



INSTITUTO FEDERAL  
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
Bahia

Campus  
Vitória da Conquista



# COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA ELÉTRICA - **COEEL**

## PROJETO FINAL DE CURSO - PFC

Antenas aprimoradas para tecnologia 5G na faixa de 3,5GHz: um estudo sobre o uso de cabos coaxiais como elemento estrutural

**FILIPPE CARVALHO DE ANDRADE**

Vitória da Conquista-BA  
08 de Dezembro de 2023

**FILIPE CARVALHO DE ANDRADE**

**Antenas aprimoradas para tecnologia 5G na faixa de 3,5GHz: um estudo sobre o uso de cabos coaxiais como elemento estrutural**

Projeto Final de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, *campus* Vitória da Conquista, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

**Orientador:** Dra. Ana Karine Dias Caires Brandão

**Coorientador:** Dr. Kenedy Marconi Geraldo dos Santos

**Coorientadora:** Ma. Polyane Alves Santos

Vitória da Conquista-BA  
08 de Dezembro de 2023

A554a Andrade, Filipe Carvalho de

Antenas aprimoradas para tecnologia 5G na faixa de 3,5 GHz: um estudo sobre o uso de cabos coaxiais. / Filipe Carvalho de Andrade. – Vitória da Conquista-BA : IFBA, 2023.

78 f.il.: color.

Orientador: Prof. Dra. Ana Karine Dias Caires Brandão

Trabalho Conclusão de Curso (Graduação) em Engenharia Elétrica - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia - *Campus* de Vitória da Conquista-BA, 2023.

1. Antenas 5G. 2. CST Studio Suite. 3. Análise de Redes Vetoriais.  
4. Cabos Coaxiais. I. Brandão, Ana Karine Dias Caires. II. Título.

CDD: 621.37


## FOLHA DE APROVAÇÃO DO PROJETO FINAL DE CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

### ANTENAS APRIMORADAS PARA TECNOLOGIA 5G NA FAIXA DE 3,5GHZ: UM ESTUDO SOBRE O USO DE CABOS COAXIAIS COMO ELEMENTO ESTRUTURAL

**FILIPE CARVALHO DE ANDRADE**


A presente Monografia de Projeto Final de Curso (PFC), apresentada em sessão realizada em **08 de Dezembro de 2023**, foi avaliada como adequada para a obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista, julgada **APROVADA** em sua forma final pela Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, Campus Vitória da Conquista.

#### BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente  
 ANA KARINE DIAS CAIRES BRANDAO  
Data: 20/12/2023 20:17:59-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Prof. Dra. Ana Karine Dias Caires Brandão (Orientadora)  
IFBA, *campus* Vitória da Conquista

Documento assinado digitalmente  
 KENEDY MARCONI GERALDO DOS SANTOS  
Data: 20/12/2023 21:49:36-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Kenedy Marconi Geraldo dos Santos (Coorientador)  
IFBA, *campus* Vitória da Conquista

Documento assinado digitalmente  
 POLYANE ALVES SANTOS  
Data: 20/12/2023 20:50:56-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Prof. Ma. Polyane Alves Santos (Coorientadora)  
IFBA, *campus* Vitória da Conquista

Assinado por: **Tagleorge Marques Silveira**  
Num. de Identificação: 18028148  
Data: 2023.12.21 19:20:39+00'00'

---

Prof. Dr. Tagleorge Marques Silveira  
Universidade de Aveiro

Documento assinado digitalmente  
 JUAN LIEBER MARIN  
Data: 21/12/2023 10:02:35-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Juan Lieber Marin  
IFBA, *campus* Vitória da Conquista

*"The only way of discovering the limits of the possible is to venture a little way past them into the impossible" [Arthur C. Clarke]*

# AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, verdadeiros pilares que sempre me sustentaram. Nos momentos de incerteza, transmitindo os valores do trabalho árduo, perseverança e honestidade. Seu apoio constante foi um farol em meu caminho, especialmente quando meus sonhos pareciam inatingíveis.

Expresso minha gratidão aos amigos que se tornaram minha segunda família. Edson, Estefani, Mikelly, Breenda e Vinícius, vocês foram mais do que amigos.

Agradeço à Giselle Francine, Fran, pela colaboração e companheirismo, elementos fundamentais para o êxito desta pesquisa. Este trabalho, desenvolvido em conjunto, não teria alcançado o sucesso sem o comprometimento e apoio indispensáveis proporcionados por ela.

À minha orientadora Ana Karine e aos coorientadores Polyane e Kenedy, expresso minha sincera gratidão. O suporte e a orientação foram fundamentais para a elaboração deste projeto, e sou profundamente grato pela oportunidade de aprender com profissionais tão experientes.

À minha tutora, "Mãe" Jose, do PET Engenharias, agradeço por ser mais do que uma orientadora; tornou-se uma grande amiga ao longo desses anos. Suas orientações e conselhos foram inestimáveis para o meu crescimento pessoal e acadêmico.

Por fim, agradeço ao IFBA, uma instituição que me proporcionou um ensino de qualidade e me acolheu com professores excepcionais, que foram meus mestres e inspirações ao longo da minha formação. Agradeço a todos que colaboraram, de alguma forma, para a realização deste trabalho, pois cada gesto de esforço e apoio foi fundamental para este sucesso.

# RESUMO

Este estudo tem como objetivo analisar as antenas 5G usando modelagem matemática e o software CST Studio Suite. O foco é melhorar a eficiência na transmissão de dados nessa tecnologia, considerando a frequência de 3,5 GHz como alvo. O estudo também explora o uso de cabos coaxiais como parte da estrutura das antenas e o efeito de aberturas circulares nas suas propriedades. Realizou-se uma análise detalhada de redes vetoriais, considerando coeficiente de reflexão, perda de retorno, SWR, VSWR, impedância e admitância, com especial atenção à densidade de corrente. A CST Studio Suite é essencial na modelagem e simulação de antenas, destacando a aplicação prática dos conceitos teóricos. A metodologia compreende duas fases experimentais: uma explorando diferentes aberturas e outra focada em um experimento selecionado. Os resultados englobam Parâmetro S, VSWR, Carta de Smith, Diagrama de Irradiação, Axial Ratio e a relação entre comprimento, frequência e VSWR. A densidade de corrente é avaliada em ambos os contextos. As considerações finais ressaltam a validação da antena em termos de polarização e eficiência, mas indicam a necessidade de melhorar o ganho e a impedância da antena para a tecnologia 5G. Para trabalhos futuros, sugerimos o aprimoramento da pesquisa em antenas 5G, por meio da alteração de parâmetros ou das ferramentas matemáticas para análise.

**Palavras-chave:** Antenas 5G, CST Studio Suite, Análise de Redes Vetoriais, Cabos Coaxiais

# ABSTRACT

This study aims to analyze the 5G antennas using mathematical modeling and the CST Studio Suite software. The focus is to improve the efficiency in data transmission in this technology, considering the frequency of 3.5 GHz as the target. The study also explores the use of coaxial cables as part of the structure of the antennas and the effect of circular openings on their properties. A detailed analysis of vector networks was performed, considering reflection coefficient, return loss, SWR, VSWR, impedance and admittance, with special attention to the current density. The CST Studio Suite is essential in the modeling and simulation of antennas, highlighting the practical application of the theoretical concepts. The methodology comprises two experimental phases: one exploring different openings and another focused on a selected experiment. The results encompass S Parameter, VSWR, Smith Chart, Radiation Pattern, Axial Ratio and the relationship between length, frequency and VSWR. The current density is evaluated in both contexts. The final considerations emphasize the validation of the antenna in terms of polarization and efficiency, but indicate the need to improve the gain and impedance of the antenna for the 5G technology. For future work, we suggest the improvement of the research on 5G antennas, by changing parameters or the mathematical tools for analysis.

**Keywords:** 5G Antennas, CST Studio Suite, Vector Network Analysis, Coaxial Cables

# Lista de Figuras

2.1	Avanço da comunicação móvel . . . . .	6
2.2	Gráfico do Parâmetro S de uma Antena em Função da Frequência . .	11
2.3	Carta de Smith no CST STUDIO . . . . .	17
2.4	Diagrama de Irradiação 2D uma Antena . . . . .	19
2.5	Gráficos do <i>axial ratio</i> no CST STUDIO - Polar e 3D . . . . .	20
2.6	Ferramentas disponíveis no CST STUDIO . . . . .	22
2.7	Exemplificação do método dos elementos finitos . . . . .	23
3.1	Cabo Coaxial modelado no CST STUDIO . . . . .	30
3.2	Elementos estruturais do Cabo Coaxial no CST STUDIO . . . . .	30
3.3	<i>Slots</i> gerados no CST STUDIO . . . . .	31
3.4	Estrutura em Zinco gerada no CST STUDIO . . . . .	32
4.1	Distância entre as duas aberturas . . . . .	35
4.2	Distância entre as três aberturas . . . . .	36
4.3	Distância entre as cinco aberturas . . . . .	37
4.4	Modelo do cabo coaxial com cinco <i>slots</i> . . . . .	39
4.5	Parâmetro S . . . . .	40
4.6	Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) . . . . .	41
4.7	Carta de Smith - Casamento de Impedância . . . . .	42
4.8	Diagrama de Irradiação - 2D . . . . .	43
4.9	Diagrama de Irradiação em três dimensões . . . . .	44
4.10	Gráfico referente ao Axial Ratio - Retangular . . . . .	45
4.11	Gráficos do Axial Ratio no CST STUDIO - Polar e 3D . . . . .	46
4.12	Comprimento vs Frequência vs VSWR - 120° e 240° . . . . .	47
4.13	Comprimento do Cabo Coaxial vs Frequência / VSWR . . . . .	47
4.14	Regressão Linear: Comprimento vs Frequência / VSWR . . . . .	48
4.15	Densidade de Corrente . . . . .	49

# Lista de Tabelas

2.1	Relação entre VRWS, $\Gamma$ e Coeficiente de Reflexão . . . . .	14
3.1	Parâmetros dos materiais utilizados na modelagem . . . . .	29
3.2	Parâmetros do Cabo Coaxial . . . . .	29
4.1	Dados Obtidos para uma Abertura Circular . . . . .	34
4.2	Dados Obtidos para duas Aberturas Circulares . . . . .	35
4.3	Dados Obtidos para três Aberturas Circulares . . . . .	36
4.4	Dados Obtidos para cinco Aberturas Circulares - Variação das Distâncias . . . . .	38
4.5	Dados Obtidos para cinco Aberturas circulares - Variação do Comprimento . . . . .	38

# Glossário: Símbolos e Siglas

Notação	Descrição	Páginas
$B$	Susceptância	15
$E_{max}$	Tensão máxima da Onda Refletida (V)	12
$E_{min}$	Tensão mínima da Onda Refletida (V)	12
$G$	Condutância	15
$P_R$	Potência Refletida (W)	12
$P_i$	Potência Incidente (W)	12
$R$	Resistância	15
$X$	Reatância	15
$Y_L$	Admitância da Carga	15
$Z_L$	Impedância da Carga	15, 17
$Z_c$	Impedância característica	9
$Z_l$	Impedância de base	9
$\Gamma$	Coefficiente de Reflexão	9, 11, 13, 14, 17
$\Omega$	Unidade de Medida de Resistência Elétrica	42, 43, 50, 51, 53
$j$	Unidade imaginária	15, 42
2G	Segunda geração de telefonia móvel	1, 2, 6
3G	Terceira geração de telefonia móvel	1, 2
4G	Quarta geração de telefonia móvel	1, 2

<b>Notação</b>	<b>Descrição</b>	<b>Páginas</b>
5G	Quinta geração de telefonia móvel	vii, viii, 1-9, 12, 28, 33, 38-40, 44, 51, 53, 55
A	Seção transversal do condutor	21, 49
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações	6
c	Interseção y	25, 50
CEM	Compatibilidade Eletromagnética	2
COEEL	<i>Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica do IFBA campus Vitória da Conquista</i>	i
CST	CST Studio Suite	5, 21- 23, 27- 29, 32, 34, 39, 40, 46, 49, 51, 52
d	Porta pela qual a energia é recebida	10
dA	Elemento diferencial de área	21
dB	Decibel	11-13, 19, 20, 33, 34, 36-40, 43-46, 49-51, 53

<b>Notação</b>	<b>Descrição</b>	<b>Páginas</b>
g	Porta pela qual a energia é transmitida	10
GHz	Gigahertz	vii, viii, 4, 6–9, 33, 35, 37, 38, 40, 42, 44, 45, 48, 50– 52, 54, 55
I	Corrente elétrica	15, 21
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers	5
IoT	Internet of Things	6
J	Densidade de corrente	21
m	Inclinação da Reta	25, 50
Mbp/s	Megabits por segundo	1
MEF	Método dos Elementos Finitos	23
MHz	Megahertz	1, 7, 41, 50, 51
mm	Unidade de Medida de Distância	30, 31, 34–38, 40, 48, 49, 51
RL	Parâmetro S	11
S	Parâmetro S	10

<b>Notação</b>	<b>Descrição</b>	<b>Páginas</b>
SWR	Standing Wave Ratio	vii, viii, 11, 12, 39
V	Tensão elétrica	15
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio	vii, viii, 13, 14, 22, 33, 39–43, 46–53
x	Variável Independente	25, 50
y	Variável Dependente de x	25, 50

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivo Geral	3
1.1.1	Objetivos Específicos	3
1.2	Questão de Pesquisa	4
<b>2</b>	<b>Fundamentação Teórica: Antenas 5G, Modelagem Matemática e CST Studio Suite</b>	<b>5</b>
2.1	Antenas e Suas Funcionalidades	5
2.2	Introdução às Antenas para 5G	6
2.3	Faixa de Frequência de 3,5 GHz	7
2.4	Cabos Coaxiais como Elementos Estruturais	8
2.5	Análise de Redes Vetoriais	9
2.5.1	Coeficiente de Reflexão	9
2.5.2	Perda de Retorno	10
2.5.3	Standing Wave Ratio (SWR)	11
2.5.4	Voltage Standing Wave Ratio (VSWR)	13
2.5.5	Impedância e Admitância	14
2.5.6	Carta de Smith	16
2.5.7	Diagrama de Irradiação	18
2.5.8	Axial Ratio	19
2.6	Densidade de Corrente	20
2.7	Introdução ao CST Studio Suite	21
2.8	Modelagem Matemática	23
<b>3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>27</b>
3.1	Revisão Bibliográfica	27
3.2	Descrição da Abordagem Metodológica	28
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>33</b>
4.1	I - Fase experimental	33
4.1.1	Uma Abertura	34

---

4.1.2	Duas Aberturas	34
4.1.3	Três Aberturas	36
4.2	II - Fase do experimento selecionado	37
4.2.1	Cinco Aberturas	37
4.3	Análise dos Resultados	39
4.3.1	Parâmetro S	40
4.3.2	Voltage Standing Wave Ratio (VSWR)	41
4.3.3	Carta de Smith	42
4.3.4	Diagrama de Irradiação	43
4.3.5	Axial Ratio	44
4.3.6	Relação Comprimento, Frequência e VSWR	46
4.3.7	Densidade de Corrente	49
<b>5</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>51</b>
<b>6</b>	<b>Sugestões para Trabalhos Futuros</b>	<b>55</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>57</b>
<b>I</b>	<b>Datasheet Cabo Coaxial</b>	<b>61</b>

# Capítulo 1

## Introdução

A história da espécie humana é dominada pela evolução de alguns sistemas de normas, códigos e instrumentos que proporcionam confortos à sociedade. Entre eles, destacam-se os instrumentos tecnológicos que têm ampliado em diferentes facetas a comunicação, reduzindo distâncias e ampliando as relações sociais, econômicas e políticas, como os laptops, celulares, antenas de captação de sinais, inteligência artificial, avatares, entre outros.

O foco tecnológico que abordaremos neste trabalho será as antenas da quinta geração de telefonia (5G), que são utilizadas em algumas cidades brasileiras com o intuito de captar sinais de internet com uma maior velocidade no processamento das informações. Atualmente, a maioria dos aparelhos móveis no Brasil utilizam as bandas 3G ou 4G com uma frequência de 8Mbps e 28Mbps, respectivamente, enquanto a banda 5G promete ser dez vezes mais rápida na transmissão e recebimento de dados.

Os aparelhos móveis surgiram em 1983 com o lançamento do DynaTAC 8000X pela Motorola. Embora tenha sido um grande avanço na época, o processamento desse aparelho era muito limitado, com apenas 128 kilobytes de memória e um processador de 8 bits com clock de 0,6 MHz. Além disso, na década de 80, os aparelhos móveis não tinham a capacidade de utilizar a banda larga, devido as limitações das redes celulares analógicas. Desde então, a tecnologia móvel avançou significativamente, com smartphones modernos que possuem processadores mais potentes e conectividade de banda larga.

A tecnologia móvel evoluiu ao longo de diferentes gerações, como a 2G, 3G e 4G, cada uma com suas próprias características e avanços tecnológicos. A tecno-

---

logia 2G, por exemplo, permitia apenas chamadas de voz e mensagens de texto, enquanto a 3G possibilitou o uso de dados móveis, como navegação na internet e e-mails. Já a tecnologia 4G proporcionou uma velocidade de download mais rápida e melhor qualidade de voz e vídeo. (TANENBAUM; WETHERALL, 2011)

A tecnologia 5G oferece diversas vantagens em relação às gerações anteriores de redes móveis, incluindo velocidades de internet significativamente mais rápidas, maior capacidade de conexão simultânea de dispositivos e latência reduzida (ANATEL, 2023). Nesse contexto, destaca-se a cidade de Aveiro, em Portugal, que foi uma das pioneiras na implementação da tecnologia 5G em sua infraestrutura e que agregou benefícios como a melhoria da conectividade em áreas de difícil acesso, aprimoramento dos serviços de saúde e educação, bem como, a criação de novos modelos de negócios e serviços baseados na tecnologia 5G. (5G, 2021)

As ondas eletromagnéticas que atuam sobre os eletro-eletrônicos causam perturbações e geram interferências na transmissão. Esses distúrbios são causados principalmente por mudanças abruptas nas grandezas elétricas, como tensão e corrente. Elas podem se propagar por condução ao longo dos fios e cabos ou por radiação na forma de ondas eletromagnéticas. Essas ondas causam efeitos indesejáveis, como perturbações nas ondas de rádio e em sistemas de controle. (SANTOS, 2011)

Nos últimos anos, o aumento no número de pesquisas em relação à compatibilidade eletromagnética (CEM) se justifica pelo crescimento dos níveis de tensão e corrente; pela crescente sensibilidade e vulnerabilidade dos circuitos eletrônicos a essas perturbações (MONTENEGRO, 2020) e, também, pela exigência do mercado por tecnologias mais potentes. A CEM tornou-se um critério fundamental em todas as fases de desenvolvimento e fabricação de produtos, incluindo instalação e cabeamento, além de ser uma ferramenta de análise para estabelecer normas e requisitos legais.

