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho é estudar os métodos necessários para o desenvolvimento de uma antena na frequência das ondas milimétricas e analisar a simulação disponibilizada pelo Penchel (2022), atual professor assistente na UNESP, que opera na frequência de 60 GHz. Para esse objetivo ser alcançado, foi necessário realizar uma revisão bibliográfica para conhecer o estado da arte de antenas que operam em 60 GHz, fazer simulações e modificações em seu projeto, com a intenção de se familiarizar com o desempenho da antena, para que fosse possível analisar e comparar os resultados obtidos.

## 1.2 Objetivos específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica intensa, a fim conhecer os métodos desenvolvimento de uma antena *patch* voltada para a frequência de 60 GHz;
- Analisar e obter os parâmetros necessários do substrato utilizado na simulação;
- Calcular os parâmetros necessários para o projeto de uma antena *patch* e compará-los com o simulado;
- Modificar a simulação com o objetivo de analisar os novos resultados obtidos e compará-los com os resultados anteriores.

## 1.3 Organização do texto

Este documento está organizado da seguinte forma:

No [Capítulo 2](#) é apresentada a base teórica estudada para melhor compreensão e para a execução deste projeto. No [Capítulo 3](#) são apresentadas as análises realizadas na simulação, os resultados dos cálculos e os testes executados para comparação dos resultados das antenas. Por fim, no [Capítulo 4](#), há a exposição dos assuntos tratados, a discussão dos resultados e propostas para trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Antena impressa

As antenas impressas ou antenas planares são amplamente utilizadas atualmente por possuírem pequenas dimensões, terem um perfil planar baixo, serem leves, adaptarem-se a superfícies planas ou com curvatura e devido ao seu baixo custo de fabricação (OLIVEIRA, 2008; PIRES; SILVA, 2017), pois se trata de um processo simples empregando a tecnologia de circuito impresso (JUNIOR, 2019).

Esse tipo de antena tem várias vantagens: versatilidade na polarização, podendo ser circular ou linear, facilidade para integrar com circuitos e trilhas de alimentação e pode operar em múltiplas frequências (multibanda). Entretanto, também há seus inconvenientes: baixa eficiência de radiação, radiação indesejável nas linhas e largura de banda estreita (OLIVEIRA, 2008; JUNIOR, 2019).

Tem-se constantemente buscado a miniaturização dessas antenas através da utilização de substratos dielétricos de alta permissividade elétrica, da aplicação de cargas resistivas ou reativas e do aumento do comprimento elétrico da antena por meio da otimização de sua geometria (OLIVEIRA, 2008).

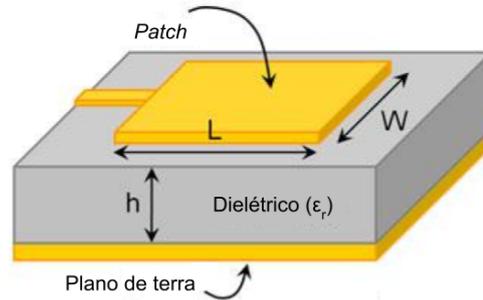
Também é desejado o aumento da largura de banda de operação dessas antenas planares utilizando diferentes técnicas para este fim, fazendo com que seja ampliado o seu potencial de aplicação em diversas áreas (CARLETI; ANTONIO; RIBEIRO, 2014; PIRES; SILVA, 2017).

#### 2.1.1 Antenas *patch*

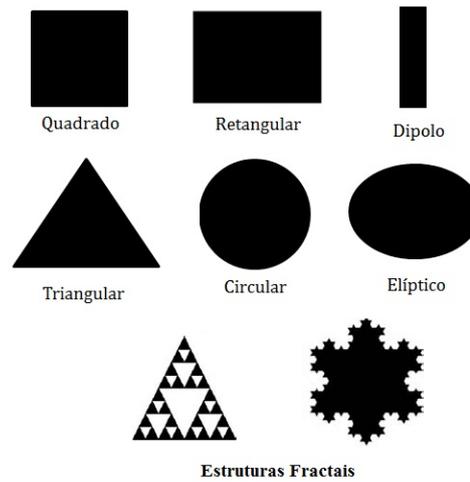
A antena *patch*, é a forma mais básica de uma antena impressa e uma das mais utilizadas para aplicações em ondas milimétricas. As antenas impressas do tipo *patch* são constituídas de uma placa radiante, chamada de *patch*, seguida de um substrato dielétrico e, em sua base, um plano de terra, conforme ilustra a Figura 1. Essas antenas são chamadas normalmente de antenas *microstrip* ou também de antenas microlinhas (GERALDO, 2018).

Um *patch* pode ter diversas formas, assim como pode ser visto na Figura 2, normalmente formas geométricas convencionais, entre elas, as retangulares, circulares e as formas fractais (OLIVEIRA, 2008). Neste trabalho, o foco será na antena *patch* retangular, por apresentar uma maior largura de banda na faixa de frequência pretendida.

Segundo Gomes (2017), Junior (2019), para projetar de maneira simplificada uma antena *patch*, deve ser seguido um conjunto de etapas. O primeiro passo é a especificação

Figura 1 – Antena de microfita com *patch* retangular

Fonte: Adaptado de (TALK, 2011)

Figura 2 – Formas geométricas do *patch*

Fonte: (LIRA, 2017)

dos parâmetros do substrato dielétrico, tais quais, a frequência de ressonância  $f_r$ , sua permissividade relativa  $\epsilon_r$  e sua altura  $h$ , que não pode ser maior do que o valor dado na Equação 2.1 para evitar a excitação dos modos de onda de superfície dentro do substrato.

$$h < \frac{c}{4f_r\sqrt{\epsilon_r - 1}}, \quad (2.1)$$

em que  $c$  é a velocidade da luz no vácuo.

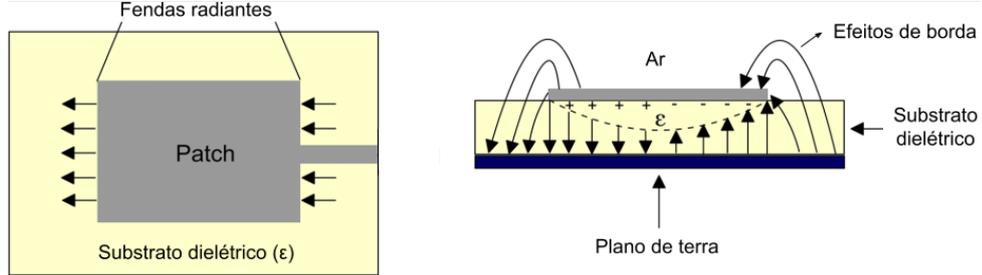
Também é necessário o cálculo da largura  $W$  do *patch*, que, para uma melhor eficiência de radiação, pode ser determinada pela Equação 2.2 abaixo:

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}. \quad (2.2)$$

Como pode ser visto na Figura 3, há campo elétrico no interior do substrato e no ar, portanto, pelo fato de o campo elétrico estar em meios com permissividades distintas, a onda se propagará de forma diferente nos dois casos. A fim de representar o meio unificado,

tem-se a Equação 2.3 que representa a permissividade relativa efetiva (ou equivalente) (JUNIOR, 2019).