Com o avanço da tecnologia 5G surgem demandas por tipos específicos de antenas que sejam capazes de fornecer cobertura mais ampla, vantagens significativas em termos de direcionalidade e eficiência para atender as exigências dos usuários. Há vários tipos de antenas, neste estudo abordaremos as antenas com cabos coaxiais.

Cabos coaxiais são formados por dois condutores separados por um dielétrico e protegidos por uma capa isolante. Devido a essa construção, um condutor funciona como blindagem do outro, o que reduz a irradiação de sinal e a capta-

ção de interferências externas. Essas características construtivas fazem com que os cabos coaxiais sejam amplamente utilizados em sistemas automotivos, telecomunicações, radiodifusão, áudio, vídeo, entre outras aplicações (KENEDY; NOVO; FONTGALLAND, 2023).

O estudo realizado por Kenedy, Novo e Fontgalland (2023) apresenta evidências de que um cabo coaxial RG-58 pode funcionar como uma antena e, se instalados adequadamente, reduzem a irradiação eletromagnética de modo comum a números desprezíveis. Esta constatação transforma o que era considerado como um problema de compatibilidade em uma oportunidade para explorar novas aplicações.

Atentos a este resultado e impulsionados pelos estudos e pelas pesquisas realizadas pelo Grupo de Inovação e Pesquisa em Compatibilidade e Qualidade de Energia (GIPCEM - IFBA) emergiu o interesse em investigar modelos de antenas com cabo coaxial com configurações adequadas para a aplicação da tecnologia 5G e de bom desempenho.

Os modelos de antenas em cabo coaxial possuem algumas distinções importantes em relação a outros tipos de antenas. Essas diferenças estão principalmente relacionadas à forma como a radiação é gerada e distribuída no espaço (RODRIGUES, 2022). Optou-se pelo estudo do modelo de antena de cabo coaxial vazado, visto que, durante a pesquisa, não foram encontrados muitos trabalhos específicos que abordassem a aplicação de antenas de cabo coaxial vazado para tecnologias 5G, o que justificou a escolha dessa abordagem.

## 1.1 Objetivo Geral

Simular e avaliar um modelo de antena com cabo coaxial e com *slots* (Aberturas) circulares capazes de ampliar a cobertura e o alcance da transmissão de sinais com frequência adequada para a tecnologia 5G.

### 1.1.1 Objetivos Específicos

- 1) Avaliar as propriedades eletromagnéticas e estruturais do cabo coaxial na transmissão de sinais de alta frequência para a tecnologia 5G, por meio da modelagem computacional, visando explorar a viabilidade de

seu uso como alternativa às antenas convencionais;

- 2) Realizar modelagens matemáticas para investigar as características eletromagnéticas e estruturais do cabo coaxial na transmissão de sinais na frequência de 3,5 GHz, com o objetivo de obter informações precisas sobre seu desempenho e potencialidades.

## 1.2 Questão de Pesquisa

Quais características matemáticas, eletromagnéticas e estruturais do cabo coaxial permitem melhorar a cobertura e o alcance da transmissão de sinais com frequência adequada para a tecnologia 5G?

## Capítulo 2

# Fundamentação Teórica: Antenas 5G, Modelagem Matemática e CST Studio Suite

Neste capítulo, apresentaremos os seguintes princípios teóricos acerca das antenas 5G: a sua faixa de frequência ideal, a sua funcionalidade, o cabo coaxial como elemento estrutural, a análise de redes vetoriais, a densidade de corrente, a regressão linear e o *Computer Simulation Technology* (CST). Esses tópicos foram organizados ao longo de seções.

### 2.1 Antenas e Suas Funcionalidades

Uma antena é um dispositivo projetado para irradiar ou receber ondas eletromagnéticas, conforme definido na norma do Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) (IEEE, 1969). Em outras palavras, trata-se de uma estrutura capaz de transmitir e receber sinais sem depender do uso de meios de transmissão física, como linhas de transmissão ou guias de onda. Em vez disso, as antenas exploram o ambiente ao seu redor para efetuar a transmissão ou recepção de sinais.



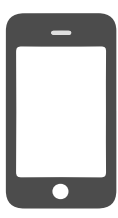

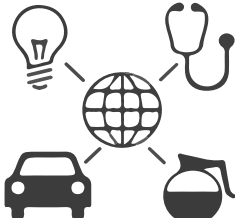
Uma antena também pode ser descrita como uma estrutura que está relacionada com a transição entre a propagação de ondas em meios confinados, como cabos coaxiais, guias de onda e linhas de transmissão, e a propagação no espaço livre, onde o meio de propagação é geralmente o ar ou o vácuo (BALANIS, 2016).

## 2.2 Introdução às Antenas para 5G

Nas últimas décadas, as telecomunicações passaram por grandes mudanças com o advento de novas tecnologias na área. Um dos objetivos das telecomunicações é revolucionar a forma como interagimos com o mundo digital com acesso a banda larga do 5G. No centro desta transformação, as redes de comunicações sem fios utilizam antenas, que desempenham um papel vital na transmissão e recepção de sinais a altas velocidades, fundamentais para a infra-estrutura 5G. O desenvolvimento de redes eficientes de alta qualidade depende, em grande, parte da compreensão do comportamento dessas antenas (SILVA, 2016).

Do 2G ao 5G, a tecnologia de comunicação móvel evoluiu consideravelmente, como ilustrado na Figura 2.1, tendo um grande aumento na velocidade e nas aplicações disponíveis. Para sustentar as diversas formas de ligação digital trazidas pelo 5G, incluindo dispositivos *Internet of Things* (IoT), veículos autônomos e diversas outras aplicação, um conjunto de antenas tem de se adaptar para receber as altas frequências, largas de banda mais amplas e maior densidade de dispositivos que caracterizam a era moderna e requisita especificações sofisticadas e adaptáveis as exigências do mercado (SILVA, 2016).

Figura 2.1 – Avanço da comunicação móvel

1982	1992	2001	2012	2020
1G	2G	3G	4G	5G
				
2,4 kb/s	64 kb/s	2Mb/s	10Mb/s	1GB/s
Voz	Texto	Internet	Vídeo	Internet da Coisas

Fonte: Adaptado de (FREEPIK, 2023).

No Brasil, o 5G operará em diferentes faixas de frequência, que serão definidas pela ANATEL após o leilão das radiofrequências. Uma das faixas mais importantes é a de 3,5 GHz, que é considerada a faixa-padrão do 5G, pois permite uma

boa combinação entre velocidade e cobertura. Outras faixas que poderão ser utilizadas no Brasil são: 700 MHz, 2,3 GHz e 26 GHz. Cada faixa tem suas vantagens e desvantagens, dependendo da capacidade, da propagação e da disponibilidade do espectro. Por exemplo, a faixa de 700 MHz tem uma maior penetração em ambientes fechados, mas uma menor capacidade de transmissão de dados. Já a faixa de 26 GHz tem uma alta capacidade, mas uma menor alcance e uma maior sensibilidade a obstáculos (ANATEL, 2021).

Um campo eletromagnético pode induzir corrente no fio. Além disso, a quantidade de energia irradiada, bem como a direção dessa radiação, dependem do formato e do tamanho dessas estruturas condutoras (WENTWORTH, 2009). Nesse caso, o formato e o tamanho da estrutura são variáveis relacionadas a eficiência da conversão desse campo em corrente. Eles também determinam a intensidade, sentido e direção da radiação eletromagnética (VALLE, 2008).

## 2.3 Faixa de Frequência de 3,5 GHz

A faixa de frequência de 3,5 GHz desempenha um papel fundamental no cenário da tecnologia de comunicação sem fio, especialmente no contexto da evolução das redes de telecomunicações para a tecnologia 5G, pois possui a capacidade de equilibrar efetivamente a largura de banda disponível com a propagação do sinal (HELERBROCK, 2023).

Em frequências mais altas, como as utilizadas em algumas implementações do 5G, como as atender com 5G redes empresariais em setores como da indústria, mineração, logística e agronegócio, a largura de banda é abundante, mas a propagação do sinal é limitada, o que requer uma densidade significativamente maior de estações base, que são pontos de transmissão. Por outro lado, em frequências mais baixas, a propagação do sinal é melhor no quesito alcance, mas a largura de banda disponível é limitada. A faixa de 3,5 GHz oferece um ponto de equilíbrio entre esses dois aspectos (CERTI, 2022).

A faixa de 3,5 GHz é especialmente relevante para aplicações de 5G em áreas urbanas densamente povoadas, com uma propagação de sinal razoável e alta largura de banda, ela é adequada para a implementação de redes 5G que podem fornecer conectividade de alta velocidade em ambientes externos e internos. Essa faixa de frequência é vista como uma peça-chave na entrega de serviços 5G de alta qualidade em áreas urbanas (ANATEL, 2022).

## 2.4 Cabos Coaxiais como Elementos Estruturais

A integração de cabos coaxiais como elementos estruturais em antenas projetadas para a tecnologia 5G na faixa de frequência de 3,5 GHz representa uma abordagem teoricamente inovadora e tem potencial aplicativo em diversas áreas das comunicações móveis e sem fio (SANTOS et al., 2018). Essa estratégia se baseia em uma série de vantagens e desvantagens que merecem atenção.

Quando se trata de benefícios, os cabos coaxiais são conhecidos pela sua durabilidade estrutural, tornando-os ideais para ambientes agressivos e aplicações externas (NOGUEIRA, 2023). A resistência mecânica e a durabilidade destes cabos podem aumentar a vida útil das antenas 5G, especialmente em cenários de implantação em grande escala. Além disso, a integração do cabo coaxial pode simplificar o projeto da antena, reduzir os custos de fabricação e especialmente benéfica para aplicações de alto volume de conexões simultâneas.

Outra vantagem teórica é o potencial para melhorias no desempenho das antenas, pois os cabos coaxiais possuem propriedades elétricas favoráveis, o que pode contribuir para uma maior eficiência de transmissão. Sua estrutura blindada externa também oferece proteção eficaz contra interferências eletromagnéticas externas, o que resulta em uma recepção de sinal mais limpa e confiável (SANTOS et al., 2018).

No entanto, é importante reconhecer as desvantagens associadas à utilização do cabo coaxial como elemento estrutural em antenas 5G na faixa de 3,5 GHz. Uma das principais limitações é a largura de banda, que é reduzida em comparação com outros tipos de estruturas de antenas. O que restringe a capacidade da antena de operar em frequências mais altas como a do 5G.

Outra desvantagem diz respeito ao peso e às dimensões dos cabos coaxiais, que tendem a ser um entrave em comparação com estruturas de antenas mais leves e de menores proporções físicas (NOGUEIRA, 2023). Isso pode limitar sua aplicabilidade em certos cenários, como em antenas de dispositivos móveis, onde a leveza e a compactidade são essenciais.

A complexidade de fabricação é outro aspecto a ser considerado. A integração de cabos coaxiais como elementos estruturais pode ser mais complexa do que os designs convencionais de antenas, exigindo um processo de fabricação mais cuidadoso e recursos adicionais (FARUQUE et al., 2019).

Assim, a escolha de cabos coaxiais como elementos estruturais em antenas 5G na faixa de 3,5 GHz deve ser cuidadosamente ponderada, a depender o tipo de aplicação, levando em consideração essas vantagens e desvantagens desse método construtivo.

## 2.5 Análise de Redes Vetoriais

Análise de rede vetorial é uma metodologia de medição do desempenho elétrico de componentes e circuitos resistivos, indutivos e capacitivos. <sup>1</sup> É um método para caracterizar com precisão tais componentes através da medição dos efeitos introduzidos pelos mesmos na amplitude e na fase de sinais que variam em frequência e em potência. Esta rede vetorial é constituída por alguns modelos matemático como o coeficiente de reflexão e a perda de retorno, que abordarem nas subseções seguintes.

### 2.5.1 Coeficiente de Reflexão

Por conta das reflexões existentes na fronteira de uma linha de transmissão, o caminho contendo a onda incidente também possui a onda refletida e a superposição dessas duas ondas forma um padrão de ondas estacionárias (NETO, 2023). A razão entre a tensão do sinal refletido e a tensão do sinal incidente é chamada de coeficiente de reflexão. O módulo do coeficiente de reflexão é expresso por  $\Gamma$ , e varia entre 0 e 1. É uma grandeza complexa e adimensional, que pode ser calculada através da equação 2.1.

$$\Gamma = \frac{Z_l - Z_c}{Z_l + Z_c} \quad (2.1)$$

Sendo que:

- $\Gamma$      $\Rightarrow$     Coeficiente de Reflexão;
- $Z_l$     $\Rightarrow$     Impedância de Base ( $\Omega$ );
- $Z_c$     $\Rightarrow$     Impedância Característica ( $\Omega$ );

---

<sup>1</sup>São circuitos elétricos que possuem diferentes comportamentos em relação à tensão e à corrente alternadas. Um circuito é resistivo quando a tensão e a corrente estão em fase, ou seja, não há defasagem entre elas. Um circuito é indutivo quando a corrente está atrasada em relação à tensão em 90°, devido à presença de indutores que armazenam energia magnética.

A relação do coeficiente de reflexão está em função de duas variáveis, que são as impedâncias de base e característica, uma relação que podemos estabelecer como as funções de duas variáveis.

## 2.5.2 Perda de Retorno

Os parâmetros  $S$ , ou parâmetros de espalhamento, ou perda de retorno, são utilizados para uma análise completa do desempenho elétrico de dispositivos lineares operando em frequências elevadas. Nessas condições de alta frequência, medir tensões e correntes, bem como realizar curtos-circuitos e circuitos abertos nas portas do dispositivo (métodos convencionais para determinar os parâmetros  $H$ ,  $Y$  e  $Z$  em dispositivos de baixa frequência), torna-se uma tarefa desafiadora. No entanto, a carta de Smith, que será apresentada no decorrer desta seção, é uma ferramenta que auxilia essa análise (SANTOS, 2011).

A nomenclatura é estruturada de tal forma que o primeiro número indica a porta pela qual a energia é transmitida, enquanto o segundo número representa a porta pela qual a energia é recebida. Como pode ser visualizado por meio da definição 2.5.2.

$$S_{gd}$$

Sendo que:

- $S$  ⇒ Parâmetro  $S$ ;
- $g$  ⇒ Porta pela qual a energia é transmitida;
- $d$  ⇒ Porta pela qual a energia é recebida;

Em um analisador de rede vetorial, é possível medir os parâmetros  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  e  $S_{22}$ , que seguem a estrutura demonstrada na definição 2.5.2 (Agilent Technologies, 2001). Esses parâmetros representam as relações entre as ondas incidentes e refletidas nas portas do dispositivo sob teste. O número de parâmetros  $S$  associados a um dispositivo específico é determinado pelo quadrado do número de portas do dispositivo. Por exemplo, um dispositivo de duas portas terá quatro pa-

râmetros S, que podem ser mensuradas, individualmente, por meio da equação 2.2.

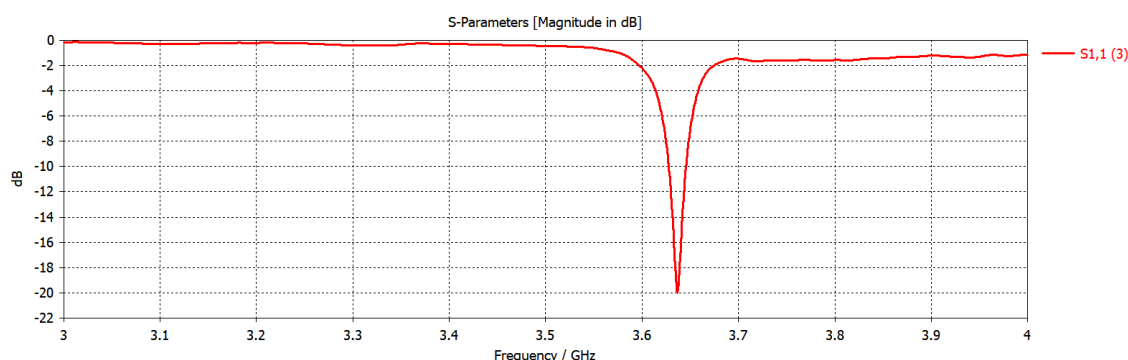
$$RL(dB) = -20\log|\Gamma| \quad (2.2)$$

Sendo que:

- RL  $\Rightarrow$  Parâmetro S;  
 $\Gamma$   $\Rightarrow$  Coeficiente de Reflexão;

O parâmetro de espalhamento S, que é uma função vetorial, depende da magnitude do coeficiente de reflexão e da frequência. O modelo dessa função pode ser visto na Figura 2.2, que foi obtido durante o processo de simulação.

**Figura 2.2** – Gráfico do Parâmetro S de uma Antena em Função da Frequência



Fonte: Gerado pelo autor no CST Studio.

Esse gráfico permite analisar como o parâmetro S varia com a frequência, o que é importante para caracterizar as propriedades das antenas. Por exemplo, ele mostra a largura de banda da antena, que é a faixa de frequência em que a perda de retorno é menor ou igual a -10 dB. Isso significa que a antena irradia pelo menos 90% da potência que recebe. A largura de banda é um indicador da versatilidade da antena em operar em diferentes canais de comunicação.

### 2.5.3 Standing Wave Ratio (SWR)

A relação de onda estacionária SWR e a perda de retorno (parâmetro S) são duas formas de medir o grau de adaptação de impedância entre uma fonte de sinal

e uma carga. A **SWR** é a razão entre a tensão máxima e a tensão mínima na linha de transmissão, que ocorre quando há reflexão de parte do sinal na carga, enquanto a perda de retorno é a razão entre a potência refletida e a potência incidente na carga, expressa em decibéis (dB).

Matematicamente, podemos descrever o **SWR** como a razão entre a amplitude da onda estacionária e a amplitude da onda incidente, como mostrado na equação 2.3, indicando a quantidade de energia que é perdida devido a reflexões na linha de transmissão.

A fórmula para calcular o **SWR** é dada por:

$$SWR = \frac{E_{max}}{E_{min}} = \frac{1 + \sqrt{\frac{P_R}{P_i}}}{1 - \sqrt{\frac{P_R}{P_i}}} \quad (2.3)$$

Sendo que:

- SWR** ⇒ Coeficiente de Reflexão;
- $E_{max}$  ⇒ Tensão máxima da Onda Refletida (V);
- $E_{min}$  ⇒ Tensão mínima da Onda Refletida (V);
- $P_R$  ⇒ Potência Refletida (W);
- $P_i$  ⇒ Potência Incidente (W);

Toda a energia transmitida à antena sem qualquer reflexão significaria a relação **SWR** ideal de 1. As circunstâncias práticas determinam que as perdas no sistema resultarão em um valor de **SWR** sempre superior a 1. Uma correspondência de impedância ruim entre a antena e a linha de transmissão produz um valor de **SWR** alto, em que mais energia é refletida de volta para a fonte (SANTOS, 2011).