Figura 3 – Fendas radiantes do *patch*

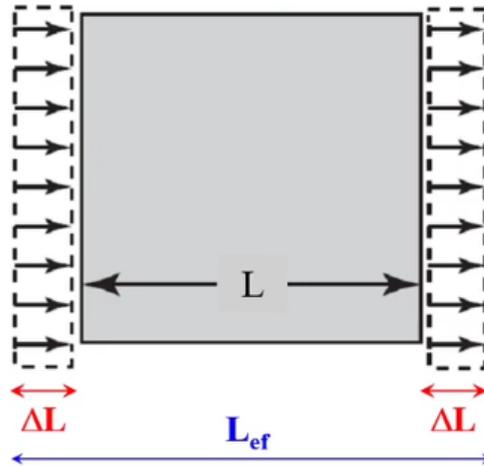


Fonte: Adaptado de (CHAVALI; NIKOLOVA, 2019)

$$\varepsilon_{ref} = \left( \frac{\varepsilon_r + 1}{2} \right) + \left( \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \right) \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{12h}{W}\right)}} \quad (2.3)$$

O comprimento do *patch* é  $L$ , mas, devido aos efeitos do campo elétrico nas bordas, faz com que o  $L_{ef}$  seja maior que  $L$ , assim como visto na Figura 4.

Figura 4 – Visão superior dos efeitos de borda do *patch*



Fonte: (JUNIOR, 2019)

O comprimento efetivo  $L_{ef}$  do *patch* é dado pela Equação 2.4:

$$L_{ef} = L + 2\Delta L \quad (2.4)$$

O valor aproximado de  $\Delta L$  é dado na Equação 2.5:

$$\Delta L \approx 0,412h \frac{(\varepsilon_{ref} + 0,3)\left(\frac{W}{h} + 0,264\right)}{(\varepsilon_{ref} - 0,258)\left(\frac{W}{h} + 0,8\right)} \quad (2.5)$$

O comprimento do *patch*  $L$ , considerando um *patch* de meia onda, é dado por:

$$L_{ef} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{ref}}} \quad (2.6)$$

Portanto:

$$L = L_{ef} - 2\Delta L \quad (2.7)$$

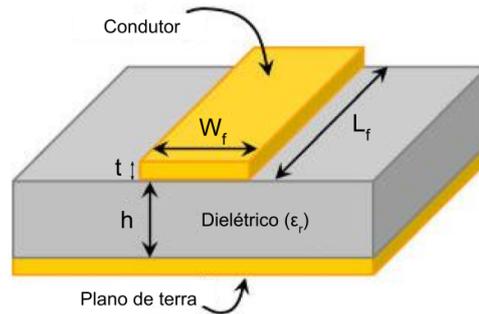
### 2.1.1.1 Tipos de alimentação

Nesta sessão, será visto alguns dos tipos de alimentação mais utilizados em antenas impressas do tipo *patch*. Sendo a linha de microfita e a *Coplanar Waveguide (CPW)* as mais comuns em antenas de alta frequência.

- Linha de microfita

Este é o tipo mais comum de alimentação, onde o *patch* é alimentado por uma linha impressa, de acordo com a [Figura 5](#) abaixo.

Figura 5 – Dimensões da linha de microfita



Fonte: Adaptado de (TALK, 2011)

Para o cálculo da largura da linha de microfita ( $W$ ), é utilizada a [Equação 2.8](#) abaixo:

$$\frac{W_f}{h} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A-2}}; & \frac{W_f}{h} \leq 2 \\ \frac{2}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln 2B - 1 + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[ \ln B - 1 + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right] \right\}; & \frac{W_f}{h} > 2 \end{cases} \quad (2.8)$$

em que,

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left( 0,23 + \frac{0,11}{\epsilon_r} \right) \quad (2.9)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}}. \quad (2.10)$$

Sendo  $Z_0$  a impedância característica da linha de transmissão.

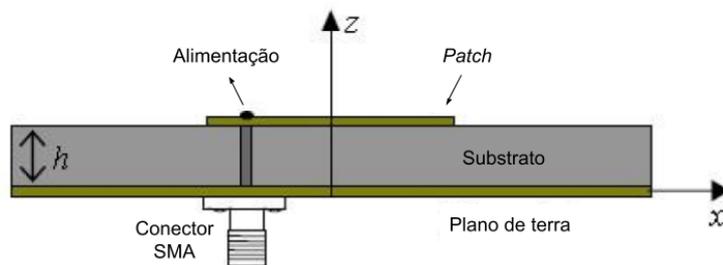
A espessura  $t$  da linha de transmissão é geralmente desprezada por ser muito pequena (aproximadamente  $12\mu\text{m}$ ) (SILVA, 2017).

Uma das desvantagens dessa alimentação é o fato de que por a linha de microfita ser uma extensão do *patch*, também pode radiar potência, o que acaba influenciando no desempenho da antena (JUNIOR, 2019).

- Cabo coaxial

Neste tipo de alimentação, como apresentado na Figura 6, o condutor externo do conector SMA do cabo coaxial é ligado ao plano de terra, enquanto o condutor interno é ligado diretamente à placa radiante através do substrato.

Figura 6 – Alimentação por cabo coaxial



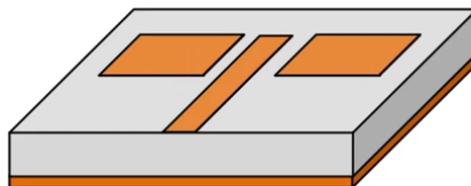
Fonte: Adaptado de (DIOGO, 2011)

A vantagem diante da linha de microfita é que quase não há radiações indesejadas, mas também, não é comum esse modo de alimentação por não ser tão simples de conectar um cabo coaxial à placa (JUNIOR, 2019).

- Linha de acoplamento

Nesse caso, não há contato da linha de alimentação com os *patches*, a alimentação é feita através do acoplamento eletromagnético entre elas (JUNIOR, 2019), como é visto na Figura 7 abaixo.

Figura 7 – Alimentação por acoplamento



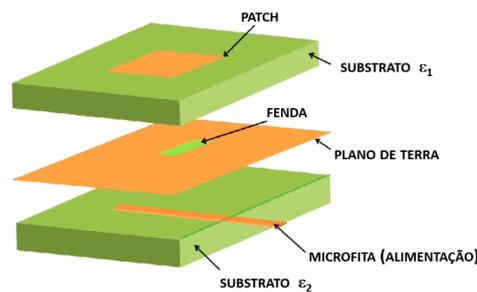
Fonte: (JUNIOR, 2019)

- Fenda

A alimentação por fenda é mais complexa e tem um custo mais elevado, por unir dois substratos com  $\epsilon_r$  diferentes, tendo um melhor aproveitamento das características da antena. Quando a permissividade do substrato é baixa, o *patch* radia com mais

potência, mas quando é alta, o *patch* radia menos. Sendo assim, conforme a Figura 8, a alimentação por fenda se dá pela união de dois substratos: o superior, com permissividade  $\varepsilon_1$  baixa, para que a placa radie mais, já no substrato inferior, uma permissividade  $\varepsilon_2$  alta, para que a linha de transmissão radie pouco. O acoplamento desses dois substratos acontece através de uma fenda no plano de terra entre eles (JUNIOR, 2019).

Figura 8 – Alimentação por fenda



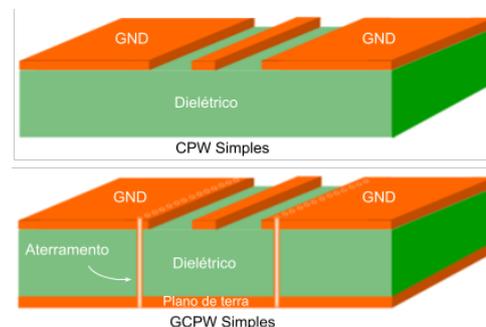
Fonte: (JUNIOR, 2019)

- *CPW*

A alimentação por *CPW* é uma técnica muito utilizada em antenas na frequência de ondas milimétricas, pois não é possível o acoplamento de um conector SMA, por exemplo, pois o tamanho diminuto da antena não suporta esse sistema de alimentação.

No caso das antenas *CPW*, tem-se uma linha de microfita separada de dois planos de terra, alinhados acima do substrato, já no *Grounded Coplanar Waveguide (GCPW)* a estrutura é a mesma, mas o terra é conectado ao plano de terra do substrato, assim como exemplificado na Figura 9 (INTEGRITY, 2021).

Figura 9 – Alimentação por CPW e GCPW

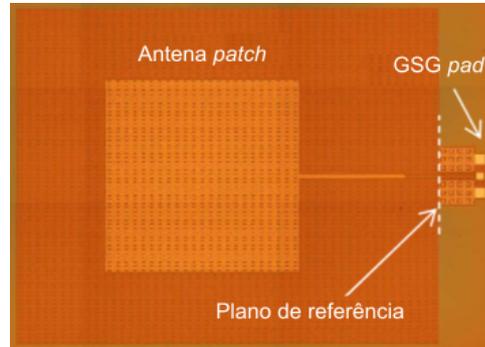


Fonte: Adaptado de (INTEGRITY, 2021)

Pode-se também utilizar *pads* na alimentação da antena (Figura 10), eles são usados em estruturas do tipo *Ground-Signal-Ground (GSG)*, no qual, para altas frequências, são comumente alimentados com o sinal de Radiofrequência (RF), proveniente de

um *Vetorial Network Analyser* (VNA), através de uma ponta de prova específica para Circuitos Integrados (CIs).

Figura 10 – Alimentação por *pads*



Fonte: Adaptado de (HIRANO et al., 2012)

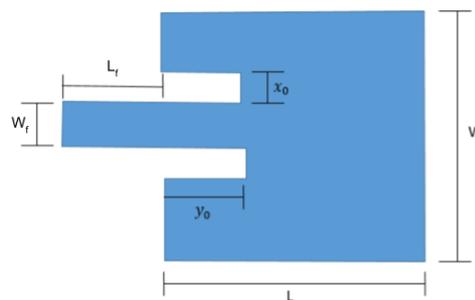
### 2.1.1.2 Técnicas para casamento de impedâncias

As técnicas para casamento de impedâncias nas antenas de microfita são comumente usadas para que a linha de transmissão e o *patch* tenham a mesma impedância (convencionalmente  $50\Omega$ ), para que assim, não haja reflexão do sinal.

- Reentrância no *patch* (*inset feed*)

A inserção da reentrância no *patch* é uma das técnicas mais usadas para haver um casamento de impedâncias adequado.

Figura 11 – Dimensões do *patch* com reentrância



Fonte: (GERALDO, 2018)

Com o auxílio da Figura 11, é possível visualizar o dimensionamento dessas reentrâncias.

Para encontrar o comprimento da reentrância  $y_0$ , é utilizada a Equação 2.11 de resistência de entrada.

$$R_{in}(y_0) = R_{in}(y_0 = 0) \cos^2 \left( \frac{\pi}{L} y_0 \right). \quad (2.11)$$

Sendo  $R_{in}(y_0 = 0)$  a resistência de entrada desconsiderando a reentrância.

Portanto,

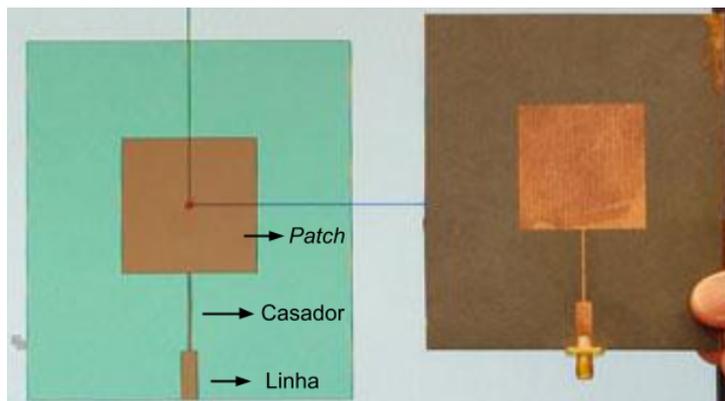
$$y_0 = \frac{L}{\pi} \arccos \left( \sqrt{\frac{50}{R_{in}(y_0 = 0)}} \right). \quad (2.12)$$

Esclarecendo que, usualmente, a largura da reentrância  $x_0$  é considerada igual a largura da linha de microfita  $w_0$ .

- Transformador de quarto de onda

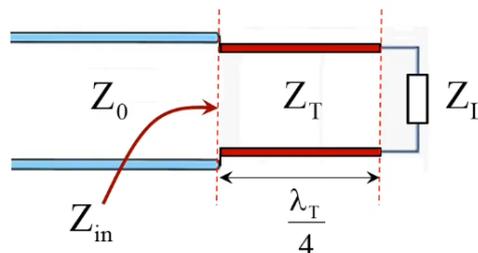
Esta também é uma técnica muito aplicada no casamento de impedâncias. Utiliza-se um casador entre a linha de transmissão e o *patch* (Figura 12), que é um segmento de linha com comprimento de  $\frac{1}{4}\lambda$ , com o valor de impedância demonstrado na Equação 2.13 (JUNIOR, 2019) e visto na Figura 13.

Figura 12 – Antena *patch* utilizando transformador de quarto de onda



Fonte: Adaptado de (TALK, 2011)

Figura 13 – Circuito com transformador de quarto de onda



Fonte: (JUNIOR, 2019)

$$Z_T = \sqrt{Z_0 Z_L} \quad (2.13)$$

Onde  $Z_T$  é a impedância no transformador (casador),  $Z_0$  é a impedância característica na linha principal e  $Z_L$  a impedância na carga (antena).

- *Stub* (Toco de radiofrequência)

O toco é um segmento de linha de transmissão terminado em curto-circuito ou circuito aberto. Em antenas de microfita, é mais utilizada a terminação em circuito aberto, por ser mais simples de confeccionar (JUNIOR, 2019).

### 2.1.1.3 Substratos

Para que a antena opere da maneira desejada, o substrato dielétrico tem que possuir parâmetros que contribuam para esse bom funcionamento. Um dos parâmetros que deve ser analisado é a tangente de perdas ( $tg(\delta)$ ), que em frequências elevadas deve ser a mais baixa possível para que a potência seja de fato radiada, e não consumida sob forma de calor pelo dielétrico (JUNIOR, 2019).

O mesmo acontece com a constante dielétrica ( $\epsilon_r$ ), também conhecida como permissividade relativa, para a qual é desejado um valor mais baixo, para que a antena tenha mais eficiência e maior largura de banda (SILVA, 2017).

Tabela 1 – Substratos mais utilizados

Material	$\epsilon_r$	$tg(\delta)$
Alumina	9,9	0,0002
Teflon	2,1	0,0004
FR-4	4,4	0,0200

Fonte: (JUNIOR, 2019)

Os substratos mais comuns são apresentados na Tabela 1, sendo eles: a Alumina, que é o óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ); o Teflon, que é na verdade o nome comercial dado ao politetrafluoretileno (PTFE), outro composto químico e o FR4, um material composto por fibra de vidro e resina epóxi.