Ao utilizar cabos coaxiais como elementos estruturais para antenas **5G**, é fundamental minimizar o **SWR** para garantir uma transmissão eficiente de dados. Reduzir o **SWR** não apenas aumenta a eficiência da antena, mas também melhora a qualidade do sinal transmitido, resultando em uma melhor conectividade para os dispositivos **5G**. Portanto, compreender e otimizar o **SWR** em antenas **5G** é crucial para alcançar um desempenho confiável e eficiente no cenário das comunicações sem fio com alta velocidade e capacidade de transmissão.

## 2.5.4 Voltage Standing Wave Ratio (VSWR)

O Voltage Standing Wave Ratio (**VSWR**) é uma medida que descreve o grau de alinhamento entre a impedância da antena e a impedância da linha de transmissão à qual está conectada. Em essência, ele indica o casamento de impedância entre a antena e a linha de transmissão.

Quanto menor o **VSWR**, melhor é a correspondência entre a antena e a linha de transmissão, resultando em uma maior eficiência na transferência de energia. Um **VSWR** de 1,0 denota uma correspondência perfeita, indicando que não há energia refletida. Por outro lado, um **VSWR** maior que 1,0 significa mais potência sendo refletida pela antena, resultando em uma menor eficiência do sistema.

O **VSWR** é derivado do coeficiente de reflexão ( $\Gamma$ ) e representa a relação entre a amplitude de pico e a amplitude mínima de uma onda estacionária na linha de transmissão. É essencial controlar a potência refletida para assegurar a eficiência e a integridade do sinal em um sistema de transmissão. Esse parâmetro descreve a quantidade de energia eletromagnética refletida devido a descontinuidades no sistema e pode ser expresso em termos percentuais ou em decibéis (dB).

O modelo matemático que relaciona o coeficiente de reflexão ( $\Gamma$ ) e o **VSWR** é descrita na equação 2.4.

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.4)$$

Sendo que:

**VSWR**  $\Rightarrow$  Voltage Standing Wave Ratio;

$\Gamma$   $\Rightarrow$  Coeficiente de Reflexão;

As especificações de **VSWR** são amplamente usadas na indústria para determinar se as antenas estão corretamente sintonizadas. No entanto, é importante notar que um **VSWR** baixo não garante necessariamente que a antena esteja irradiando toda a potência recebida. São necessárias avaliações adicionais para avaliar a potência irradiada, como medir o ganho da antena, a eficiência e o diagrama de irradiação. Além disso, o **VSWR** pode ser representado na carta de Smith, que será explorada nessa seção, para análises mais detalhadas da magnitude e fase,

proporcionando uma compreensão abrangente da eficiência do sistema de transmissão.

Por meio da Tabela 2.1 é possível observar a relação entre o **VSWR**, o coeficiente de reflexão ( $\Gamma$ ) e a potência refletida em porcentagem, evidencia-se que quanto maior o **VSWR** maior será o coeficiente de reflexão, visto que são grandezas diretamente proporcionais, e conseqüentemente a maior será a potência refletida, essa informação implica que quanto maior for o valor de **VSWR** maior serão as perdas referentes a potência refletida.

**Tabela 2.1** – Relação entre **VSWR**,  $\Gamma$  e Coeficiente de Reflexão

<b>VSWR</b>	$\Gamma$	<b>Potência Refletida (%)</b>
1,0	0,000	0,00
1,5	0,200	4,0
2,0	0,333	11,1
2,5	0,429	18,4
3,0	0,500	25,0
3,5	0,556	30,9
4,0	0,600	36,0
5,0	0,667	44,0
6,0	0,714	51,0
7,0	0,750	56,3
8,0	0,778	60,5
9,0	0,800	64,0
10,0	0,818	66,9
15,0	0,875	76,6
20,0	0,905	81,9
50,0	0,961	92,3

Fonte: (VSWR, 2023).

### 2.5.5 Impedância e Admitância

A impedância e a admitância são dois conceitos fundamentais em engenharia elétrica. A impedância é a razão entre a tensão e a corrente em um circuito, enquanto a admitância é o inverso da impedância, conforme descrito na equação 2.5.

$$Z_L = \frac{V}{I} = \frac{1}{Y_L} \quad (2.5)$$

Sendo que:

- $Z_L$  ⇒ Impedância da Carga ( $\Omega$ );
- $V$  ⇒ Tensão Elétrica (V);
- $I$  ⇒ Corrente Elétrica (A);
- $Y_L$  ⇒ Admitância da Carga (S);

Por meio da análise de redes vetoriais, é possível obter informações sobre impedância e admitância, sem depender da equação 2.5, visto que essas grandezas também podem ser calculadas a partir do coeficiente de reflexão. As equações 2.6 e 2.7 apresentam os modelos relevantes para a impedância e a admitância, respectivamente:

$$Z_L = R + jX \quad (2.6)$$

Sendo que:

- $Z_L$  ⇒ Impedância da Carga ( $\Omega$ );
- $R$  ⇒ Resistência ( $\Omega$ );
- $j$  ⇒ Unidade imaginária;
- $X$  ⇒ Reatância ( $\Omega$ );

$$Y_L = G + jB \quad (2.7)$$

Sendo que:

- $Y_L$  ⇒ Admitância da Carga (S);
- $G$  ⇒ Condutância (S);
- $j$  ⇒ Unidade imaginária;
- $B$  ⇒ Susceptância (S);

Essas grandezas, representados pelas equações 2.6 e 2.7, são números complexos que representam a oposição e a facilidade que um circuito oferece à passagem de corrente alternada. A forma retangular usa as partes real e imaginária dos números complexos, que podem ser interpretadas como componentes resistivos e reativos (indutivo ou capacitivo) do circuito. A forma retangular é útil para realizar operações algumas operações matemáticas entre a impedâncias e admitâncias.

Esses parâmetros são fundamentais para o projeto, análise e desenvolvimento de sistemas de antenas. Eles também são importantes para a compreensão da carta de Smith, que será abordada nesta seção.

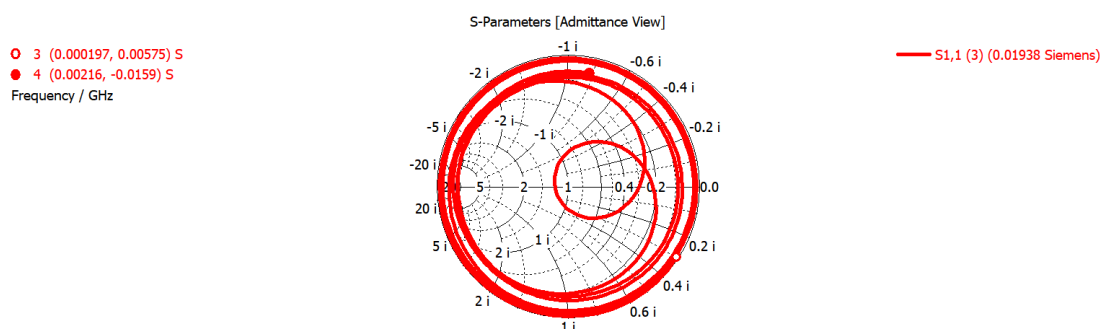
## 2.5.6 Carta de Smith

Na engenharia de antenas, a Carta de Smith é uma ferramenta indispensável nas análises e projetos, pois permite visualizar e avaliar o comportamento das ondas eletromagnéticas que se propagam na linha e na carga. Esta representação gráfica do domínio da impedância em linhas de transmissão é uma aliada na busca pela otimização de sistemas de antenas.

Por meio da Carta de Smith é possível visualizar fenômenos como casamento de impedância, adaptação de impedância e a localização de componentes reativos em circuitos de antenas. Por exemplo, a Carta de Smith pode ser usada para selecionar componentes reativos que reduzem a reflexão de sinal de volta para a fonte. Isso pode melhorar o rendimento de uma antena, aumentando a sua eficiência e a sua potência de saída

Antes de apresentar a Figura 2.3, é importante mencionar que ela se refere a um dos modelos simulados durante o trabalho e que será usado como referência para a exemplificação da aplicabilidade e funcionamento da carta de Smith. A Figura 2.3 mostra o gráfico da carta de Smith, que permite visualizar a impedância normalizada e o coeficiente de reflexão em função da frequência.

Figura 2.3 – Carta de Smith no CST STUDIO



Fonte: Gerado pelo autor no CST Studio.

A análise inicia-se pela interpretação da posição dos pontos no gráfico de Smith, conforme ilustrado na Figura 2.3. No centro da carta encontra-se a impedância normalizada, geralmente ajustada para 1:50 ohms. Os pontos localizados sobre o círculo representam impedâncias puramente resistivas, ao passo que aqueles dentro do círculo indicam impedâncias capacitivas (abaixo do centro) ou indutivas (acima do centro).

A carta de Smith também mostra o módulo do coeficiente de reflexão, que indica a magnitude da onda refletida na carga. O ponto de máxima onda estacionária corresponde ao ponto mais distante do centro da carta, e representa a maior razão entre a tensão máxima e a tensão mínima na linha. A partir desse ponto, é possível calcular a impedância no ponto de máxima onda estacionária, usando a relação entre a impedância normalizada e o coeficiente de reflexão. Essa relação é dada pelo seguinte modelo:

$$Z_L = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad (2.8)$$

Sendo que:

- $Z_L$  ⇒ Impedância da Carga ( $\Omega$ );  
 $\Gamma$  ⇒ Coeficiente de Reflexão;

Por intermédio dessa análise da Figura 2.3, pode-se decifrar padrões complexos de reflexão e refração, permitindo criar antenas mais eficientes e inovadoras. A habilidade de representar de forma gráfica a transformação de impedância ao

longo de uma linha de transmissão é fundamental para compreender como as antenas interagem com o espaço eletromagnético circundante (UNESP, 2018).

Ao investigar as respostas de frequência e as características de largura de banda, verifica-se que a Carta de Smith é muito eficiente para realizar a sintonia fina de sistemas complexos.

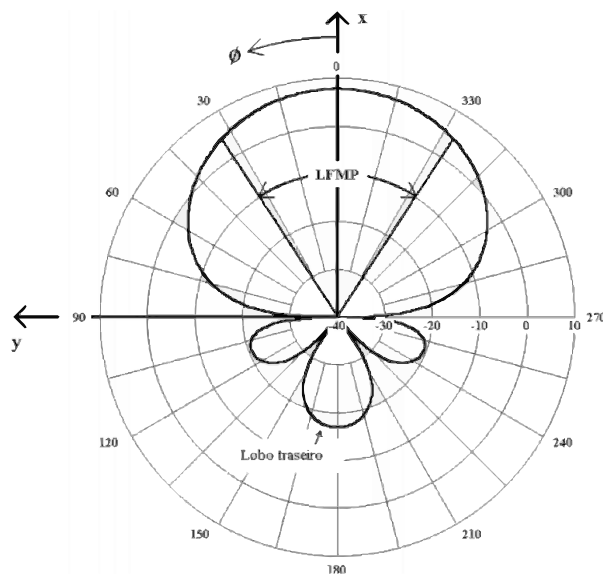
## 2.5.7 Diagrama de Irradiação

O diagrama de irradiação de uma antena é uma representação gráfica da distribuição da potência radiada pela antena no espaço, em função da direção. O diagrama de irradiação mostra as características de radiação da antena, como a direção de máxima radiação, a largura de feixe, os lóbulos, a diretividade, o ganho, entre outros. O diagrama de irradiação pode ser expresso em coordenadas cartesianas, polares ou esféricas, dependendo da conveniência (BALANIS, 2016).

O diagrama de irradiação pode ser apresentado em duas ou três dimensões, dependendo do nível de detalhamento desejado. O diagrama tridimensional mostra a radiação da antena em todas as direções, mas pode ser difícil de visualizar e interpretar. O diagrama bidimensional mostra a radiação da antena em um plano específico, normalmente o plano principal da antena, que é definido pela direção de máxima radiação e pelo vetor campo elétrico ou magnético. O diagrama bidimensional, como mostrado na Figura 2.4, é mais simples e intuitivo, mas pode omitir informações importantes sobre a radiação da antena em outras direções (POZAR, 2011).

Os lóbulos são as regiões do diagrama de irradiação onde a potência radiada é maior que um determinado valor. O lóbulo principal é o lóbulo que contém a direção de máxima radiação da antena, na Figura 2.4 é mostrado no primeiro e segundo quadrante do gráfico em questão. Os lóbulos laterais são os lóbulos que não contêm a direção de máxima radiação, mas que estão adjacentes ao lóbulo principal. Os lóbulos secundários são os lóbulos que não contêm nem estão adjacentes à direção de máxima radiação. Os lóbulos posteriores são os lóbulos que estão no lado oposto ao lóbulo principal. Os lóbulos indicam a qualidade e a eficiência da antena, sendo desejável que o lóbulo principal seja o mais estreito e o mais alto possível, e que os lóbulos laterais, secundários e posteriores sejam o mais baixos e o mais distantes possível (YANG; RAHMAT-SAMII, 2008).

Figura 2.4 – Diagrama de Irradiação 2D uma Antena



Fonte: (FREEPIK, 2023).

## 2.5.8 Axial Ratio

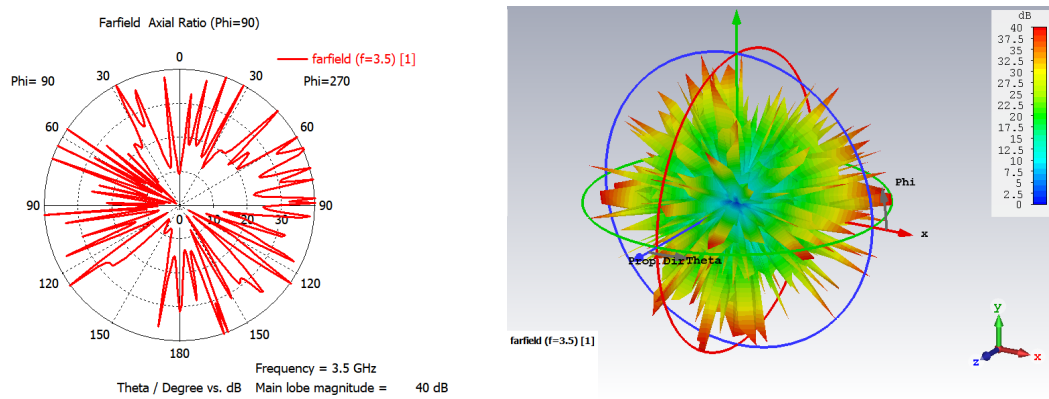
O *axial ratio*, em português relação axial, é um conceito que se aplica a diversas áreas da ciência, como química, física e matemática. Ela expressa a relação entre o comprimento (ou magnitude) de dois ou mais eixos de uma estrutura ou forma geométrica. Por exemplo, em uma antena é um parâmetro que mede o grau de polarização circular. A polarização circular ocorre quando os componentes ortogonais do campo elétrico irradiado pela antena têm a mesma amplitude e um deslocamento de fase de 90 graus. Nesse caso, o *axial ratio* é igual a 1 (0 dB) e o campo elétrico traça uma circunferência no plano de observação (BALANIS, 2016).

No entanto, na prática, é difícil obter uma polarização circular perfeita, pois os componentes ortogonais do campo elétrico podem ter amplitudes diferentes ou um deslocamento de fase diferente de 90 graus. Nesse caso, o *axial ratio* é maior que 1 (>0 dB) e o campo elétrico traça uma elipse no plano de observação. O *axial ratio* é definido como a razão entre o eixo maior e o eixo menor da elipse (POZAR, 2011).

O *axial ratio* é um parâmetro importante para as antenas que operam com polarização circular, pois indica o quanto a antena se desvia da polarização circular ideal. Quanto menor for o *axial ratio*, melhor será a qualidade da polarização circular da antena. Um valor comum usado como referência é 3 dB, que corresponde a uma elipse com eixos na proporção de 2:1. Antenas com *axial ratio* menor

que 3 dB são consideradas circularmente polarizadas, enquanto antenas com *axial ratio* maior que 3 dB são consideradas elípticamente polarizadas (YANG; RAHMAT-SAMII, 2008).

**Figura 2.5** – Gráficos do axial ratio no CST STUDIO - Polar e 3D



Fonte: Gerado pelo autor no CST Studio.

A Figura 2.5 ilustra o conceito de *axial ratio* para uma antena com polarização elíptica, visto que seu *axial ratio* encontrado foi maior do que 3 dB. Por meio desses dados e das simulações realizadas, é possível perceber que esse parâmetro pode variar com a frequência, o ângulo de observação e a distância da antena. Por isso, é comum especificar o *axial ratio* em uma determinada direção, como o eixo principal do feixe da antena, e em uma determinada faixa de frequência, como a banda de operação da antena (YANG; RAHMAT-SAMII, 2008).

## 2.6 Densidade de Corrente

A densidade de corrente elétrica é uma grandeza que mede a quantidade de carga elétrica que atravessa uma determinada área por unidade de tempo. Ela pode ser descrita, Equação 2.9, como o vetor cujo módulo é igual à razão entre a corrente elétrica e a área da seção transversal do condutor, e cuja direção é normal à superfície e orientada no sentido do fluxo das cargas (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016).