### 2.1.1.4 Parâmetros importantes

Nessa sessão serão vistos alguns parâmetros importantes que descrevem o comportamento e desempenho das antenas.

#### 2.1.1.4.1 Polarização

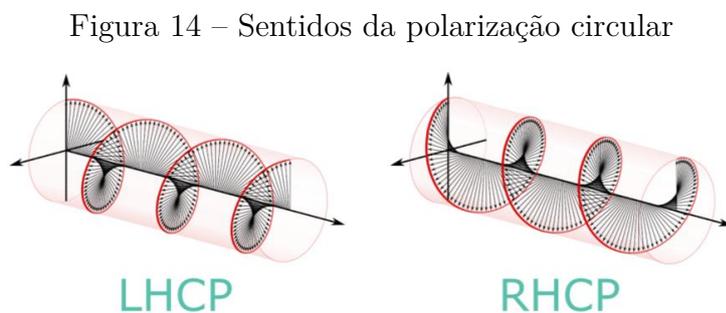
A polarização determina a direção do campo elétrico da onda radiada. Como uma antena pode radiar campos elétricos com diferentes ângulos, geralmente, a direção considerada como referência é a direção de máxima radiação, ou seja, a direção do vetor campo elétrico ( $\vec{E}$ ) (JUNIOR, 2019).

$$\vec{E}(z, t) = E_1 \cos(\omega t - \beta z) \vec{i} + E_2 \cos(\omega t - \beta z + \phi) \vec{j} \quad (2.14)$$

Abaixo são apresentados de maneira sucinta os tipos de polarização existentes de acordo com Junior (2019), sendo a polarização linear a mais utilizada em antenas impressas *patch*.

- Polarização linear: A direção do vetor campo elétrico se mantém constante à medida que a onda se propaga. Um exemplo são as antenas do tipo *patch*, que irradiam um campo elétrico sempre na mesma direção.
  - Polarização vertical ( $E_1 = 0$ ): Nesse caso há apenas a componente vertical, enquanto a onda se propaga o campo elétrico sempre aponta para a vertical (perpendicular ao solo).
  - Polarização horizontal ( $E_2 = 0$ ): Não há componente vertical, apenas horizontal. O campo elétrico sempre aponta para a horizontal (paralelo ao solo).
  - Polarização inclinada ( $\phi = 0$ ): Para esse caso, é necessário que a componente vertical e horizontal estejam em fase.
- Polarização circular: A direção do vetor campo elétrico é circular à medida que a onda se propaga. Para que esse tipo de polarização ocorra, é necessário que duas condições sejam simultaneamente atendidas, sendo elas:
  - Componentes com mesma amplitude, ou seja,  $E_1 = E_2$
  - Componentes em quadratura de fase, ou seja,  $\phi = \pm 90^\circ$

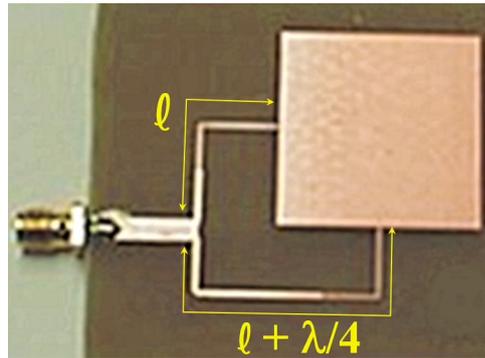
Se  $\phi = -90^\circ$ , têm-se a polarização circular direita (RHCP) e se  $\phi = +90^\circ$ , têm-se a polarização circular esquerda (LHCP), sendo assim, o sinal se propaga na direção do eixo e o campo elétrico gira em torno dele de acordo com a Figura 14.



Fonte: (ROBB, 2017)

Há alguns exemplos de antenas com polarização circular, entre elas uma antena *patch* que pode ser vista na Figura 15. Ela possui duas alimentações, sendo uma de tamanho  $l$  e outra de tamanho  $l + \lambda/4$ , conseqüentemente o sinal chega na placa  $90^\circ$  defasado e por utilizar um divisor que envia potências iguais para ambas as alimentações, tem-se amplitudes iguais.

Figura 15 – Antena *patch* com polarização circular

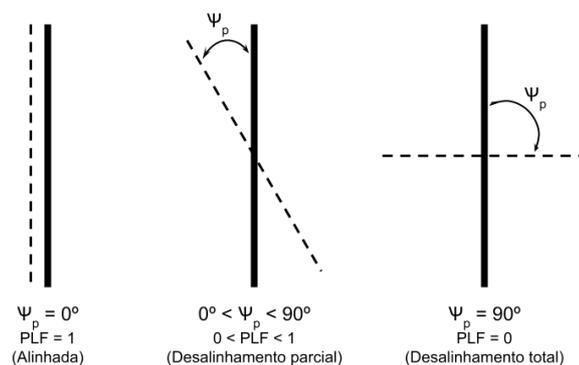


Fonte: (JUNIOR, 2019)

- *Polarization Matching Factor* (PMF): O PMF ou também conhecido como *Polarization Loss Factor* (PLF), que é uma grandeza que mede quanto de sinal foi perdido por consequência do desalinhamento de polarização, pois nem sempre a polarização da antena receptora é igual à da onda recebida, causando assim esse desalinhamento. Esse fator pode ser calculado através da Equação 2.15, onde  $\psi_p$  é o ângulo formado entre a direção de polarização da onda recebida e da antena receptora (JUNIOR, 2019), esse ângulo pode ser visto na Figura 16.

$$PLF = \cos^2 \psi_p \quad (2.15)$$

Figura 16 – Ângulos da perda de polarização



Fonte: Adaptado de (BALANIS, 1996)

PLF é usualmente utilizado em decibéis, calculado através da Equação 2.16.

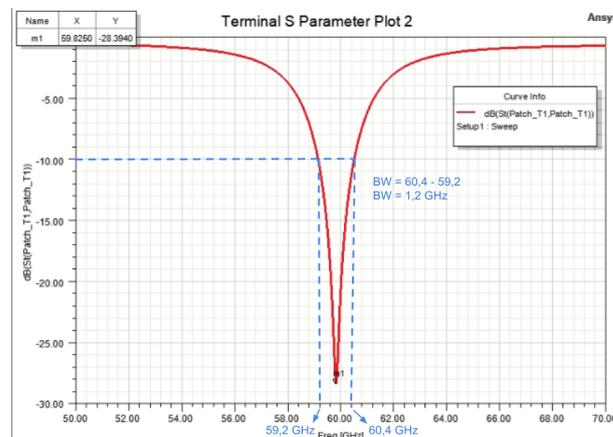
$$PLF_{dB} = 10 \log PLF \quad (2.16)$$

#### 2.1.1.4.2 Largura de banda

Largura de banda é a faixa de frequência em que a antena opera corretamente dentro do limiar desejado. No caso das antenas planares, normalmente a largura de banda é estreita, o que corresponde a uma menor capacidade de transmitir e receber sinais de diferentes frequências (JUNIOR, 2019).

Na Figura 17 é possível ver como é feito o cálculo da largura de banda. Considerando um limiar de  $S_{11} = -10dB$ , a faixa de frequência vai de 59,2 GHz até 60,4 GHz, ocasionando em uma largura de banda de 1,2 GHz.

Figura 17 – Largura de banda para  $S_{11} = -10dB$



Fonte: Elaborado pela autora

#### 2.1.1.4.3 Diagrama de radiação

O diagrama de radiação é uma representação gráfica do comportamento da radiação eletromagnética da antena. Através dele é possível saber se a antena está radiando da forma prevista, com o ganho e diretividade determinado em projeto. Os diagramas de radiação de antenas *patch* em sua maioria são com direção de máxima radiação perpendicular ao plano da placa radiante, assim como mostra o exemplo da Figura 18.