O modelo matemático que determina a corrente elétrica é representado algebricamente por uma integral unidirecional da densidade de corrente elétrica por metro quadrado, em uma seção transversal do condutor.

$$I = \int_A \mathbf{J} \cdot d\mathbf{A} \quad (2.9)$$

Sendo que:

- I ⇒ Corrente elétrica (A);
- J ⇒ Densidade de corrente ( $A/m^2$ );
- A ⇒ Seção transversal do condutor ( $m^2$ );
- dA ⇒ Elemento diferencial de área;

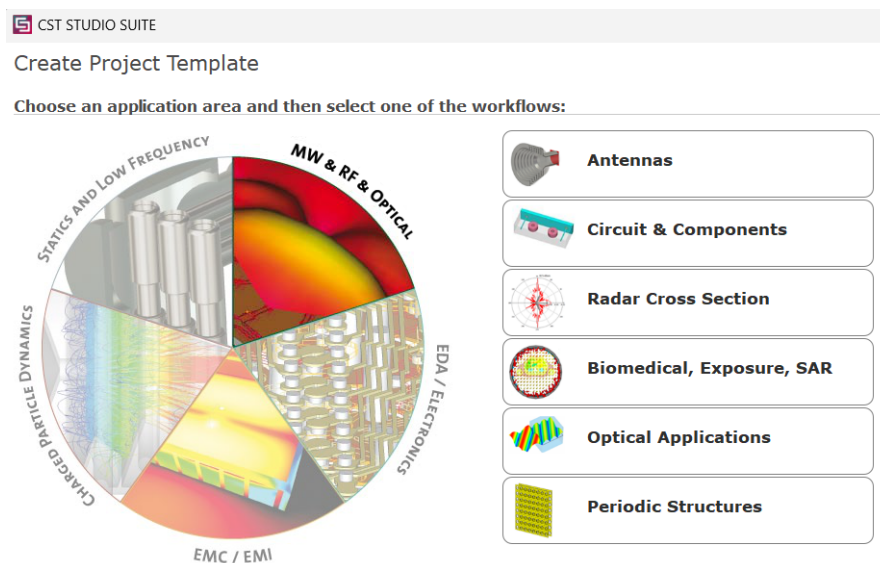
A densidade de corrente depende da forma geométrica do condutor e da distribuição de potencial ao longo da sua superfície. Em superfícies com pontas ou arestas, a densidade de corrente tende a ser maior do que em superfícies planas ou curvas, pois o campo elétrico é mais intenso nessas regiões (TIPLER; MOSCA, 2012). Isso pode causar perdas por efeito Joule, que é a dissipação de energia elétrica em forma de calor, ou favorecer processos de corrosão eletroquímica, que é a degradação do material metálico por reações de oxidação e redução (GENTIL, 2011). De acordo com a definição da integral, essas perdas seriam as correções dos erros ao estabelecer o limite com a aproximação da soma das partes.

## 2.7 Introdução ao CST Studio Suite

O CST Studio Suite, também conhecido como CST, é uma ferramenta de alto desempenho para análise eletromagnética 3D. A sigla CST significa “Computer Simulation Technology”, esse software foi desenvolvido para análise Eletromagnética tridimensional de alto desempenho e possibilita ao usuário projetar, analisar e otimizar componentes e sistemas eletromagnéticos (CST, 2023). Ao utilizar a seção de micro-ondas, uma das varias disponíveis como mostrado na Figura 2.6, do CST, os projetistas têm acesso a uma ampla gama de recursos que facilitam a simulação precisa e eficaz desses sistemas complexos.

Essa ferramenta é amplamente utilizada pelas principais empresas de tecnologia e engenharia para otimizar o desempenho de dispositivos eletromagnéticos e eletrônicos, identificando problemas de conformidade no início do processo de design, reduzindo significativamente o número de protótipos físicos necessários

Figura 2.6 – Ferramentas disponíveis no CST STUDIO



Fonte: Gerado pelo autor no CST Studio.

e o risco de falhas e recalls de testes, reduzindo significativamente os custos do projeto (CST, 2023).

Uma das características notáveis do dessa ferramenta é a sua capacidade de oferecer uma visualização tridimensional detalhada e precisa dos campos eletromagnéticos, permitindo aos engenheiros examinar comportamento das ondas eletromagnéticas e outros parâmetros do sistema projetado. Além disso, a ferramenta facilita a análise de parâmetros-chave, como impedância, **VSWR**, perdas de retorno e eficiência, fornecendo dados essenciais para a otimização do design da antena.

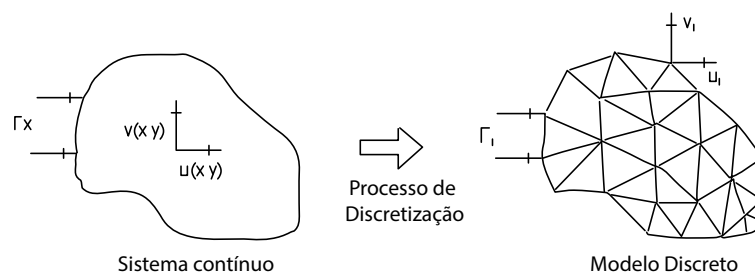
O **CST** foi escolhido como ferramenta de simulação eletromagnética para o presente trabalho porque ele oferece uma interface gráfica amigável, uma biblioteca de modelos predefinidos, uma variedade de solvers e pós-processadores, uma integração com outros softwares de o Desenho Assistido por Computador (CAD) e o Engenharia Assistida por Computador (CAE), e uma documentação e suporte técnico abrangentes. Além disso, o **CST** é um software reconhecido e utilizado por diversas empresas e instituições de pesquisa na área de engenharia elétrica e telecomunicações, o que garante a sua confiabilidade e credibilidade.

Além disso, o software é altamente flexível e suporta uma variedade de tipos de antenas e geometrias, permitindo que os engenheiros explorem diversas opções de design antes de selecionar a configuração ideal para o seu projeto, permitindo a utilização de modelos preexistente ou a criação de novas configurações

de antenas. A capacidade de realizar simulações precisas e iterativas no CST contribui significativamente para o desenvolvimento de antenas de alto desempenho, proporcionando aos engenheiros valiosas informações para aprimorar a eficácia e a eficiência das comunicações sem fio e outros sistemas eletromagnéticos.

Os métodos que o CST utiliza para realizar os cálculos eletromagnéticos são baseados no Método dos Elementos Finitos (MEF), que é um procedimento numérico para resolver equações diferenciais que descrevem os fenômenos físicos envolvidos. O MEF consiste em discretizar o domínio do problema em partes menores, chamadas de elementos finitos, que são conectados por nós, o que pode ser visualizado por meio da Figura 2.7. Cada elemento tem um conjunto de equações que aproximam localmente as equações originais, e que são combinadas em um sistema global de equações que representa o problema inteiro. O sistema global de equações é resolvido por métodos numéricos, fornecendo os valores dos campos eletromagnéticos nos nós e nos elementos.

**Figura 2.7** – Exemplificação do método dos elementos finitos



Fonte: (MECANICA, 2016).

O tempo de processamento de uma simulação no CST também depende do grau de realismo do modelo da antena, que pode incluir aspectos como materiais, dimensões, tolerâncias, imperfeições, ruídos, interferências, entre outros. Quanto mais próximo o modelo estiver de um protótipo real, maior será o tempo de processamento, pois a simulação terá que levar em conta mais variáveis e efeitos. Por isso, é importante definir o nível de realismo adequado para o objetivo do projeto, buscando obter resultados consistentes e viáveis.

## 2.8 Modelagem Matemática

Diferentes abordagens tentam definir o que é um modelo. Para Chevallard (2009) o modelo é uma metáfora, que preserva semelhanças com algo real que pode proporcionar a realização de uma tarefa. Nesta mesma linha, Bassanezi (2011)

define:

*" quando se procura refletir sobre uma porção da realidade, na tentativa de explicar, de entender, ou de agir sobre ela – o processo usual é selecionar, no sistema, argumentos ou parâmetros considerados essenciais e formalizá-los através de um sistema artificial: o modelo "*

Segundo Bassanezi (2011) existe vários tipos de modelos, mas na Matemática destaca-se o modelo do objeto e o modelo teórico. O primeiro é a representação de um objeto ou um fato concreto, e é sempre parcial deixando escapar algumas nuances do objeto real, enquanto o segundo é vinculado a uma teoria geral existente e devem representar as mesmas variáveis essenciais existentes no fenômeno. O autor destaca que o modelo matemático é "um conjunto de símbolos e relações matemáticas que representam de alguma forma o objeto estudado" (BASSANEZI, 2011)

Bassanezi (2011) acrescenta que "esse modelo matemático pode ser formulado de acordo a natureza do fenômeno e classificado conforme o tipo de matemática que utiliza: linear ou não linear - conforme suas equações básicas; estático – quando representa a forma do objeto e, educacional - quando é baseado em um número pequeno ou simples de suposições. Em nosso estudo o modelo linear emergiu quando simulamos uma antena com cabo coaxial com cinco aberturas.

Para obtenção e validação de um modelo matemático utilizamos de um processo dinâmico que se aproxima dos fenômenos reais elaborando representações de um sistema ou parte dele, denominado de modelagem matemática.

A modelagem matemática é uma ferramenta que permite representar fenômenos do mundo real por meio de equações matemáticas. Ela é fundamental para entender e prever o comportamento de sistemas complexos, permitindo a análise e a simulação desses sistemas de maneira eficiente e precisa (BASSANEZI, 2015).

Na engenharia elétrica, a modelagem matemática é amplamente utilizada em processos de controle e automação e para analisar e aprimorar sistemas elétricos, como antenas, onde parâmetros como ganho, diretividade e eficiência são modelados para melhorar o desempenho da antena ainda na fase de projeto.

O objetivo de uma modelagem matemática é obter uma relação funcional entre os parâmetros analisados que preservem qualidades ou significados do fenô-

meno real. Quando o modelo é dinâmico, aquele que precede a análise dos dados experimentais, é necessário avaliar além dos ajustes o comportamento fenomenológico das variáveis, entretanto, quando o modelo é estático os ajustes numéricos e as aproximações validadas em intervalos dão conta de garantir a sua eficácia.

Para os modelos matemáticos estáticos um método bastante utilizado é a regressão linear ou ajuste de curva. Surgiu no século XIX usado por Sir Francis Galton para estabelecer uma relação entre as alturas de pais e filhos. A regressão tem como objetivo estabelecer uma relação funcional entre a variável dependente, (geralmente representada pela letra  $y$ ) e a variável independente (comumente representada pela letra  $x$ ) que pode ser representada algebricamente por  $y = f(x)$ .

Dado um conjunto de dados, a regressão linear busca encontrar a linha que melhor se ajusta aos dados (CHEIN, 2023), acrescentamos que é necessário entender que a curva de regressão (que pode ser uma reta) é um recorte estático de um intervalo pesquisado que retrata as aproximações de fenômenos reais, não devendo ser generalizados como um comportamento padrão para outros intervalos distintos.

É comum associarmos a representação algébrica de uma regressão linear a uma função polinomial do primeiro grau, expressa por  $f(x) = ax + b$ , no entanto, ressaltamos que existem outros modelos matemáticos e estatísticos que permitem representar regressões. No capítulo 4 apresentamos uma relação entre duas variáveis, parâmetros estruturais e eletromagnéticos, em que o uso do programa Python proporcionou encontrar um modelo matemático de regressão linear. E a equação geral é dada pela equação 4.2.

$$y = mx + c \tag{2.10}$$

Sendo que:

- $y$      $\Rightarrow$     Variável Dependente de  $x$ ;
- $m$      $\Rightarrow$     Inclinação da Reta;
- $x$      $\Rightarrow$     Variável Independente;
- $c$      $\Rightarrow$     Interseção  $y$ ;

O método dos mínimos quadrados é frequentemente usado para encontrar os parâmetros  $m$  e  $c$  que minimizam a soma dos quadrados das diferenças entre os

valores observados e previstos (CHEIN, 2023). Este método fornece uma solução robusta e eficiente para o problema de regressão linear.

Encontrar uma equação que rege um fenômeno tem implicações profundas. No contexto da engenharia elétrica, isso permite que os engenheiros projetem antenas com características desejadas. Além disso, uma vez que o modelo é estabelecido, ele pode ser usado para prever o comportamento do sistema sob diferentes condições, o que é extremamente útil para o projeto e otimização de sistemas elétricos.

# Capítulo 3

## Metodologia

Nesta seção, será tratado do desenvolvimento da pesquisa, desde a revisão bibliográfica até construção da modelagem no [CST](#). A descrição da abordagem metodológica explica as variáveis e os procedimentos adotados para a realização da pesquisa. A construção do modelo se baseia na modelagem da antena com seus parâmetros no [CST](#).

### 3.1 Revisão Bibliográfica

Existem diferentes enfoques metodológicos para a realização de uma pesquisa científica, sendo os principais o quantitativo e o qualitativo. Essas abordagens apresentam características distintas, mas não são excludentes, podendo ser combinadas em alguns casos ([GODOY, 1995](#)).

A pesquisa qualitativa é aquela que busca compreender os fenômenos em sua complexidade e singularidade, utilizando o ambiente natural como fonte de dados e adotando uma perspectiva descritiva e interpretativa. Já a pesquisa quantitativa é aquela que busca medir e analisar os fenômenos de forma objetiva e sistemática, utilizando métodos estatísticos e experimentais ([SERAPIONI, 2019](#)).

Na área da engenharia, diversas metodologias de pesquisa podem ser empregadas, dependendo do problema e dos objetivos do estudo. Entre as mais comuns, destacam-se o *survey*, a modelagem e simulação, a pesquisa-ação e o estudo de caso ([BERTO; NAKANO, 2000](#)).

Neste trabalho, optou-se pela metodologia de modelagem e simulação, que

consiste em representar matematicamente um sistema real e avaliar o seu comportamento por meio de experimentos computacionais. Essa metodologia se enquadra no enfoque quantitativo, pois visa obter resultados numéricos e precisos sobre o desempenho do sistema estudado.

A modelagem e simulação é uma metodologia amplamente utilizada na engenharia, pois permite estudar sistemas complexos, dinâmicos e não-lineares, que muitas vezes são difíceis ou inviáveis de serem analisados por métodos analíticos ou experimentais (BANKS et al., 2005). Além disso, a modelagem e simulação oferece diversas vantagens, como a redução de custos, tempo e riscos, a possibilidade de testar diferentes cenários e alternativas, e a facilidade de visualização e comunicação dos resultados (LAW, 2014).

No entanto, a modelagem e simulação também apresenta alguns desafios e limitações, que devem ser considerados. Entre eles, estão a validade e a confiabilidade dos modelos e dos dados utilizados, a complexidade e o tempo de execução das simulações, e a interpretação e a generalização dos resultados obtidos (BALCI, 1998). Por isso, é necessário seguir um rigoroso processo de planejamento, construção, verificação, validação e análise dos modelos e das simulações, de acordo com as normas e os critérios estabelecidos pela comunidade científica (SARGENT, 2013).

Neste trabalho, o sistema modelado e simulado é o de um cabo coaxial com slots circulares que irá funcionar como uma antena. O objetivo da modelagem e simulação é avaliar a viabilidade da utilização desse tipo de antena em aplicações reais, com enfoque no 5G. Para isso, serão utilizados modelos matemáticos e serão realizados experimentos computacionais utilizando o software CST.

## 3.2 Descrição da Abordagem Metodológica

Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica abrangente sobre antenas de cabo coaxial, tecnologia 5G, compatibilidade eletromagnética e outros conceitos relacionados. Essa revisão bibliográfica forneceu uma base sólida de conhecimento, permitindo um embasamento teórico adequado para o estudo. Além disso, a revisão ajudou a identificar lacunas nas pesquisas existentes, fornecendo uma direção clara para o desenvolvimento do projeto.

Com base na revisão bibliográfica e nos conhecimentos adquiridos, foram de-

finalizados os parâmetros iniciais do cabo coaxial. Esses parâmetros foram baseados no cabo coaxial *Cellflex® low-loss foam-dielectric coaxial cable* (Anexo I) e incluíram a forma geométrica do cabo, os materiais utilizados e a configuração da antena. A definição desses parâmetros foi fundamental para garantir uma simulação que replicasse a realidade de forma satisfatória no software CST.

A fase inicial da modelagem consistiu na identificação das constantes elétricas e magnéticas dos materiais utilizados. Essas informações foram extraídas do datasheet do cabo coaxial, conforme explicado em detalhes no Anexo I. A análise desses dados permitiu a compilação das informações dessas grandezas na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1 – Parâmetros dos materiais utilizados na modelagem**

Material	Tipo	$\epsilon_0$	$\mu_u$	Cond. Elétrica	Cond. Magnética	Rho
Zinco	Metal com Perdas	-	1	$1,69 \cdot 10^7$	-	7100
Polietileno	Normal	2,28	2,3	$5,5 \cdot 10^{-18}$	920	800
Espuma de Polietileno	Normal	2,28	2,285	$5,5 \cdot 10^{-18}$	920	200
Cobre	Metal com Perdas	-	1	$5,8 \cdot 10^7$	-	8930

Fonte: Dados tabulados a partir do Anexo I.

Em seguida, em conformidade com a literatura e os dados previamente obtidos (que estão detalhados na Tabela 3.1 e no Anexo I) foram determinadas as constantes relacionadas às dimensões físicas do cabo coaxial. Essas constantes incluem as dimensões dos condutores, isolantes, aberturas, comprimento e impedância de entrada, sendo parâmetros que terão impacto direto nos resultados da análise da antena simulada e que todos valores foram descritos e quantificados na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2 – Parâmetros do Cabo Coaxial**

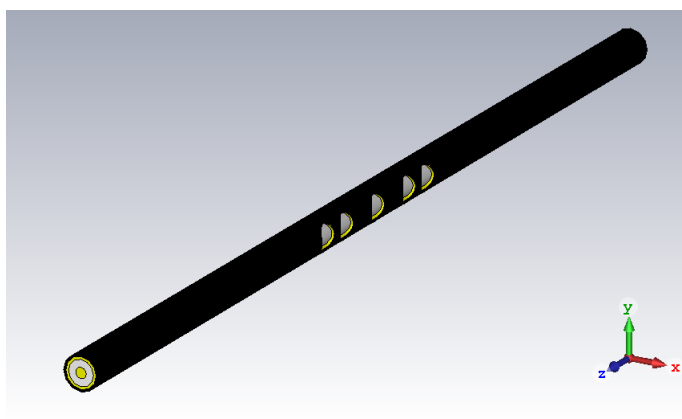
Variável	Descrição	Valor
Comprimento	Comprimento do Cabo Coaxial	(0 - 500) mm
Diametro_fio_interno	Diâmetro do Fio Interno (Cobre)	4,8 mm
Diametro_dieletrico	Diâmetro do Dielétrico (Espuma de Polietileno)	11,3 mm
Diametro_jacket	Diâmetro da Capa (Polietileno)	15,8 mm
Diametro_outro_condutor	Diâmetro da Blindagem (Cobre)	13,8 mm
$Z_0$	Impedância Característica	50 $\Omega$
Raio_abertura	Raio da Abertura do Slot	(1 - 6) mm
Deslocamento_eixo_z	Deslocamento do Slot no Eixo Z	0 mm
Deslocamento_eixo_y	Deslocamento do Slot no Eixo Y	0 mm

Fonte: Autoria Própria.

Após definidas as principais grandezas, foi utilizado o CST para realizar a modelagem do cabo coaxial, seguindo os parâmetros especificados nas Tabelas 3.1 e 3.2. A representação tridimensional do cabo coaxial, com suas dimensões para um configuração cinco aberturas, que podem ser visualizadas na Figura 3.1, que foi

um dos modelos simulados no percorrer do trabalho. As cores utilizadas na modelagem foram escolhidas de acordo com as informações do datasheet fornecido pelo fabricante, conforme descrito no Anexo I.