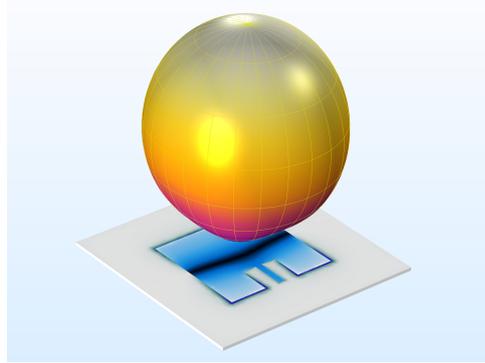
#### 2.1.1.4.4 Reflexão

O coeficiente de reflexão ( $\Gamma$ ), *Voltage Standing Wave Ratio* (VSWR) e a perda de retorno estão relacionados entre si, pois têm relação com a reflexão do sinal.

O coeficiente de reflexão é a razão entre a tensão refletida ( $V_{ref}$ ), pela tensão incidente ( $V_{inc}$ ), conforme Equação 2.17.

$$\Gamma = \frac{V_{ref}}{V_{inc}} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2.17)$$

Figura 18 – Diagrama de radiação comum em antenas *patches*



Fonte: (MULTIPHYSICS, 2022)

Se o *patch* e a linha de transmissão não estão casados, ou seja, não tem a mesma impedância, o **VSWR** é um valor alto, já que o mesmo varia de 1 a  $\infty$ , sendo 1 para um sinal sem reflexão e  $\infty$  para um sinal totalmente refletido, portanto, a antena não recebeu nada transmitido pela linha de microfitas (JUNIOR, 2019).

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{|V_{inc}| + |V_{ref}|}{|V_{inc}| - |V_{ref}|} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.18)$$

A perda de retorno é o negativo do coeficiente de reflexão em escala logarítmica, sendo ele a razão entre a potência incidente e a potência refletida. Como a perda de retorno é a atenuação imposta na onda refletida e não é desejado que haja reflexão, seu valor ideal é  $\infty$ . Portanto, se  $S_{11} = 0dB$ , toda potência transmitida foi refletida, mas se  $S_{11} = -10dB$ , tem-se 10% de potência refletida e 90% de potência radiada (JUNIOR, 2019).

$$ret.loss = 10\log\left(\frac{P_{inc}}{P_{ref}}\right) = -20\log|\Gamma| \quad [dB] \quad (2.19)$$

#### 2.1.1.5 Antenas em ondas milimétricas

A propagação do sinal em ondas milimétricas sofre atenuações atmosféricas significativas em razão das perdas de percurso existentes pela absorção de sua energia eletromagnética pelo oxigênio. Torna-se então, mais satisfatório os resultados para transmissões em curtas distâncias e aplicações com linha de visada (GOMES, 2017), podendo ser utilizada, por exemplo, em estações de acoplamento sem fio para *smartphones*, *laptops* e redes de área pessoal sem fio (GU et al., 2015).

São normalmente utilizados conjuntos de antenas *patch* para essa frequência, pois essa é uma das melhores formas de aumentar o ganho por elemento e diretividade dessas antenas (GOMES, 2017). Além disso, antenas de alta frequência tem seu tamanho reduzido em virtude de seu pequeno comprimento de onda, portanto sua concepção e caracterização acaba sendo mais complexa. Segundo Gomes (2017), as antenas mais apropriadas para a

frequência de 60 GHz, são as antenas planares com radiação na direção perpendicular ao plano do substrato (*back-fire*), assim como é possível realizar com as antenas *patch* acima citadas.

## 3 DESENVOLVIMENTO

### 3.1 Simulação

A simulação desenvolvida e disponibilizada por [Penchel \(2022\)](#) para a elaboração deste trabalho, foi realizada utilizando o *software High Frequency Structure Simulator (HFSS)*, que usa *Finite-Element Method (FEM)* para a realização de simulações. Essa antena opera na frequência de 60 GHz, possui reentrâncias para o casamento de impedâncias e não utiliza a *CPW*, para que possa ser analisada sem a interferência da ponta de prova. O simulador foi acessado remotamente pelo *software AnyDesk*, pois foi disponibilizada a utilização de sua licença para o andamento do projeto do [CNPq](#).

O intuito é que os cálculos necessários para projetar uma antena de 60 GHz apresentados no [Capítulo 2](#) estejam condizentes aos parâmetros utilizados na simulação do [Penchel \(2022\)](#). Foi analisado o comportamento da antena baseado no gráfico da perda de retorno ( $S_{11}$ ) e no diagrama de radiação.

#### 3.1.1 Análise

O *software* tem uma vasta diversidade de aplicações e para esse fim, possui uma área de desenho de projetos, de acordo com suas coordenadas espaciais, onde é possível criar formas 2D ou 3D e colocar suas especificações.

Após receber o projeto de simulação, foi investigada a influência dos parâmetros geométricos da antena em suas características de radiação, os mesmos foram registrados para utilização neste trabalho, visando aplicá-los às equações. A partir desses cálculos, foi gerada uma nova simulação para comparação de resultados.

Com os parâmetros em mãos e algumas alterações, retirando, por exemplo, a variação do tamanho do *gap* para que a simulação não fosse tão longa, foi possível obter os resultados apresentados a seguir.

Os parâmetros da antena simulada, necessários para os cálculos, podem ser vistos na [Tabela 2](#).

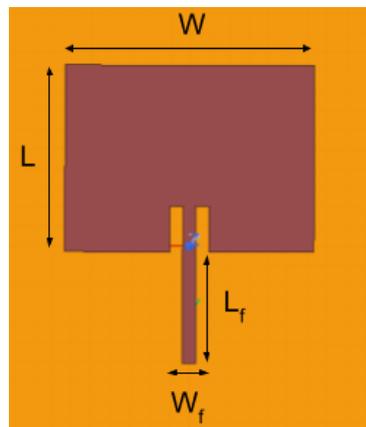
Na [Figura 19](#), é possível ver a antena *patch* com suas reentrâncias calculadas a fim de obter um melhor casamento de impedâncias. A membrana utilizada nessa simulação como substrato, é uma membrana em teste e desenvolvimento pelo Laboratório de Microeletrônica da Universidade de São Paulo ([LME-USP](#)).

Analisando o gráfico da perda de retorno ([Figura 20](#)), é possível notar que a antena opera em uma banda de 1,2GHz, mais precisamente em frequências próximas a 60 GHz, o

Tabela 2 – Parâmetros retirados do projeto de simulação

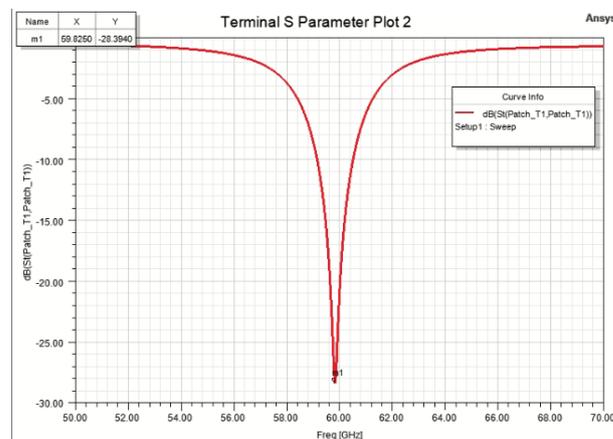
Informação	Valor
Largura ( $W$ )	1,273mm
Comprimento ( $L$ )	0,959mm
Espessura ( $h$ )	50 $\mu$ m
Permissividade ( $\epsilon_r$ )	6,7
Tangente de perdas ( $tg(\delta)$ )	0,015

Fonte: Adaptado de (PENCHEL, 2022)

Figura 19 – *Design* da antena *patch* com reentrâncias

Fonte: Adaptado de (PENCHEL, 2022)

que era o resultado esperado, já que é a frequência de ressonância. Também é possível notar que o valor mínimo de  $S_{11}$  é aproximadamente -28,4dB, indicando um bom funcionamento, visto que o padrão comumente admitido é abaixo de -10dB. Portanto, as reentrâncias foram fundamentais para o casamento de impedâncias e 99,86% do sinal transmitido é irradiado, tendo pouca perda por reflexão.

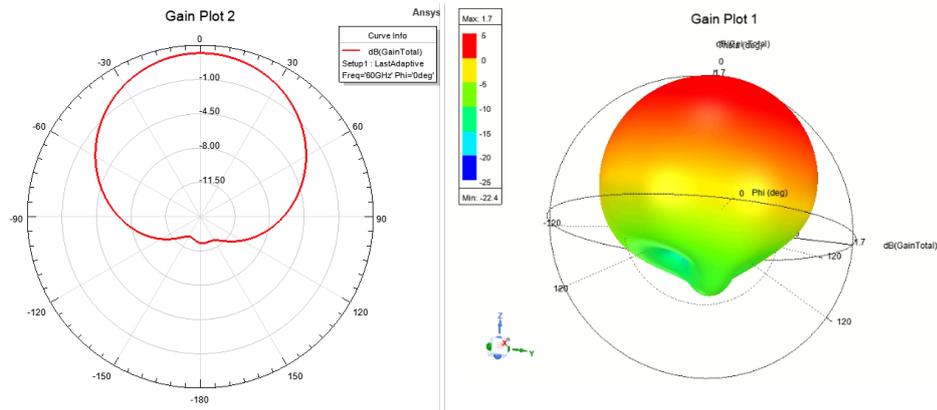
Figura 20 – Gráfico da perda de retorno ( $S_{11}$ )

Fonte: (PENCHEL, 2022)

Além dos resultados do coeficiente de reflexão, foram analisados os resultados simulados do diagrama de radiação 2D e 3D da antena. Como apresentado nas Figura 21a e Figura 21b, a placa *patch* cumpre o objetivo da direção de máxima radiação ser acima do substrato e portanto, tem uma boa distribuição na radiação perpendicular ao plano do *patch*. Por ser uma antena pequena, o ganho é inferior aos das antenas com grandes dimensões.

Figura 21 – Diagrama de radiação

(a) Diagrama de radiação em 2D (b) Diagrama de radiação em 3D



Fonte: Adaptado de (PENCHEL, 2022)

- Cálculos para o dimensionamento do *patch*

Utilizando as equações subseção 2.1.1 foram obtidos os seguintes resultados:

$$W = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 60 \times 10^9} \times \sqrt{\frac{2}{6,7 + 1}} \approx 1,274mm$$

$$\epsilon_{ref} = \frac{6,7 + 1}{2} + \frac{6,7 - 1}{2} \times \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12 \times 50 \times 10^{-6}}{1,274 \times 10^{-3}}}} \approx 6,2$$

$$\Delta L = 0,412 \times 50 \times 10^{-6} \times \frac{(6,2 + 0,3) \times \left(\frac{1,274 \times 10^{-3}}{50 \times 10^{-6}} + 0,264\right)}{(6,2 - 0,258) \times \left(\frac{1,274 \times 10^{-3}}{50 \times 10^{-6}} + 0,8\right)} \approx 22,07\mu m$$

$$L_{ef} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 60 \times 10^9 \sqrt{6,2}} \approx 1mm$$

$$L = 1 \times 10^{-3} - 2 \times 22,07 \times 10^{-6} \approx 0,956mm$$

Portanto, os valores foram bem aproximados aos do simulado pelo [Penchel \(2022\)](#), só não são idênticos por causa das otimizações feitas por ele para obter melhores resultados.

- Cálculos para o dimensionamento da linha de microfita

Utilizando as equações [subseção 2.1.1.1](#) foram obtidos os seguintes resultados:

$$A = \frac{50}{60} \sqrt{\frac{6,7 + 1}{2}} + \frac{6,7 - 1}{6,7 + 1} \left( 0,23 + \frac{0,11}{6,7} \right) \approx 1,82$$

$$B = \frac{377\pi}{2 \times 50\sqrt{6,7}} \approx 4,57$$

Para  $\frac{W_f}{h} \leq 2$ :

$$\frac{W_f}{h} = \frac{8e^{1,82}}{e^{2 \times 1,82 - 2}} \approx 1,37;$$

Para  $\frac{W_f}{h} > 2$ :

$$\frac{W_f}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ 4,57 - 1 - \ln(2 \times 4,57 - 1) + \frac{6,7 - 1}{2 \times 6,7} \left[ \ln(4,57 - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{6,7} \right] \right\} \approx 1,36$$

Por padrão, a impedância característica de uma linha de transmissão é de  $50\Omega$ , por isso,  $Z_0 = 50\Omega$ .

Utilizou-se então o valor da equação válida, onde  $\frac{W_f}{h} = 1,37$ , portanto  $W_f = 68,5\mu m$ . Bem próximo também ao valor utilizado na simulação.

- Comparação dos resultados

Com as otimizações feitas pelo [Penchel \(2022\)](#) para melhor adaptar a antena simulada, alguns parâmetros não coincidiram com os valores calculados, mas ficaram semelhantes. A [Tabela 3](#) mostra a pequena divergência entre esses dados.

Tabela 3 – Comparação dos valores calculados com os valores simulados

Informação	Simulado	Calculado
Largura do <i>patch</i> (W)	1,273mm	1,274mm
Comprimento do <i>patch</i> (L)	0,959mm	0,956mm
Largura da linha ( $W_f$ )	67 $\mu$	68,5 $\mu m$
Comprimento da linha ( $L_f$ )	0,575mm	-

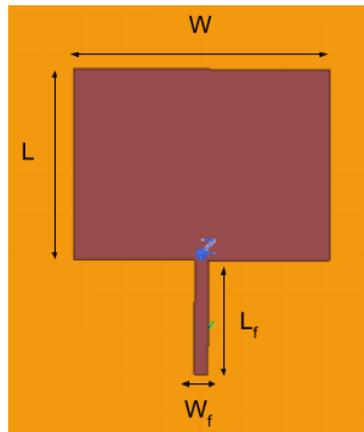
Fonte: Elaborado pela autora

### 3.1.2 Testes

O experimento realizado baseou-se em fazer os cálculos descritos neste trabalho com o objetivo de retirar as reentrâncias da antena *patch* do Penchel (2022), analisar e comparar os resultados das duas antenas.

Um dos primeiros passos foi alterar os parâmetros da antena, colocando exatamente os valores encontrados na subseção 3.1.1 e retirar os *gaps* do *design* da antena.