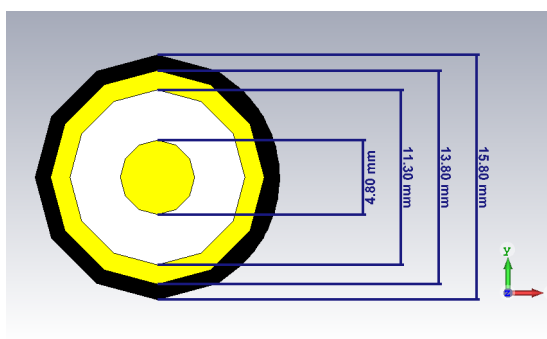
**Figura 3.1** – Cabo Coaxial modelado no CST STUDIO



Fonte: Gerado pelo autor no CST Studio.

Na Figura 3.2, é possível observar os diversas componentes que compõem o cabo coaxial, escolhido por ser o mais próximo do real para poder desenvolver uma aplicação desse modelo. A parte mais interna, com um diâmetro de 4,80 mm, representa o condutor interno (parte em amarelo). Em seguida, encontramos o isolante feito de espuma de polietileno, com um diâmetro de 11,30 mm (parte em branco). A porção amarela mais interna indica o segundo condutor, responsável pela blindagem do condutor interno, sendo feito de cobre e com um diâmetro de 11,80 mm. Finalmente, a capa protetora, em preto, é feita de polietileno e possui um diâmetro total de 15,80 mm. Todos os dados referentes aos diâmetros de cada material foram extraídos do datasheet presente no Anexo I.

**Figura 3.2** – Elementos estruturais do Cabo Coaxial no CST STUDIO

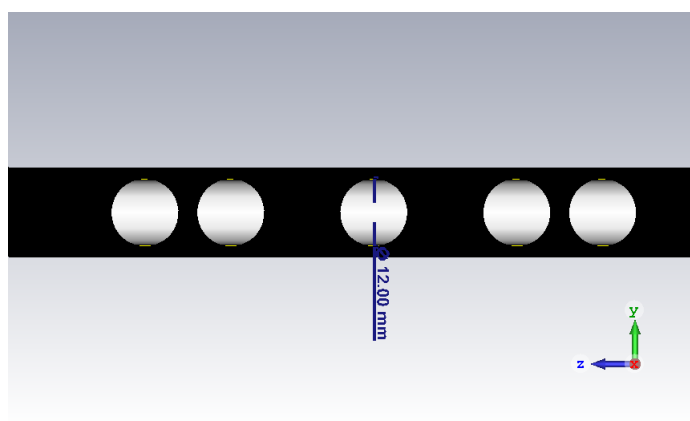


Fonte: Gerado pelo autor no CST Studio.

Na Figura 3.3, estão representados os *slots* ou aberturas no cabo coaxial, que têm formato circular e funcionam como instrumento de irradiação. Conforme especificado na Tabela 3.2, o raio das aberturas variou entre 1 e 6mm. É importante

notar que aberturas menores que 1mm não geram resultados válidos na simulação, enquanto aberturas maiores que 6mm resultam em deformidades que descaracterizam o *slot* circular. Por esse motivo, os valores escolhidos para o raio estão contidos nesse intervalo ( $1 \leq \text{raio} \leq 6, R \in \mathbb{N}$ ).

**Figura 3.3** – Slots gerados no CST STUDIO



Fonte: Gerado pelo autor no CST Studio.

O uso de aberturas circulares se deve à sua simplicidade geométrica e à sua eficiência na irradiação de ondas eletromagnéticas. Além disso, as aberturas circulares permitem uma fácil variação do raio, o que possibilita analisar o efeito desse parâmetro na distribuição do campo elétrico e na densidade de corrente no cabo coaxial. Outros formatos de aberturas, como retangulares, também podem ser utilizados, mas exigem mais parâmetros geométricos e podem apresentar maior complexidade na simulação.

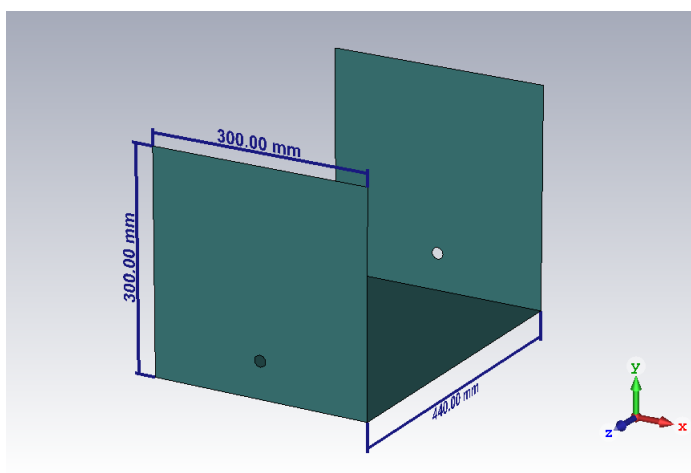
Inicialmente, foi utilizada uma única abertura, e nas tentativas subsequentes, variou-se tanto a quantidade de aberturas quanto as distâncias entre seus centros para otimizar o desempenho do sistema irradiante.

Para a base da estrutura foi utilizado o zinco como material, visto que esse material oferece diversas vantagens significativas. Primeiramente, o zinco é um excelente condutor elétrico, o que o torna ideal para ser usado como uma camada de blindagem ao redor da antena. Essa blindagem protege a antena contra interferências eletromagnéticas externas, minimizando a captação de sinais indesejados e garantindo uma melhor qualidade de recepção ou transmissão.

Outra vantagem significativa da estrutura de zinco é sua capacidade de atuar como uma barreira eficaz contra interferências de outras fontes elétricas ou eletrônicas. Isso melhora a sensibilidade e a eficiência da antena, garantindo uma recepção ou transmissão de sinal mais estável e confiável.

Na Figura 3.4, é possível visualizar a estrutura de zinco desenvolvida por meio do CST, incluindo suas dimensões construtivas. Aberturas circulares foram criadas na modelagem, cada uma com o mesmo diâmetro do cabo coaxial, garantindo que a estrutura de zinco não interfira nos resultados do estudo.

**Figura 3.4** – Estrutura em Zinco gerada no CST STUDIO



Fonte: Gerado pelo autor no CST Studio.

A estrutura foi simulada no CST para projetar o modelo real, que será construído fisicamente e comparado com os resultados da simulação.

# Capítulo 4

## Resultados

Neste capítulo, foram realizadas simulações da antena com diferentes números de slots (1, 2 e 3) e diferentes posições das aberturas circulares. Na seção II - Fase do experimento selecionado será tratado a configuração com cinco slots, melhor resultado alcançado, e as manipulações realizadas para chegar nos resultados apresentado. Os resultados mostram o desempenho da antena em termos de reflexão, transmissão, impedância, irradiação, axial ratio e densidade de corrente, além de correlacionar matematicamente a frequência com o diâmetro das aberturas.

### 4.1 I - Fase experimental

Nesta etapa, a modelagem descrita na seção anterior foi empregada para conduzir uma análise, avaliando a viabilidade de utilizar uma, duas e três aberturas no cabo coaxial. Inicialmente, os valores do parâmetro S (Atenuação em dB) foram examinados para assegurar que estivessem abaixo de -10 dB. Este critério é fundamental para que o modelo possa ser empregado como uma antena, pois indica que a potência refletida é menor que 10% da potência incidente. Além disso, essa análise foi realizada com o objetivo de otimizar o tempo da pesquisa, visto que somente após encontrar resultados satisfatórios nesses parâmetros foram simulados os demais, como impedância, VSWR e Carta de Smith. Também se verificou se a frequência de ressonância alcançava um valor de 3,5 GHz, que é o ideal para uma faixa do 5G.

### 4.1.1 Uma Abertura

Para a configuração primeira configuração foi utilizado um cabo coaxial com comprimento padrão de 500 mm e um *slot*. A partir dessa configuração, foram conduzidas seis simulações utilizando o CST, variando o raio da abertura no intervalo ( $1\text{mm} \leq \text{raio} \leq 6\text{mm}$ ) e os resultados obtidos foram organizados na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1 – Dados Obtidos para uma Abertura Circular**

Raio da Abertura (mm)	Frequência (Gz)	Atenuação (db)	VSWR (db)	Ganho (Mhz)	Impedância ( $\Omega$ )
1	3,937	-0,26301	66,054	0	00,783724 - 03,407960i
2	3,937	-0,25613	67,829	0	10,756175 + 242,665394i
3	3,401	-0,25278	68,7266	0	01,237616 - 41,547193i
4	3,401	-0,31024	56,00135	0	01,534204 - 42,072266i
5	3,399	-0,42779	40,61678	0	02,449257 - 49,677300i
6	3,398	-0,66304	26,21297	0	04,854254 - 62,376024

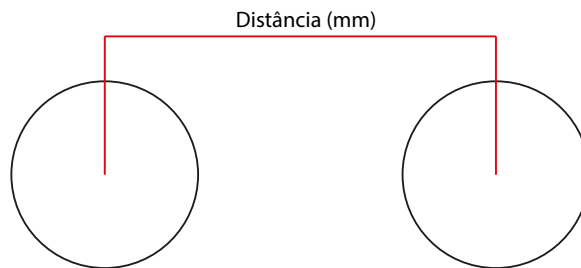
Fonte: Autoria Própria

Ao analisar a Tabela 4.1, observa-se uma relação diretamente proporcional entre o raio da abertura e o módulo da atenuação. Quanto maior o raio da abertura, maior é, em módulo, o valor da atenuação. No entanto, devido à relação observada, aberturas com raio de 6 mm foram exploradas ao longo das próximas subseções.

Como as simulações com uma abertura não apresentaram resultados satisfatórios de atenuação, visto que os valores encontrados estão distantes dos -10 dB desejados, optamos por tentar com duas aberturas almejando melhores resultados. Essa decisão foi tomada para minimizar o tempo de análise.

### 4.1.2 Duas Aberturas

Nesta simulação, foi utilizado o cabo coaxial com o comprimento padrão e um *slot* adicional. O raio das aberturas foi variado de ( $1\text{mm} \leq \text{raio} \leq 6\text{mm}$ ) e a distância entre os centros das aberturas no intervalo ( $2\text{mm} \leq \text{distância} \leq 36\text{mm}$ ), conforme a Figura 4.1.

**Figura 4.1** – Distância entre as duas aberturas

Fonte: Gerado pelo autor no Adobe Illustrator.

Os resultados obtidos foram compilados na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2** – Dados Obtidos para duas Aberturas Circulares

Raio da Abertura (mm)	Distância (mm)	Frequência (GHz)	Atenuação (dB)
1	28	3,7000	-0,48061
1	10	3,7000	-0,63718
2	28	3,7000	-0,52464
3	08	3,6520	-0,38054
3	28	3,7000	-0,57997
4	28	3,6864	-0,41851
5	12	3,6500	-0,58000
5	28	3,6544	-0,94069
5	20	3,6532	-0,91445
6	02	3,3136	-0,67724
6	06	3,3084	-0,78626
6	10	3,7000	-0,50261
6	12	3,6576	-0,69463
6	16	3,6516	-1,88799
6	20	3,6480	-2,98583
6	22	3,6444	-3,66623
6	28	3,6424	-3,30011
6	32	3,6420	-1,66382
6	36	3,4340	-0,59957

Fonte: Autoria Própria.

Ao analisar os dados da Tabela 4.2, verifica-se que os melhores resultados de atenuação foram encontrados quando o raio da abertura foi de 6 mm e as distâncias entre as aberturas variou entre ( $22\text{mm} \leq \text{distância} \leq 28\text{mm}$ ), o que corresponde a aproximadamente  $\frac{1}{4}$  do comprimento de onda da frequência de 3,5 GHz, cujo modelo matemático é dado pela equação 4.1.

$$\gamma = \frac{\text{Comprimento de Onda}}{\text{Distância entre os Slot}} \quad (4.1)$$

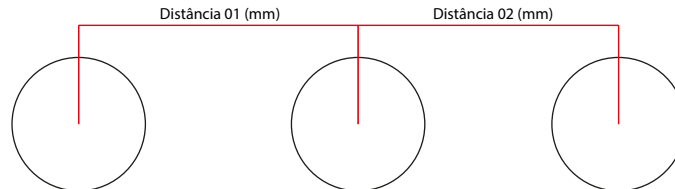
Apesar da melhora considerável em relação à simulação anterior, os valores de atenuação estavam distantes dos -10 dB desejados.

Devido à falta de resultados satisfatórios com duas aberturas, as simulações dos demais parâmetros não foram realizadas. Optamos por tentar com três aberturas almejando melhores resultados. Essa abordagem segue os mesmos princípios adotados nas simulações com apenas uma abertura.

### 4.1.3 Três Aberturas

Na configuração com 3 aberturas, o comprimento padrão cabo coaxial foi mantido, e por conta das simulações anteriores terem mostrados que os melhores resultados foram quando o raio é de 6 mm, esse valor foi utilizado como uma constante nesta configuração. Foram conduzidas 12 simulações, variando as distâncias entre os centros das aberturas no intervalo ( $22\text{mm} \leq \text{distância} \leq 120\text{mm}$ ), conforme mostrado na Figura 4.2.

**Figura 4.2** – Distância entre as três aberturas



Fonte: Gerado pelo autor no Adobe Illustrator.

Os resultados obtidos foram compilados na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3** – Dados Obtidos para três Aberturas Circulares

Distância 01 (mm)	Distância 02 (mm)	Frequência (GHz)	Atenuação (dB)
22	22	3,639	-2,8291099
22	60	3,104	-1,8230454
37	37	3,1119	-1,3329846
40	40	3,19	-0,50121914
50	50	3,646	-2,4040303
50	60	3,374	-3,6818495
50	40	3,906	-3,082877
56,5	56,5	3,1119	-3,6578071
60	60	3,641	-5,7646385
70	70	3,1	-1,8918522
100	100	3,642	-3,809436
120	120	3,105	-3,2446307

Fonte: Autoria Própria.

Ao analisar a Tabela 4.3, observa-se que os melhores resultados de atenua-

ção foram alcançados quando as distâncias entre as aberturas se aproximaram de 60 mm, correspondendo a cerca de  $\frac{3}{5}$  do comprimento de onda da frequência de 3,5 GHz, valor calculado por meio da equação 4.1. Apesar da melhoria significativa em relação as simulações anteriores, os valores de atenuação ainda estavam distantes dos -10 dB desejados.

A partir das análises das configurações com uma, duas e 3 aberturas, foi possível notar uma relação de proporcionalidade entre a quantidade de aberturas e o valor da atenuação. Quanto maior a abertura, maior foi a atenuação encontrada, em módulo.

Para configurações com quatro *slots*, não foram encontrados valores satisfatórios nas primeiras simulações, se assemelhando aos dados das anteriores. Por esse motivo, optamos por seguir para configurações com cinco *slots*.

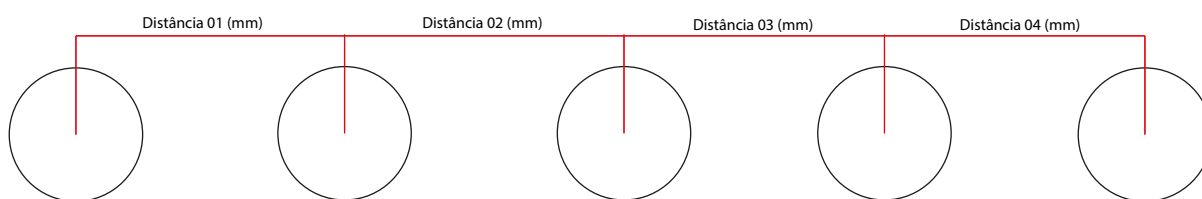
## 4.2 II - Fase do experimento selecionado

Nesta fase, a modelagem descrita na seção anterior foi utilizada para realizar uma análise detalhada, avaliando a viabilidade de utilizar cinco aberturas no cabo coaxial. Inicialmente, os valores do parâmetro S (Atenuação em dB) foram minuciosamente examinados para garantir que estivessem abaixo, em módulo, de -10 dB. Esse critério é fundamental para validar o modelo como uma antena funcional.

### 4.2.1 Cinco Aberturas

Na configuração com cinco aberturas, mostrado na Figura 4.3, manteve-se o comprimento padrão para o cabo coaxial, o raio de 6 mm foi mantido constante, dado que proporcionou os melhores resultados.

**Figura 4.3** – Distância entre as cinco aberturas



Fonte: Gerado pelo autor no Adobe Illustrator.

Nessa configuração, foram realizadas 7 simulações, variando as distâncias

entre os centros das aberturas de ( $20\text{mm} \leq \text{dist\~{a}ncia} \leq 60\text{mm}$ ). Os dados obtidos foram organizados na Tabela 4.4.

**Tabela 4.4 – Dados Obtidos para cinco Aberturas Circulares - Variação das Distâncias**

Raio da Abertura (mm)	Distância 01 (mm)	Distância 02 (mm)	Distância 03 (mm)	Distância 04 (mm)	Frequência (GHz)	Atenuação (dB)
6	20	20	41	41	3,642	-0,98838
6	22	22	44	44	3,638	-11,1762
6	25	25	50	25	3,636	-18,5553
6	30	30	60	60	3,097	-13,7974
6	44	44	88	88	3,871	-0,68617
6	50	50	100	100	3,636	-13,1006
6	60	60	120	120	3,907	-7,20201

Fonte: Autoria Própria.

Ao examinar os dados da Tabela 4.4, destacou-se que os melhores resultados de atenuação foram alcançados quando as distâncias entre as aberturas aproximou-se de 25 mm, correspondendo a cerca de  $\frac{1}{4}$  do comprimento de onda da frequência de 3,5 GHz, valor calculado por meio da equação 4.1. Este resultado permitiu atingir a atenuação desejada de no mínimo -10 dB.

Entretanto, a frequência obtida de 3,636 GHz foi maior os que 3,5 GHz almejados. Com esse resultado fizemos uma análise do comprimento do cabo para ajustar a frequência desejada área (GHz). Foram realizadas 15 simulações com variações no comprimento do cabo coaxial no intervalo ( $150\text{mm} \leq \text{dist\~{a}ncia} \leq 600\text{mm}$ ), considerando a relação proporcional com a frequência.

Essa análise tem por objetivo refinar os parâmetros para obter a atenuação desejada juntamente com a frequência do 5G, levando em consideração tanto as distâncias entre as aberturas quanto o comprimento do cabo coaxial. Os dados obtidos foram organizados na Tabela 4.5.