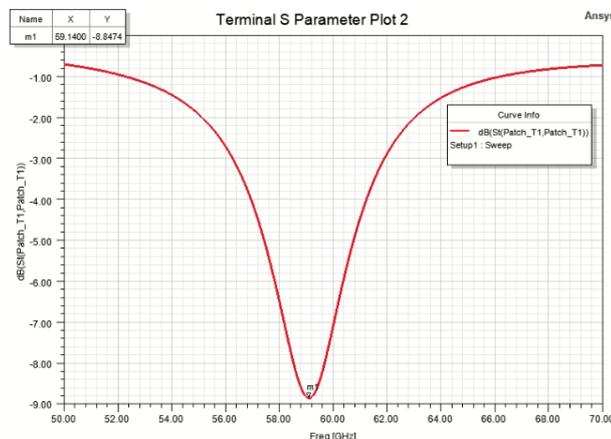
Figura 22 – *Design* da antena *patch*



Fonte: Elaborado pela autora

Foram utilizadas a largura calculada da linha de microfitas ( $W_f = 68,5\mu m$ ) e comprimento utilizado na simulação do Penchel (2022)  $L_f = 0,575mm$ , tendo em vista que para a análise deste trabalho este não era um parâmetro relevante, pois ele influencia apenas na fase da antena.

Figura 23 – Gráfico da perda de retorno ( $S_{11}$ )



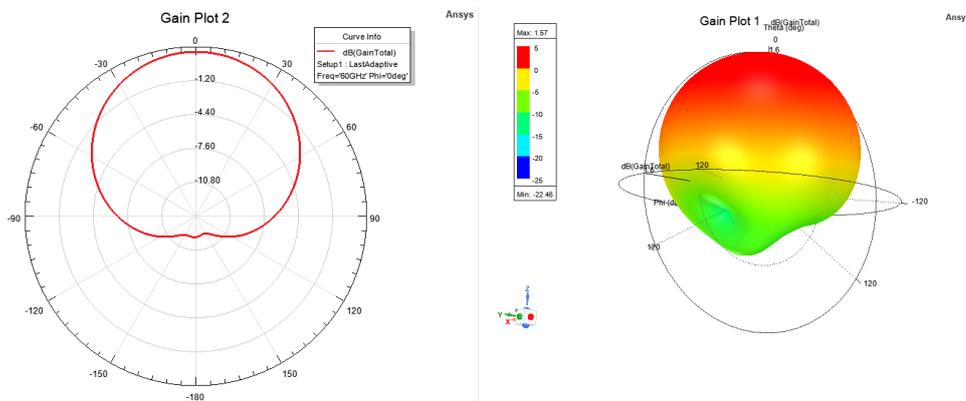
Fonte: Elaborado pela autora

Apesar do  $S_{11}$  ter ficado acima dos -10dB, a antena ainda apresenta 87% de eficiência de casamento, sendo uma eficiência aceita na bibliografia e justificada por não ter tantas otimizações quanto a antena do Penchel (2022).

Figura 24 – Diagrama de radiação

(a) Diagrama de radiação em 2D

(b) Diagrama de radiação em 3D



Fonte: Elaborado pela autora

Assim como o diagrama de radiação visto anteriormente (Figura 21), no diagrama da Figura 24, a antena radia em direção perpendicular ao plano do dielétrico, tendo apenas um pequeno lobo posterior abaixo dele, tornando-a mais eficiente para aplicações em ondas milimétricas.

## 4 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo detalhado dos fundamentos das antenas impressas do tipo *patch* e descreveu como é elaborado o projeto de uma antena *patch* com operação na frequência de 60 GHz a partir de cálculos e análises de simulação pelo software Ansys HFSS. Foram apresentados os principais tipos de alimentação de antenas impressas, como a microfita; as técnicas mais utilizadas para alimentação; técnicas como a de utilização de reentrâncias para o casamento de impedância; os substratos mais comuns e outros parâmetros importantes para o projeto de antenas como um todo, com foco nas antenas *patch*. Foi projetada e simulada uma antena *patch* retangular com alimentação via linha de microfita, na frequência de 60 GHz, com um  $S_{11} = -8,8dB$ , obtendo então uma eficiência de casamento de aproximadamente 87%.

Notou-se que a antena disponibilizada pelo Penchel (2022), apresenta um bom casamento de impedância na frequência de ressonância, pelas otimizações no tamanho do *patch* e também pelas reentrâncias bem calculadas para essa finalidade.

Apesar da pouca diferença entre o tamanho da antena simulada com reentrâncias para a antena sem reentrâncias, foi possível notar que isto afetou bastante o resultado do gráfico da perda de retorno, fazendo com que a eficiência do casamento da antena caísse 12,86%. Então, concluí-se que uma boa otimização e um bom casamento de impedâncias influenciam muito nos resultados, principalmente considerando o valor de  $S_{11}$ , que é um gráfico fundamental para avaliar o desempenho de antenas.

Como o resultado do gráfico de perda de retorno não foi tão satisfatório quanto o esperado, propõe-se como trabalho futuro levantar as possíveis causas associadas às perdas da antena na simulação. Comparando também, o desempenho da antena do Penchel (2022) ao de uma antena utilizando como técnica de casamento de impedância o transformador de um quarto de onda para esta frequência. Avançar nas etapas de simulação e conseguir encaminhar a antena para a sua concepção e caracterização em laboratório. Podendo assim, comparar os resultados calculados conforme descrito neste trabalho, simulados com as otimizações necessárias e os medidos, para então incentivar novas pesquisas sobre antenas *patch* nessa faixa de frequência.



# REFERÊNCIAS

BALANIS, C. A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. [S.l.]: Wiley; 2nd edition, 1996. ISBN 9780471592686. Citado na página 33.

CARLETI, M.; ANTONIO, J.; RIBEIRO, J. Antenas impressas baseadas no tapete de sierpinski. In: . [s.n.], 2014. Disponível em: <[https://www.sbmo.org.br/anais\\_momag/momag2014/papers/p809-carleti.pdf](https://www.sbmo.org.br/anais_momag/momag2014/papers/p809-carleti.pdf)>. Citado na página 23.

CHAVALI, M. S.; NIKOLOVA, M. P. Metal oxide nanoparticles and their applications in nanotechnology. *SN Applied Sciences*, Springer Nature, v. 1, 6 2019. ISSN 25233971. Disponível em: <<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s42452-019-0592-3.pdf>>. Citado na página 25.

DIOGO, M. J. G. M. *Antena Wifi 2.45Ghz Com Estruturas EBG (Electromagnetic Bandgap)*. 2011. Disponível em: <<https://paginas.fe.up.pt/~ee98172/antenasmicrostrip.html>>. Acesso em: 29 July 2022. Citado na página 27.

GERALDO, F. D. C. *Antenas de Microlinha Multibanda*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", 2018. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/156793/000902299.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 29.

GOMES, L. A. G. *Projeto de antenas e caracterização do substrato de nanofios (MnM) para aplicações em ondas milimétricas*. 0-94 p. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2017. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3140/tde-06042018-092811/pt-br.php>>. Citado 3 vezes nas páginas 21, 23 e 35.

GU, X. et al. A multilayer organic package with four integrated 60ghz antennas enabling broadside and end-fire radiation for portable communication devices. In: . Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2015. v. 2015-July, p. 1005–1009. ISBN 9781479986095. ISSN 05695503. Referência para conteúdo base e motivação. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee-org.ez130.periodicos.capes.gov.br/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7159718>>. Citado na página 35.

HIRANO, T. et al. 60 ghz on-chip patch antenna integrated in a 0.18- $\mu\text{m}$  cmos technology. *2012 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, p. 62–65, 2012. Citado na página 29.