**Tabela 4.5 – Dados Obtidos para cinco Aberturas circulares - Variação do Comprimento**

Comprimento (mm)	Frequência (Gz)	Atenuação (db)2	VSWR (db)	Ganho (Mhz)	Impedância ( $\Omega$ )
150	3,764	-12,81262	1,6577886	18,1	39,640029 + 19,771883i
200	3,528	-3,2267054	5,445524	0	49,813723 + 96,558872i
212	3,975	-11,007367	1,7839619	7,52	88,227317 - 15,032015i
250	3,379	-14,903684	1,4384618	16,5	72,504162 + 07,911250i
300	3,746	-10,854762	1,8034392	6,5	32,032313 - 14,455714i
350	3,599	-5,0638386	3,5271	0	16,560035 - 17,882435i
375	3,744	-7,9688074	2,3307765	0	26,989580 + 21,277900i
400	3,833	-10,965012	1,7893064	6,1	31,446572 + 12,612228i
425	3,617	-37,00414	1,0286417	16,4	50,165363 + 00,242837i
440	3,5	-23,589693	1,1416665	17,2	52,164255 - 06,854275i
450	3,427	-24,052305	1,1338271	16,7	49,883446 - 06,142813i
475	3,256	-19,026058	1,2519118	12,85	57,558577 + 10,720024i
500	3,636	-18,555306	1,2678202	12,6	64,625607 - 04,329018i
550	3,807	-17,700726	1,2996588	12,2	44,154284 - 10,103392i
600	3,505	-11,696633	1,7031293	6,4	30,423792 - 02,749659i

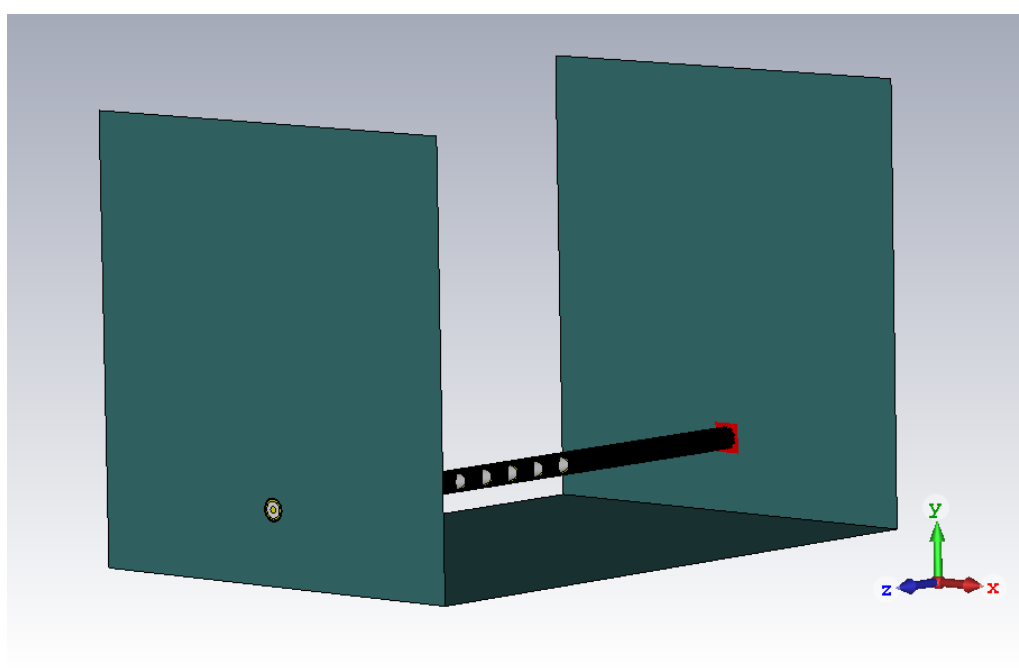
Fonte: Autoria Própria.

Ao examinar os dados da Tabela 4.5, destaca-se que, para um comprimento de cabo de 440 mm, foi possível atingir uma frequência de 3,5 GHz com uma atenu-

ação de  $-23,589693$  dB. Esse resultado valida a primeira parte deste estudo, confirmando a capacidade de ajustar os parâmetros para alcançar a frequência desejada e atenuação necessária.

No final do experimento, verificou-se que este foi o melhor resultado obtido no estudo, pois apresentou os menores valores de atenuação e a maior frequência de ressonância. Este resultado demonstra a possível viabilidade de utilizar o cabo coaxial com cinco *slots* como uma antena para aplicações em 5G. Na Figura 4.4 pode-se visualizar a modelagem referente e esse modelo.

**Figura 4.4** – Modelo do cabo coaxial com cinco slots



Fonte: Gerado pelo autor no CST Studio.

Ao alcançar resultados satisfatórios de atenuação e frequência por meio das simulações no CST, foram conduzidas análises detalhadas dos demais parâmetros, tais como SWR, VSWR, impedância e admitância, além da Carta de Smith e outros elementos essenciais no dimensionamento e projeto de uma antena. Essa abordagem aprofundada permitiu uma compreensão mais completa do desempenho da antena, contribuindo para uma avaliação abrangente e precisa do projeto.

## 4.3 Análise dos Resultados

Nesta seção, serão apresentados e analisados os resultados do experimento da antena, considerando os parâmetros de reflexão, transmissão, impedância, ir-

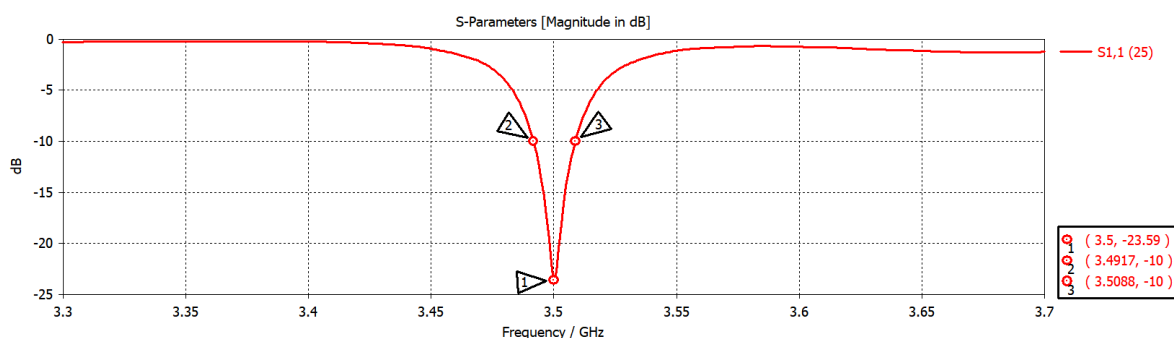
radiação, axial ratio e densidade de corrente. Além disso, será feita uma correlação matemática entre a frequência e o diâmetro das aberturas.

### 4.3.1 Parâmetro S

O processo de simulação para a obtenção do parâmetro  $S_{11}$  envolveu a utilização de cinco aberturas circulares de 6 mm cada em um cabo coaxial com comprimento de 440 mm, conforme detalhado nas seções anteriores. Essa configuração específica foi essencial para a precisão das medições, permitindo alcançar um valor de atenuação maior, em módulo, do que -10 dB, para uma frequência de 3,5 GHz. As aberturas estrategicamente posicionadas, com 25 mm de distância, no cabo coaxial garantiram que o valor do parâmetro  $S_{11}$  se aproximasse ao máximo do valor almejado.

O gráfico representado na Figura 4.5 mostra a relação entre o coeficiente de reflexão da antena e a frequência, abrangendo o espectro de 3,3 GHz a 3,7 GHz. Este gráfico mostra o parâmetro  $S_{11}$  ao longo desse intervalo de frequência. Para a configuração analisada, foi observado um ganho de -23,59 dB na frequência de 3,5 GHz. Esse valor de ganho é inferior ao ideal para tecnologia 5G, que é de -10 dB. Aumentar o coeficiente de reflexão, em módulo, de uma antena possibilita a melhoria da recepção do sinal 5G e a redução das perdas. Esse valor foi obtido por meio das simulações no software CST. Esse foi o primeiro parâmetro analisado no estudo, fornecendo informações essenciais sobre o comportamento da antena.

Figura 4.5 – Parâmetro S



Fonte: Gerado pelo autor no CST Studio.

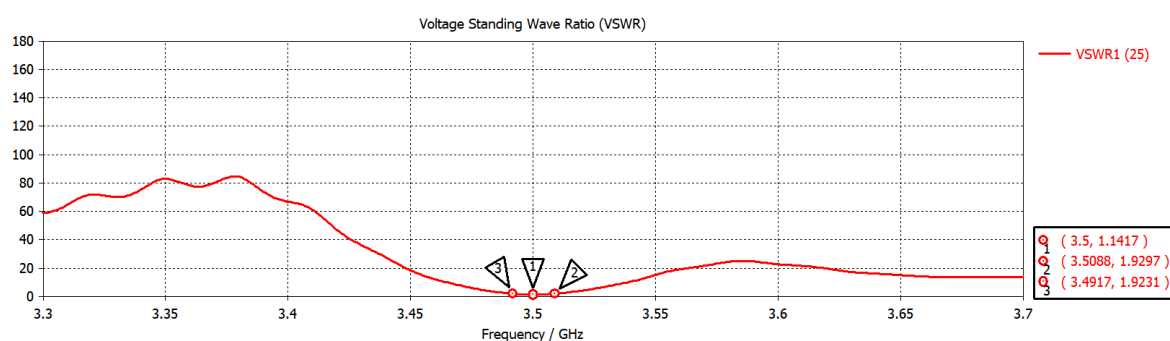
Uma forma alternativa de visualizar o parâmetro  $S_{11}$  pela carta de Smith, que é uma representação polar do coeficiente de reflexão da antena. A carta de Smith permite obter informações sobre a impedância, a admitância, o VSWR e a relação

de onda estacionária da antena. A carta de Smith será explorada nas próximas subseções, mostrando os resultados obtidos para a antena simulada.

### 4.3.2 Voltage Standing Wave Ratio (VSWR)

O **VSWR** encontrado por meio da simulação, visualizado na Figura 4.6, foi de 1,1417, indicando um casamento parcial de impedância entre a antena e o cabo coaxial. Esse parâmetro quantifica a quantidade de energia refletida devido a descontinuidades no sistema. Um **VSWR** de 1,1417 implica que 85,03% da energia da antena está sendo transmitida para o cabo coaxial e, subsequente, para o receptor. Dessa forma, a eficiência do sistema é de aproximadamente 85%, levando em consideração as perdas decorrentes do casamento parcial de impedância que ocorre nesse sistema.

**Figura 4.6** – Voltage Standing Wave Ratio (VSWR)



Fonte: Gerado pelo autor no CST Studio.

Na Figura 4.6 é possível visualizar que o menor valor de **VSWR** há, portanto, um intervalo de frequência para a qual a antena é funcional e à medida que os valores se afastam daquele parâmetro as perdas aumentam. Em nosso estudo como ganho foi calculado como 17,1 **MHz**, indicando a faixa de frequência na qual a antena apresenta um desempenho satisfatório.

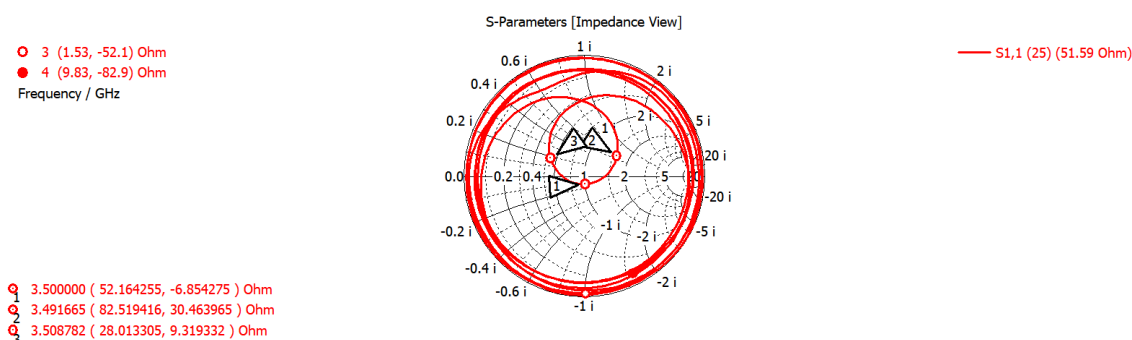
O **VSWR** está relacionado a outros parâmetros que podem ser utilizados para analisar a antena, como o coeficiente de reflexão, a impedância, a admitância, a relação de onda estacionária, o axial ratio e o diagrama de irradiação. O coeficiente de reflexão, a impedância, a admitância e a relação de onda estacionária são proporcionais ao **VSWR**, ou seja, variam na mesma direção. O axial ratio e o diagrama de irradiação são dependentes do **VSWR**, ou seja, variam na direção oposta. Esses parâmetros serão explorados nas próximas subseções, mostrando os resultados

obtidos para a antena simulada.

### 4.3.3 Carta de Smith

A análise começa com a interpretação da posição dos pontos no gráfico da Carta de Smith, conforme mostrado na Figura 4.7. No ponto 01, a impedância a 3,5 GHz é de 51,59  $\Omega$ , enquanto a impedância ideal seria de 50  $\Omega$ . Esta discrepância indica que o casamento de impedância não foi perfeito, indicando a presença de uma componente capacitiva além da resistiva. A discrepância na impedância a 3,5 GHz pode ser causada por vários fatores, tais como: a geometria da antena, a posição das aberturas, a presença de perdas no sistema, entre outros. Esses fatores podem afetar a distribuição de corrente e tensão ao longo do cabo, alterando a relação entre a impedância de entrada e a impedância característica.

Figura 4.7 – Carta de Smith - Casamento de Impedância



Fonte: Gerado pelo autor no CST Studio.

Ao analisar os dados da Figura 4.7, torna-se mais fácil visualizar os padrões de reflexão e refração, proporcionando uma rápida compreensão do casamento de impedância. Essa ferramenta é essencial para avaliar o casamento de impedância, seja em simulações ou em aplicações práticas. Permite uma interpretação imediata dos desvios da impedância ideal (normalmente 50  $\Omega$  em sistemas de radiofrequência), sendo encontrados uma impedância de (52,1644255 -6,854275  $j$ )  $\Omega$ .

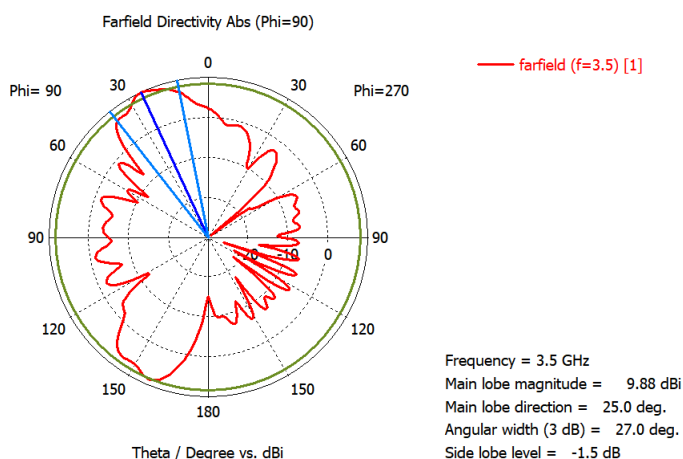
A carta de Smith permite a verificação de questões do diagrama de reflexão, como os pontos de ressonância e de casamento de impedância. Os pontos de ressonância são aqueles em que a impedância da antena é puramente resistiva, ou seja, a parte imaginária é nula. Esses pontos correspondem aos mínimos locais do parâmetro  $S_{11}$  e do  $VSWR$ , indicando uma maior eficiência da antena, sendo repre-

sentados pelos pontos 1,2 e 3 no gráfico da Figura 4.7. Os pontos de casamento de impedância são aqueles em que a impedância da antena é igual à impedância do cabo coaxial, ou seja,  $50 \Omega$ . Esses pontos correspondem aos mínimos globais do parâmetro  $S_{11}$  e do  $VSWR$ , indicando uma menor reflexão da energia no sistema. A carta de Smith mostra esses pontos no centro do círculo, onde o coeficiente de reflexão é zero.

### 4.3.4 Diagrama de Irradiação

A simulação realizada resultou no diagrama de irradiação mostrado na Figura 4.8, que indica que a antena possui um lóbulo principal expressivo, representado pela linha em azul escuro, com largura angular dada pelas linhas em azul claro, e ganho de 9,88 dB. No entanto, a antena também apresenta lóbulos secundários, em vermelho, com magnitude de -1,5 dB, que indicam radiação em direções indesejadas, prejudicando o desempenho da antena e implicando em perda de potência que poderia ser aproveitada para aumentar o ganho na direção desejada.

Figura 4.8 – Diagrama de Irradiação - 2D

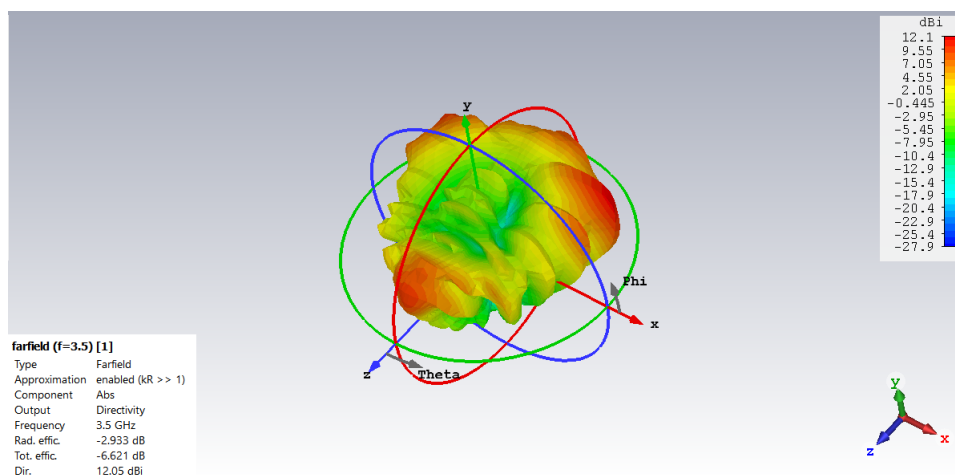


Fonte: Gerado pelo autor no CST Studio.

A Figura 4.9 mostra o padrão de irradiação da antena em três dimensões, o que facilita a visualização de toda a extensão dos lóbulos irradiados. A representação tridimensional proporciona uma visão mais abrangente e detalhada do padrão de irradiação, pois permite uma análise mais precisa dos lobos principais e secundários. As cores do gráfico indicam as regiões com maior e menor diretividade da antena. As regiões em vermelho correspondem às áreas com maior diretividade, ou seja, onde a antena irradia mais intensamente. As regiões em azul

correspondem às áreas com menor diretividade, ou seja, onde a antena irradia menos intensamente. As regiões em verde correspondem às áreas intermediárias.

**Figura 4.9** – Diagrama de Irradiação em três dimensões



Fonte: Gerado pelo autor no CST Studio.

Uma consequência de ter lóbulos secundários tão expressivos é que essa antena não é tão viável para aplicações direcionais, que requerem uma irradiação concentrada em uma direção específica. Aplicações direcionais são comuns em sistemas de comunicação sem fio, radar e sensoriamento, pois vibram em uma alta frequência e requerem uma irradiação concentrada em uma direção específica. A antena simulada em nossa pesquisa, por outro lado, apresenta uma irradiação dispersa em várias direções, o que pode causar perda de sinal e ruído. Portanto, ela pode não ser adequada para essas aplicações, a menos que sejam feitos ajustes na sua configuração com o intuito de reduzir os lóbulos secundários.

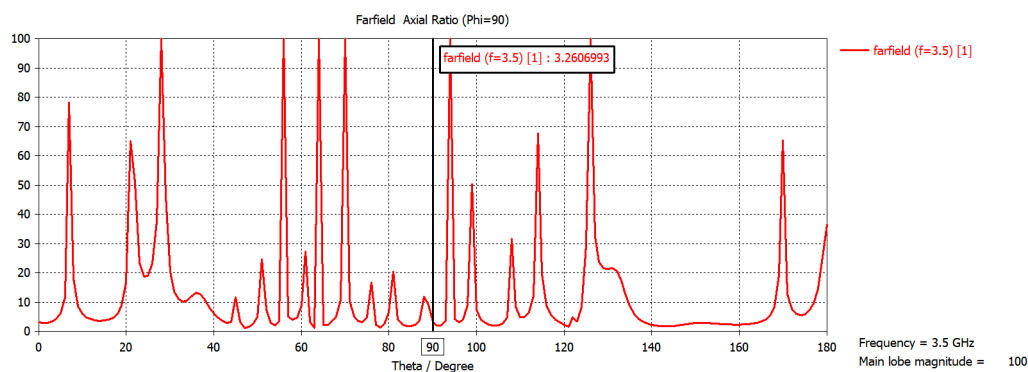
### 4.3.5 Axial Ratio

Os resultados obtidos na simulação do cabo coaxial com slots circulares como uma antena com polarização circular revelou ser promissor, pois os valores encontrados foram próximos de 3 dB são apresentados a seguir. O parâmetro avaliado foi o axial ratio da antena em função do ângulo phi, que é o ângulo azimutal no plano de observação. O axial ratio foi calculado para uma frequência de 3,5 GHz, que é uma das faixas de frequência utilizadas pelo 5G.

A Figura 4.10 mostra o gráfico do axial ratio em função do ângulo phi, obtido

em nossa simulação realizado. Constata-se que o axial ratio varia de acordo com o ângulo phi, apresentando valores mínimos e máximos em diferentes direções.

**Figura 4.10** – Gráfico referente ao Axial Ratio - Retangular

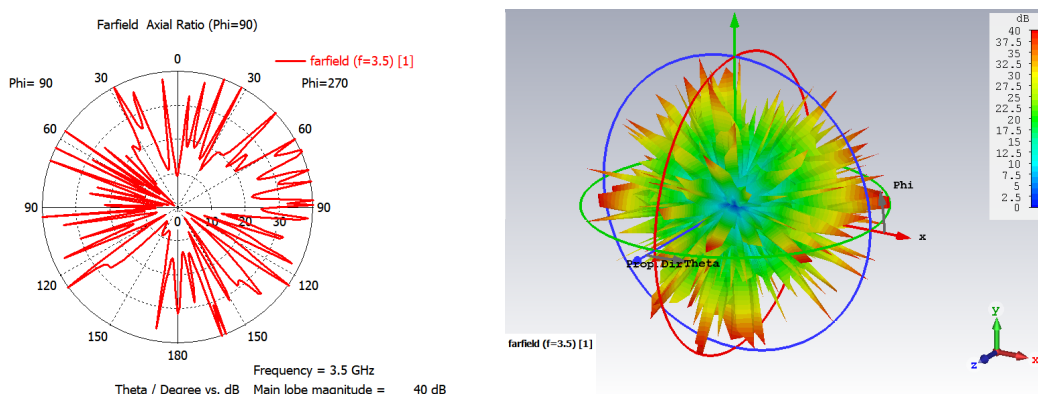


Fonte: Gerado pelo autor no CST Studio.

Para  $\phi = 90$  graus, que é a direção perpendicular ao eixo do cabo coaxial, o axial ratio encontrado foi de 3,26 dB, que é um valor aceitável para uma antena com polarização circular. Esse valor está próximo ao limite de 3 dB, que é comumente usado como referência para definir se uma antena é circularmente polarizada ou elipticamente polarizada. Portanto, pode-se concluir que a antena proposta tem um bom desempenho na direção  $\phi = 90$  graus, sendo adequada para aplicações que requerem polarização circular nessa direção.

Na Figura 4.11, é mostrado o gráfico em coordenadas polares da antena na frequência de 3,5 GHz, assim como a representação tridimensional, que tem por finalidade mostrar a variação da potência irradiada pela antena em função da variação angular. Em nossa análise detectamos que a antena tem um lóbulo principal na direção de 0 graus, com um ganho de 1,77 dB, que indica a direção preferencial de irradiação da antena e tem uma direcionalidade de 90 graus, que é a largura do lóbulo principal a meia potência. Essa direcionalidade indica o grau de concentração da irradiação da antena.

Figura 4.11 – Gráficos do Axial Ratio no CST STUDIO - Polar e 3D



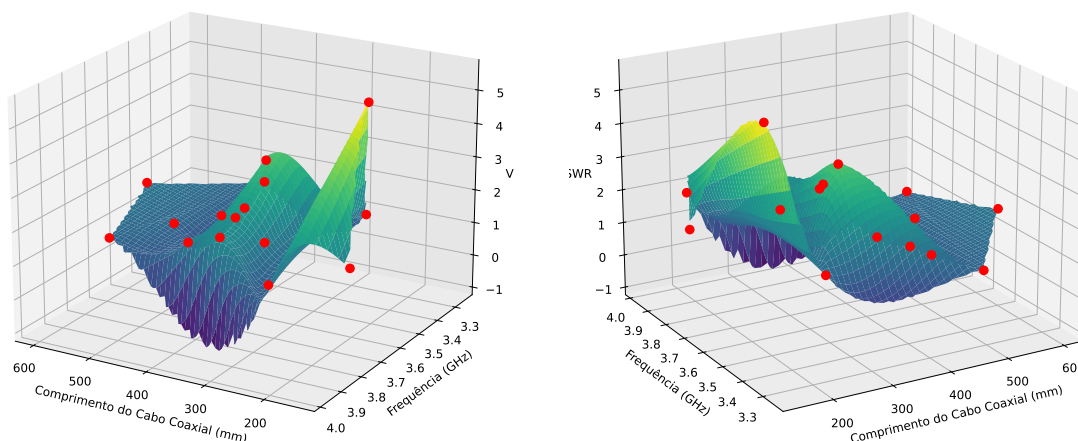
Fonte: Gerado pelo autor no CST Studio.

É importante salientar que todos os parâmetros analisados neste estudo, quando comparados com o parâmetro  $S_{11}$ , o **VSWR**, a impedância, o diagrama de irradiação e o axial ratio, corroboram para o entendimento do projeto da antena como um todo. Esses parâmetros permitem avaliar o desempenho da antena em termos de reflexão, transmissão, irradiação e polarização. Os índices relativos a estes termos alcançaram um resultado entre 1,05 **dB** e 40 **dB**, variando conforme o ângulo.

### 4.3.6 Relação Comprimento, Frequência e VSWR

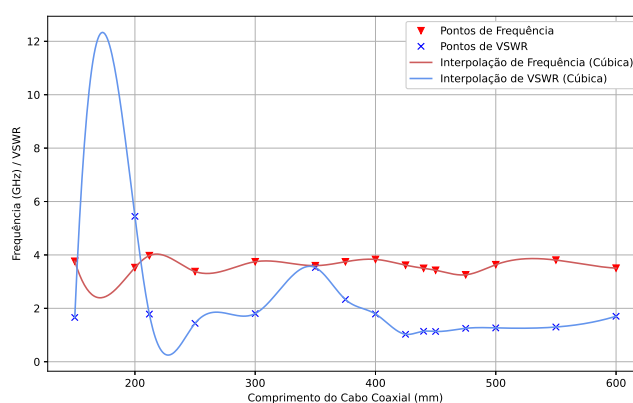
Com base nas simulações realizadas no **CST**, os dados de comprimento do cabo coaxial, frequência encontrada e do **VSWR** foram analisados. Em seguida, foi criado um gráfico com representação tridimensional utilizando a linguagem computacional Python, para aplicarmos a interpolação polinomial e verificarmos o comportamento da frequência e do **VSWR** em relação à variação do comprimento do cabo coaxial.

A Figura 4.12 ilustra essa análise, proporcionando uma visualização do comportamento do **VSWR**,  $S_{11}$  e comprimento do cabo coaxial, assim como o comportamento dessas variáveis em conjunto. Os pontos vermelhos são os valores de simulados. A superfície colorida é uma interpolação polinomial desses pontos. As cores indicam o nível de **VSWR**: quanto mais próximo do azul, menor o **VSWR** e melhor o desempenho da antena; quanto mais próximo do amarelo, maior o **VSWR** e pior o desempenho da antena. As regiões em verde são intermediárias entre o azul e o amarelo.

**Figura 4.12** – Comprimento vs Frequência vs VSWR - 120° e 240°

Fonte: Gerado pelo autor em Python.

Ao inferirmos que registro da Figura 4.12 estabelece as relações entre várias variáveis tomamos como premissa a possibilidade de modelar uma equação geratriz que associasse essas variáveis, no entanto, detectamos ser uma atividade complexa e que seria necessário um estudo focal, com uso de softwares que aproximassem o mais fidedigno possível da realidade. Por este motivo, primamos pela elaboração do gráfico apresentado na Figura 4.13.

**Figura 4.13** – Comprimento do Cabo Coaxial vs Frequência / VSWR

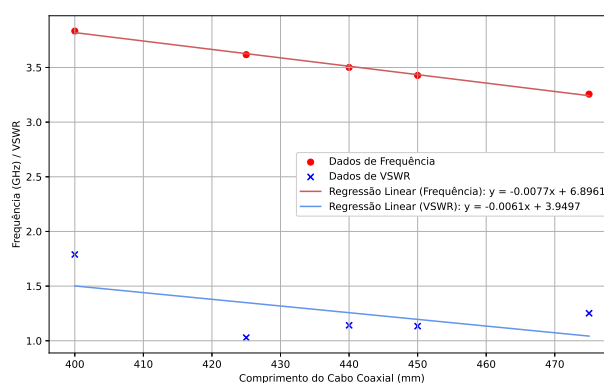
Fonte: Gerado pelo autor em Python.

Essa abordagem visual proporciona uma compreensão mais acessível do comportamento do VSWR e da frequência em relação ao comprimento do cabo coaxial em estudo. Ao utilizar representações visuais, como gráficos, facilitamos a inter-

pretação dos padrões e tendências subjacentes, tornando mais compreensível o impacto das variações no comprimento do cabo coaxial nas variáveis analisadas.

Os dados apresentados na Figura 4.13, revelam que no intervalo de 400 mm a 475 mm, a frequência exibe um comportamento linear, o que nos conduz a uma análise da regressão linear para validar essa suposição. Ao verificarmos essa relação com a Matemática, plotamos os dados obtidos em um plano bidimensional, em que na horizontal estão as variações do comprimento do cabo coaxial e na vertical a variação da frequência associando-os em valores referenciais em um intervalo específico, como pode ser constatados na Figura 4.13.

**Figura 4.14** – Regressão Linear: Comprimento vs Frequência / VSWR



Fonte: Gerado pelo autor em Python.

No intervalo de convergência linear, podemos modelar uma equação representada algebricamente pela expressão  $y = -0,0061x + 3,9497$  que proporcionou uma descrição precisa do comportamento da frequência em relação ao comprimento do cabo coaxial no intervalo de  $(400\text{mm} \leq \text{Comprimento} \leq 475\text{mm})$ . Essa equação não apenas validou a observação inicial de linearidade, mas também se revelou um instrumental para um no ajuste mais preciso do que ocorre localmente em alguns intervalos de frequência quando submetemos um determinado controle sobre o comprimento do cabo com o objetivo de atingir uma frequência específica de 3,5 GHz.

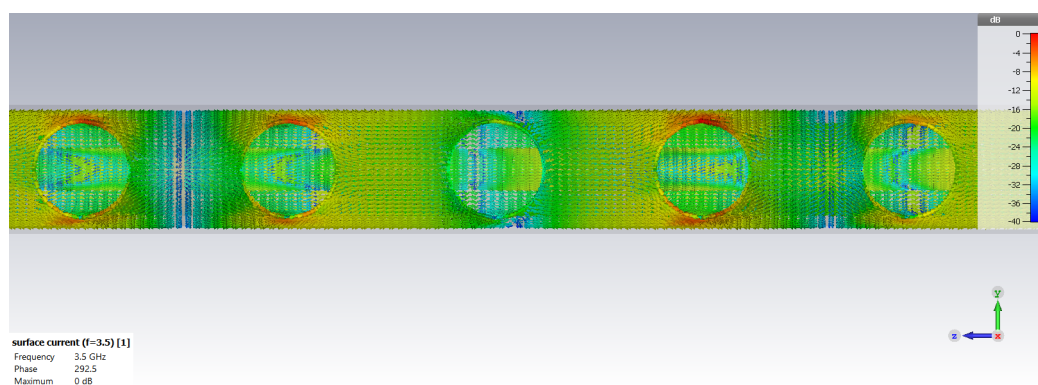
No entanto, é importante observar que o mesmo procedimento foi aplicado ao VSWR, embora os resultados não tenham alcançado a mesma precisão. A análise de regressão para o VSWR revelou desafios na modelagem da relação com o comprimento do cabo coaxial, indicando uma complexidade maior ou a necessidade de envolvimento de outras variáveis não consideradas. Esse aspecto ressalta

a necessidade de abordagens mais detalhadas ou a consideração de fatores adicionais na otimização do **VSWR** em futuras iterações do projeto.

### 4.3.7 Densidade de Corrente

Como destacamos na seção 2.6, a densidade da corrente desempenha o papel de avaliar as principais perdas que ocorrem nas antenas e quanto da energia transmitida é refletida de volta a fonte. Em nosso estudo, ao simularmos a antena verificamos que em certas regiões do cabo coaxial há uma concentração de corrente. Por intermédio do **CST**, podemos configurar a Figura 4.15, que destaca a relação entre a intensidade da concentração da corrente usando as cores azul e vermelha e as perdas relacionadas à temperatura.

**Figura 4.15** – Densidade de Corrente



Fonte: Gerado pelo autor no CST Studio.

Por meio da análise da densidade de corrente, foi possível notar um aquecimento em certas regiões das aberturas do cabo coaxial, sendo que quanto mais próximo do azul, menor é a corrente que passa por determinado local, e quanto mais próximo do vermelho, maior é a mesma. No entanto, esse aquecimento é significativamente menor que em aberturas retangulares, que registram uma densidade de corrente entre 0 A e 70 A, conforme registrado na literatura sobre o tema. A escolha pelo slots circulares proporcionou uma redução da perda por efeito joule, fazendo assim que a perda por efeito Joule seja reduzida, aumentando assim a eficiência da antena simulada em questão.

Ao final do nosso experimento reconhecemos a eficácia do programa **CST** para a simulação de antenas com cinco slots circulares, espaçamento entre eles de 25 mm e com cabos coaxiais de 440 mm e com o axial ratio de 3,26 dB, aceitável

para uma antena com polarização circular. Com esta configuração a antena atingiu a frequência de 3,5 GHz que possibilitou o menor valor de VSWR, com ganho de 17,1 MHz e a atenuação de - 23,589693 dB.

No que se refere a Carta de Smith a irradiação foi dispersa e o grau de impedância alcançado no nosso experimento foi de 51,59  $\Omega$  (o ideal seria 50  $\Omega$ ), dado relevante para termos a ciência de que o casamento de impedância não foi perfeito, o que indica a presença de uma componente capacitiva, além da resistiva. No entanto, quando expandimos o gráfico para a visualização 3D a variação da potência irradiada pela antena em função da variação angular atingiu o ângulo ideal, com um lóbulo principal na direção de 0 graus, um ganho de 1,77 dB e direcionalidade de 90 graus, que é a largura do lóbulo principal a meia potência.

Detectamos ainda que existe no diagrama de irradiação alguns lóbulos secundários que causam interferência no sistema das antenas e reduz sua eficiência. A relação que estabelecemos entre o comprimento do cabo coaxial, a frequência e VSWR e a representação no programa Python, nos permitiu detectar um padrão linear e a modelação de uma equação matemática, que se ajustava a um intervalo de frequência específico (sem garantias para outros).

Quanto a densidade de corrente foi possível verificar um aquecimento em certas regiões das aberturas do cabo coaxial, mas se comparados com estudos realizados com aberturas retangulares foi inferior aos índices apresentados nestas pesquisas.

$$y = mx + c \tag{4.2}$$

Sendo que:

- y  $\Rightarrow$  Variável Dependente de x;
- m  $\Rightarrow$  Inclinação da Reta;
- x  $\Rightarrow$  Variável Independente;
- c  $\Rightarrow$  Interseção y;

## Capítulo 5

### Considerações Finais

O desenvolvimento da pesquisa exigiu muito tempo nas simulações executadas no CST e a cada variação realizada no comprimento do cabo coaxial e no número de slots uma nova demanda por tempo para processamento era solicitada. Inicialmente, não se entendia como fazer a leitura conjunta dos dados que eram processados, analisou apenas os gráficos que apresentavam a frequência e a atenuação, mas eles estavam bem distantes do objetivo de alcançar a frequência de 3,5 GHz.

Foi apenas quando se percebeu a importância da impedância, da Carta de Smith e do VSWR que se avançou nas simulações, com resultados que se mostravam cada vez mais promissores, até alcançar-se a configuração de cinco slots circulares de diâmetro 6 mm, com cabo coaxial e uma distância entre eles de 25 mm. Estas medidas proporcionaram ao experimento a frequência desejada de 3,5 GHz, com atenuação de -23,589693 dB, acima dos -10 dB ideais, e o menor valor de VSWR com ganho satisfatório de 17, 1 MHz. Para a impedância, a irradiação ocorreu de forma difusa e atingiu 51,59  $\Omega$ , superior aos 50  $\Omega$  considerados como ideal, o que mostra que haverá perdas devido ao casamento de impedância parcial.

Este resultado possibilitou atingir o primeiro objetivo específico que consistia em avaliar, por meio de simulações computacionais com o CST, as propriedades eletromagnéticas e estruturais do cabo coaxial na transmissão de sinais de alta frequência para a tecnologia 5G. No entanto, detectou-se que a análise conjunta destas estruturas precisavam ser apresentadas de forma integrada, por meio de gráficos bi e tri dimensionais, bem como, por representações algébricas modeladas por equações que descrevessem um padrão.