INTEGRITY iCD D. *iCD Coplanar Waveguide (CPW) Planner*. 2021. Disponível em: <<https://www.icd.com.au/CPW.html>>. Acesso em: 29 July 2022. Citado na página 28.

JUNIOR, W. P. C. *Canal YouTube Professor Walter - UFSC*. 2019. Disponível em: <<https://www.youtube.com/channel/UCnkiCNVh48RFy0FihlURFYA>>. Acesso em: 09 mar 2022. Citado 10 vezes nas páginas 23, 25, 27, 28, 30, 31, 32, 33, 34 e 35.

LIRA, R. V. de A. *Obtenção de parâmetros construtivos para antenas de microfita utilizando o Método Taguchi de otimização*. Dissertação (Mestrado) — Universidade

Federal do Rio Grande do Norte, 2017. Disponível em: <[https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/24836/1/RuannVictorDeAndradeLira\\_DISSERT.pdf](https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/24836/1/RuannVictorDeAndradeLira_DISSERT.pdf)>. Citado na página 24.

Lé, J. E. G. *Automação da Câmara Anecoica do Centro de Ondas Milimétricas da EPUSP*. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2020. Disponível em: <<http://lattes.cnpq.br/3261509947646154>>. Citado 2 vezes nas páginas 49 e 50.

MULTIPHYSICS, C. *Microstrip Patch Antenna*. 2022. Disponível em: <<https://www.comsol.fr/model/microstrip-patch-antenna-11742>>. Acesso em: 29 July 2022. Citado na página 35.

OLIVEIRA, E. E. C. de. *Antenas de microfita com patch quase-fractal para aplicações em Redes WPAN/WLAN*. Dissertação (Mestrado) — UFRN - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2008. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/15213/1/ElderECO.pdf>>. Citado na página 23.

PENCHEL, R. A. *Currículo Lattes*. 2022. Disponível em: <<http://lattes.cnpq.br/3412676669640264>>. Acesso em: 29 July 2022. Citado 7 vezes nas páginas 21, 37, 38, 39, 40, 41 e 43.

PIRES, D. A.; SILVA, H. J. D. Desenvolvimento de antenas impressas em substrato de fenolite. In: . [s.n.], 2017. Disponível em: <<https://www.sbrt.org.br/sbrt2017/anais/1570362063.pdf>>. Citado na página 23.

ROBB, G. *Circularly Polarized Antennas Explained, Without The Math*. 2017. Disponível em: <<https://antennatestlab.com/wp-content/uploads/2017/09/CP-Explained-Without-Math.pdf>>. Acesso em: 29 July 2022. Citado na página 32.

SILVA, H. A. M. *Análise de Antenas de Microfita Bioinspiradas e Fractais*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2017. Disponível em: <[https://docplayer.com.br/63840572-Analise-de-antenas-de-microfita-bioinspiradas-e-fractais.html#show\\_full\\_text](https://docplayer.com.br/63840572-Analise-de-antenas-de-microfita-bioinspiradas-e-fractais.html#show_full_text)>. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 31.

TALK, E. *Microstrip Patch Antenna Calculator*. 2011. Disponível em: <<https://www.emtalk.com/mpacalc.php>>. Acesso em: 11 mar 2022. Citado 3 vezes nas páginas 24, 26 e 30.

WANG, D.; CAHOON, N. 60ghz high speed wireless link - technology and design challenges. In: . [s.n.], 2008. p. 1343–1347. ISBN 9781424421855. Interessante para o desenvolvimento do TCC. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee-org.ez130.periodicos.capes.gov.br/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4734799>>. Citado na página 21.

# Anexos



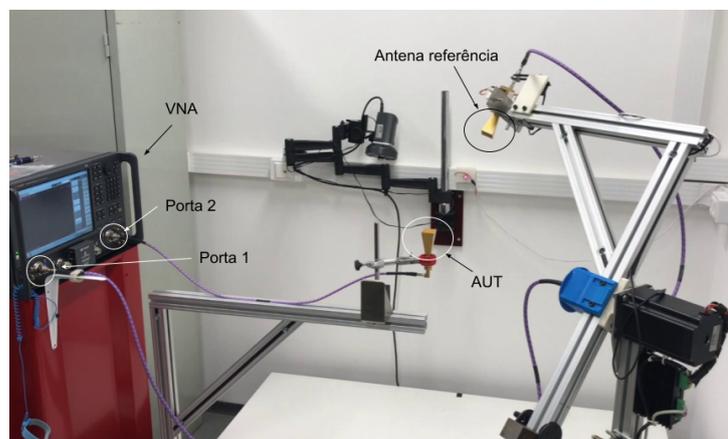
# ANEXO A – MEDIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE ANTENAS EM ONDAS MILIMÉTRICAS

O objetivo deste trabalho inicialmente era simular uma antena na frequência de 60 GHz e encaminhá-la ao laboratório da USP para ser fabricada e realizar as medições para a caracterização da antena, mas devido a limitação do tempo de execução do trabalho, esse propósito não pôde ser alcançado. Portanto, com base em um vídeo disponibilizado por Lé (2020), é possível entender como as medições de antenas nessa frequência são feitas na USP.

Segundo o Lé (2020), as medições realizadas no Centro de Ondas Milimétricas da Escola Politécnica da USP (EPUSP), são executadas da seguinte forma: As medições são feitas por um sistema automatizado, visto na Figura 25, que é colocado dentro de uma câmara anecoica. A potência vinda da porta 1 do VNA passa por uma junta rotativa para permitir a rotação do motor de *Azimuth*, depois por uma segunda junta rotativa que permite o movimento do motor de elevação, por um terceiro motor, chamado de motor de polarização e por último por um multiplicador.

O motor de polarização é utilizado para guiar a polarização da antena de referência e o multiplicador tem uma saída entre 50 GHz e 70 GHz. A antena *patch* é posicionada em um suporte de espuma e é conectada à ponta de prova, que por sua vez, está conectada ao receptor da porta 2 do VNA. Os motores apresentados na Figura 26, são controlados por microcontroladores comandados por um *software*.

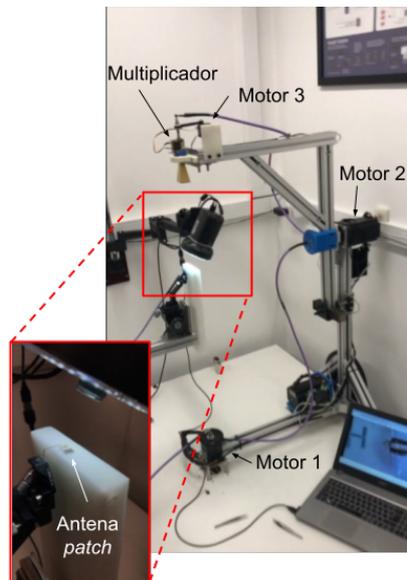
Figura 25 – Configuração do sistema automatizado para câmara anecoica



Fonte: Adaptado de (Lé, 2020)

Em um primeiro momento, é utilizada como *Antenna Under Test (AUT)*, uma antena do tipo *horn* padrão. Após isso, é colocada a antena *patch* a ser testada de fato. Pelo tamanho da antena, é necessário um microscópio para fazer o posicionamento da ponta de prova no *pad* do *patch*.

Figura 26 – Posicionamento da ponta de prova no *patch*



Fonte: Adaptado de (Lé, 2020)

Os braços vistos na Figura 25 e Figura 26 são articulados e fazem com que a antena de referência gire em torno da antena *patch*. Simultaneamente os resultados são traçados pelo *software* no computador, tais como diagrama de radiação e o gráfico de perda de retorno.