---

Outro desafio emergiu, pois a modelagem matemática em situações experimentais envolvem cálculos numéricos com várias variáveis que podem interferir no aumento do erro e das discrepâncias na conduta das interpretações dos resultados. O auxílio da modelagem computacional para minimizar os arredondamentos que se fazem necessários seria promissor, entretanto, a complexidade dos cálculos envolve uma gama de conhecimentos matemáticos e experimentos que caberia uma pesquisa só voltada para esta demanda.

Optou-se por um recorte, restringindo ao uso de programas e linguagem de fácil acesso que levassem a resultados concisos, como o [CST](#), o Python, a interpolação polinomial, a regressão linear, a Carta de Smith, entre outros recursos, para visualizar e modelar as relações entre as variáveis. Essa abordagem multifacetada exigiu um conhecimento aprofundado dos conceitos eletromagnéticos e matemáticos envolvidos, bem como, uma capacidade de síntese e interpretação dos dados. Além disso, foi preciso considerar as limitações e as incertezas de cada método, buscando validar os resultados por meio de diferentes fontes de pesquisa.

Na busca por estabelecer uma relação entre o comprimento do cabo coaxial, a frequência e o [VSWR](#) descobriu-se um padrão linear, que permitiu que se aplicasse o conceito de regressão linear e para a visualização em um gráfico tridimensional usou-se a linguagem Python, o que possibilitou desenvolver um modelo de equação linear que representasse a relação em um intervalo de frequência. Com este avanço alcançou-se o segundo objetivo específico: realizar modelagens matemáticas para investigar as características eletromagnéticas e estruturais do cabo coaxial na transmissão de sinais na frequência de 3,5 [GHz](#) com o objetivo de obter informações precisas sobre seu desempenho e potencialidades.

Os resultados alcançados nas simulações mostraram que a exploração da Carta de Smith proporcionou uma visão abrangente do casamento de impedância, indicando discrepâncias na componente capacitiva, além da resistiva. A utilização dessa ferramenta auxiliou a avaliação dos desvios da impedância ideal, fornecendo informações importantes para ajustes e otimizações em projetos de alta frequência. Além disso, a análise do Diagrama de Irradiação revelou padrões complexos que, embora apresentassem lóbulos irradiados expressivos, também apontaram para módulos secundários, sugerindo a possibilidade de interferências que podem impactar a eficiência do sistema.

A avaliação do Axial Ratio demonstrou que, para a direção perpendicular ao eixo do cabo coaxial, a antena proposta apresenta um desempenho satisfatório,

---

com um valor de 3,26 dB próximo ao limite de 3 dB utilizado como referência para polarização circular. A regressão linear aplicada ao comportamento da frequência indicou um controle preciso sobre o comprimento do cabo, facilitando a sintonia para a frequência desejada.

No tocante à densidade de corrente, a análise revelou um aquecimento em certas regiões do cabo coaxial, embora esse efeito tenha se mostrado significativamente menor em comparação com aberturas retangulares, contribuindo para a eficiência da antena. No entanto, a complexidade na modelagem da relação entre o VSWR e o comprimento do cabo coaxial destaca a necessidade de considerar fatores adicionais para otimizar esse parâmetro em futuras iterações do projeto.

A partir dos resultados descritos anteriormente, foi possível responder à questão de pesquisa: Quais características matemáticas, eletromagnéticas e estruturais do cabo coaxial permitem melhorar a cobertura e o alcance da transmissão de sinais com frequência adequada para a tecnologia 5G?

Em resposta, observou-se que matematicamente as funções de várias variáveis aparecem: nos modelos de equações para o cálculo de reflexão; na Carta de Smith, quando representada em um plano bidimensional se assemelha a um cardioides em coordenadas polares, em que a sua representação geométrica é um diagrama polar que expressa um número complexo, formado pela parte imaginária e a parte real. Em um plano tridimensional, os dados de contorno da carta de Smith quando transferidos para uma determinada altura, passam a ter relação com a esfera e o uso das coordenadas esféricas se faz necessário, passagens comuns aos estudantes que cursaram a componente curricular, Cálculo Diferencial e Integral. Acrescenta-se a este contexto, o uso da regressão linear como uma possibilidade de modelar uma equação em um intervalo de frequência estabelecido o que possibilita verificar o ponto máximo e mínimo de ondas estacionárias e com esta posição calcular o valor da impedância.

No que diz respeito as características eletromagnéticas e estruturais do cabo coaxial no modelo simulado, detectou-se que uma antena com cabo axial com as configurações registradas anteriormente proporcionaram a frequência, a atenuação e o VSWR dentro dos padrões estabelecidos como favoráveis para a tecnologia 5G. Entretanto, a impedância está sujeita a interferências pois não alcançou os 50  $\Omega$  desejados.

Ao final das simulações e avaliações dos resultados obtidos, concluiu-se que o objetivo geral foi alcançado e que o aprimoramento de antenas para tecnologia

---

5G na faixa de frequência de 3,5 GHz com cabos axiais como elemento estrutural é uma realização possível de ser colocada em prática com vistas a melhoria da transmissão de sinais de forma mais eficaz.

## Capítulo 6

### Sugestões para Trabalhos Futuros

Neste trabalho, foram projetadas e simuladas antenas de 5G na faixa de 3,5 GHz, usando cabos coaxiais Cellflex com aberturas circulares como elementos estruturais. As antenas apresentaram uma baixa largura de banda, um baixo nível de reflexão e uma boa cobertura de radiação na faixa de interesse. Como trabalhos futuros, sugere-se:

- ▶ Aprimorar os parâmetros e as características das aberturas circulares para aumentar o ganho.
- ▶ Explorar aberturas hexagonais, que podem melhorar o desempenho das antenas e permitir diferentes configurações e formas geométricas.
- ▶ Testar novas configurações e aberturas, utilizando diferentes formas geométricas, tamanhos e disposições, para obter antenas diversas.
- ▶ Avaliar outros tipos de cabos coaxiais, que podem oferecer vantagens em termos de resistência, flexibilidade, custo e facilidade de instalação, e influenciar nas propriedades elétricas e mecânicas das antenas.
- ▶ Ampliar as pesquisas e estudos envolvendo modelagem matemática, trazendo o auxílio de programas de computadores que possibilitem representar algebricamente equações que retratem associações entre os elementos estruturais das antenas.
- ▶ Construir e medir a antena proposta, utilizando os materiais e equipamentos adequados, e comparar os resultados obtidos com os valores teóricos e simulados, verificando a eficiência e a viabilidade da antena.

---

São algumas sugestões que emergiram do nosso estudo e que nos pareceram interessantes para criarmos hipóteses a serem validadas por experimentos.

# REFERÊNCIAS

5G, P. *Aveiro Tech City: entre nos bastidores do único laboratório urbano 5G em Portugal*. 2021. Disponível em: <<https://portal5g.pt/noticias/aveiro-tech-city-entre-nos-bastidores-do-unico-laboratorio-urbano-5g-em-portugal/>>. ( Citado na página 2. )

Agilent Technologies. *User's Guide. Agilent Technologies 8712ES and 8714ES RF Network Analyzers*. [S.l.], 2001. 2001. ( Citado na página 10. )

ANATEL. *5G - Agência Nacional de Telecomunicações*. 2021. Disponível em: <<https://informacoes.anatel.gov.br/paineis/acompanhamento-e-controle/5g>>. ( Citado na página 7. )

ANATEL. *Boletim de Serviço Eletrônico em 04/07/2022*. [S.l.], 2022. ATO Nº 9064, DE 28 DE JUNHO DE 2022. Disponível em: <[https://sei.anatel.gov.br/sei/publicacoes/controlador\\_publicacoes.php?acao=publicacao\\_visualizar&id\\_documento=9850633&id\\_orgao\\_publicacao=0](https://sei.anatel.gov.br/sei/publicacoes/controlador_publicacoes.php?acao=publicacao_visualizar&id_documento=9850633&id_orgao_publicacao=0)>. ( Citado na página 7. )

ANATEL, A. N. de T. *Tecnologia 5G*. 2023. <<https://www.gov.br/anatel/pt-br/assuntos/5G/tecnologia-5g>>. Acesso em: 18 de abril de 2023. ( Citado na página 2. )

BALANIS, C. A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. 4th. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2016. ( Citado 3 vezes nas páginas 5, 18, and 19. )

BALCI, O. Verification, validation, and testing. *The handbook of simulation*, Wiley New York, p. 335–393, 1998. ( Citado na página 28. )

BANKS, J. et al. *Discrete-event system simulation*. [S.l.]: Pearson Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, 2005. ( Citado na página 28. )

BASSANEZI, R. C. *Ensino-aprendizagem com modelagem matemática: uma nova estratégia*. [S.l.]: Contexto, 2011. ( Citado 2 vezes nas páginas 23 and 24. )

BASSANEZI, R. C. *Modelagem Matemática: teoria e prática*. São Paulo: Contexto, 2015. ( Citado na página 24. )

BERTO, R. M. v. S.; NAKANO, D. N. A. Produção científica nos anais do encontro nacional de engenharia de produção: Um levantamento de métodos e tipos de pesquisa. *Produção*, v. 9, n. 2, p. 65–76, 2000. ( Citado na página 27. )

CERTI. Tecnologia 5g: como essa inovação vai revolucionar os negócios. *CERTI Insights*, março 2022. Disponível em: <<https://www.certi.org.br/tecnologia-5g-como-essa-inovacao-vai-revolucionar-os-negocios/>>. (Citado na página 7.)

CHEIN, F. *Introdução aos modelos de regressão linear: Um passo inicial para compreensão da econometria como uma ferramenta de avaliação de políticas públicas*. Brasília, Brazil: Enap Escola Nacional de Administração Pública, 2023. ISBN 978-85-256-0115-5. (Citado 2 vezes nas páginas 25 and 26.)

CHEVALLARD, Y. La tad face au professeur de mathématiques. *Communication au S'eminare DiDiST de Toulouse*, 2009. Disponível em: <[http://yves.chevallard.free.fr/spip/spip/article.php?id\\_article=162](http://yves.chevallard.free.fr/spip/spip/article.php?id_article=162)>. (Citado na página 23.)

CST. *CST Studio Suite*. 2023. Disponível em: <<https://edctecnologia.com.br/solucoes/cst-studio-suite/>>. (Citado 2 vezes nas páginas 21 and 22.)

FARUQUE, M. R. I. et al. Inspirasi antenna metabahan yang boleh dikonfigurasi untuk komunikasi 5g. *Sains Malaysiana*, v. 48, n. 10, p. 2257–2264, 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.17576/jsm-2019-4810-22>>. (Citado na página 8.)

FREEPIK. *Freepik*. 2023. Disponível em: <<https://br.freepik.com/>>. (Citado 2 vezes nas páginas 6 and 19.)

GENTIL, V. *Corrosão*. [S.l.]: Editora LTC, 2011. (Citado na página 21.)

GODOY, A. S. Introdução à pesquisa qualitativa e suas possibilidades. *Revista de Administração de Empresas*, v. 35, n. 2, p. 57–63, 1995. (Citado na página 27.)

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentos de Física*. [S.l.]: LTC Editora, 2016. (Citado na página 20.)

HELERBROCK, R. *Rede 5G*. 2023. <<https://www.mundoeducacao.uol.com.br/informatica/rede-5g.htm>>. [Online; accessed 20-Set-2023]. (Citado na página 7.)

IEEE. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, AP-17, n. 3, May 1969. IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas. (Citado na página 5.)

KENEDY, M. G. d. S.; NOVO, M. S.; FONTGALLAND, G. Desenvolvimento e avaliação de procedimento para a medida do fator de qualidade da blindagem de cabos coaxiais e conectores blindados. *Revista Brasileira de Aplicações de Engenharia Biomedica*, v. 37, n. 2, p. 1–13, 2023. (Citado na página 3.)

LAW, A. M. *Simulation modeling and analysis*. [S.l.]: McGraw-Hill Education New York, NY, 2014. (Citado na página 28.)

MECANICA, P. E. *Elementos Finitos*. 2016. Disponível em: <[\[1\]\(https://petmecanica.ufes.br/elementos-finitos\)](https://petmecanica.ufes.br/elementos-finitos)>. (Citado na página 23.)

MONTENEGRO, K. L. A. *Compatibilidade e Interferência Eletromagnética*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Anhanguera Uniderp, Campo Grande, 2020. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de graduado em Engenharia Elétrica. ( Citado na página 2. )

NETO, A. S. e. S. *Antenas de Microfita para 4G, 5G e Arranjo de Antenas Cilíndricas*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), 2023. ( Citado na página 9. )

NOGUEIRA, A. F. L. Analysis of cylindrical coaxial cables using finite element technique. Joinville, Santa Catarina, Brazil, 2023. ( Citado na página 8. )

POZAR, D. M. *Microwave engineering*. [S.l.]: John Wiley Sons, 2011. ( Citado 2 vezes nas páginas 18 and 19. )

RODRIGUES, M. de C. A. Antena de abertura em linha coaxial para sistema de telefonia celular da quinta geração (5g). 2022. Disponível em: <[https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/25902/TCC\\_Mauricio\\_Castro\\_Abrahao\\_Rodrigues.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/25902/TCC_Mauricio_Castro_Abrahao_Rodrigues.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. ( Citado na página 3. )

SANTOS, K. M. G. et al. The coaxial cable functioning as an antenna. In: *Proceedings of the Conference*. [S.l.: s.n.], 2018. ( Citado na página 8. )

SANTOS, K. M. G. d. *Medição do Fator de Blindagem de Cabos Coaxiais*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2011. ( Citado 3 vezes nas páginas 2, 10, and 12. )

SARGENT, R. G. Verification and validation of simulation models. *Journal of simulation*, Springer, v. 7, n. 1, p. 12–24, 2013. ( Citado na página 28. )

SERAPIONI, M. Métodos qualitativos e quantitativos na pesquisa social em saúde: algumas estratégias para a integração. *TEMAS LIVRES FREE THEMES*, 2019. ( Citado na página 27. )

SILVA Ítala Liz da C. S. Do 1g ao 5g: Evolução das redes de telefonia móvel. Cruz das Almas, 2016. ( Citado na página 6. )

TANENBAUM, A. S.; WETHERALL, D. *Redes de Computadores*. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011. ( Citado na página 2. )

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. *Física para Cientistas e Engenheiros*. [S.l.]: LTC Editora, 2012. ( Citado na página 21. )

UNESP, U. E. P. *Ondas e Linhas de Comunicações: Capítulo 6 – Métodos Gráficos em LT (Smith Chart)*. Ilha Solteira: Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - FEIS, Departamento de Engenharia Elétrica - DEE, 2018. ( Citado na página 18. )

VALLE, R. R. M. do. *FUNDAMENTOS DE ANTENAS: Um curso Introdotório*. [S.l.]: UFPB, 2008. ( Citado na página 7. )

VSWR. *VSWR - Voltage Standing Wave Ratio*. 2023. Disponível em: <<https://www.antenna-theory.com/definitions/vswr.php>>. (Citado na página 14.)

WENTWORTH, S. M. *Eletromagnetismo Aplicado Abordagem Antecipada das Linhas de Transmissao*. Location: Publisher, 2009. ISBN 978-85-7780-426-9. (Citado na página 7.)

YANG, F.; RAHMAT-SAMII, Y. Wideband circularly polarized antennas and arrays: A review. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, IEEE, v. 50, n. 4, p. 37–49, 2008. (Citado 2 vezes nas páginas 18 and 20.)

# **ANEXO I**

## **Datasheet Cabo Coaxial**



## 1/2" CELLFLEX® Low-Loss Foam-Dielectric Coaxial Cable

CELLFLEX® 1/2" low loss flexible cable

### FEATURES / BENEFITS

- ➔ **Low Attenuation**  
The low attenuation of CELLFLEX® coaxial cable results in highly efficient signal transfer in your RF system.
- ➔ **Complete Shielding**  
The solid outer conductor of CELLFLEX® coaxial cable creates a continuous RFI/EMI shield that minimizes system interference.
- ➔ **Low VSWR**  
Special low VSWR versions of CELLFLEX® coaxial cables contribute to low system noise.
- ➔ **Outstanding Intermodulation Performance**  
CELLFLEX® coaxial cable's solid inner and outer conductors virtually eliminate intermods. Intermodulation performance is also confirmed with state-of-the-art equipment at the RFS factory.
- ➔ **High Power Rating**  
Due to their low attenuation, outstanding heat transfer properties and temperature stabilized dielectric materials, CELLFLEX® cable provides safe long term operating life at high transmit power levels.
- ➔ **Wide Range of Application**  
Typical areas of application are: feedlines for broadcast and terrestrial microwave antennas, wireless cellular, PCS and ESMR base stations, cabling of antenna arrays, and radio equipment interconnects.



1/2" CELLFLEX® Low-Loss Foam Dielectric Coaxial Cable

### Technical Features

#### APPLICATIONS

Applications	OEM jumpers, Main feed transitions to equipment, GPS lines, intended for outdoor usage
--------------	--

#### STRUCTURE

Cable Type		Foam-Dielectric, Corrugated
Size		1/2"
Jacket Option		Black
Inner Conductor	mm (in)	4.8 (0.19) Copper-Clad Aluminum Wire
Dielectric	mm (in)	11.3 (0.44) Foam Polyethylene
Outer Conductor	mm (in)	13.8 (0.54) Corrugated Copper
Jacket	mm (in)	15.8 (0.62) Polyethylene, PE

#### ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Impedance	Ω	50 +/- 1
Maximum Frequency	GHz	8.8
Velocity	%	88.0
Capacitance	pF/m (pF/ft)	76 (23.2)
Inductance	μH/m (μH/ft)	0.19 (0.058)
Peak Power Rating	kW	38.0
RF Peak Voltage	Volts	1950.0
Jacket Spark	Volt RMS	8000.0
Inner Conductor dc Resistance	Ω/1000 m (Ω/1000 ft)	1.57 (0.48)
Outer Conductor dc Resistance	Ω/1000 m (Ω/1000 ft)	3.25 (0.99)
Return Loss (VSWR) Performance		Standard for 40-5925 MHz, Premium according to B-Class
Min. Return Loss (Max. VSWR)	dB (VSWR)	Standard 20 (1.222), Premium 24 (1.135)
Phase Stabilized		Phase stabilized and phase matched cables and accessories are available upon request.
Temperature & Power		Standard

#### MECHANICAL SPECIFICATIONS

Cable Weight, Nominal	kg/m (lb/ft)	0.187 (0.13)
Minimum Bending Radius, Single Bend	mm (in)	70 (3)
Minimum Bending Radius, Repeated Bends	mm (in)	125 (5)
Bending Moment	Nm (lb*ft)	6.5
Tensile Strength	N (lb)	1100 (247)
Recommended / Maximum Clamp Spacing	m (ft)	0.6 / 1 (2 / 3.25)