



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIAS ELÉTRICA E BIOMÉDICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

THIAGO DAS NEVES CHAVES

**PROJETO E SÍNTESE DE ARRANJO DE ANTENAS BASEADO
EM MODELO DE REGRESSÃO PARA APLICAÇÕES NO
SISTEMA 5G DA REGIÃO AMAZÔNICA**

**BELÉM-PA
2025**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIAS ELÉTRICA E BIOMÉDICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

THIAGO DAS NEVES CHAVES

**PROJETO E SÍNTESE DE ARRANJO DE ANTENAS BASEADO
EM MODELO DE REGRESSÃO PARA APLICAÇÕES NO
SISTEMA 5G DA REGIÃO AMAZÔNICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharias Elétrica e Biomédica (FEEB) do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Miércio Cardoso de Alcântara Neto

Coorientadora: Prof^ª. Me. Danila Araújo Santos

**BELÉM-PA
2025**

THIAGO DAS NEVES CHAVES

PROJETO E SÍNTESE DE ARRANJO DE ANTENAS BASEADO EM MODELO DE REGRESSÃO PARA APLICAÇÕES NO SISTEMA 5G DA REGIÃO AMAZÔNICA

Este trabalho foi julgado adequado em ____/____/____ para a obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista, aprovado em sua forma pela banca examinadora que atribuiu o conceito

_____.

Prof. Dr. Miércio Cardoso de Alcântara Neto

(FEEB/ITEC/UFPA - Orientador)

Prof^a. Me. Danila Araújo Santos

(Pesquisadora PPGEE/ITEC/UFPA - Coorientadora)

Prof. Dr. Bruno Souza Lyra Castro

(Facomp/UFPA Castanhal - Examinador Externo)

Eng. Kleysson Souza de Oliveira

(Pesquisador PPGEE/ITEC/UFPA- Examinador Interno)

Prof^a. Dr^a. Carminda Célia Moura de Moura Carvalho

(FEEB/ITEC/UFPA - Diretora da FEEB)

*Este trabalho é dedicado aos meus pais e avós,
cujo apoio incondicional e sacrifício
tornaram possível esta conquista.*

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho é fruto dos esforços empregados ao longo desses anos de jornada na graduação, contudo, sem ajuda e apoio de pessoas importantes nada disso seria possível. Primeiramente, não posso deixar de agradecer o apoio incondicional da minha família, principalmente agradecer meus pai Raimundo e minha mãe Patrícia por apoiarem meus sonhos e objetivos e me dar totais condições para continuar num curso tão difícil que é o de engenharia elétrica, com seus conselhos e suas motivações desde minha infância, então, este trabalho também é de vocês.

Agradecer meus avós, Zezé e Paulino, por serem meus guardiões nessa jornada, por me aceitarem em sua casa e me ajudarem a me adaptar a uma nova cidade e me dar todo o suporte para ser aprovado no vestibular, meu avô infelizmente não pode me ver como engenheiro, mas tenho certeza que ele está me guiando mesmo do céu. Além deles, tenho que agradecer minha irmã, meus primos e minhas tias sendo inspirações profissionais e fazer parte da minha rede de apoio.

Agradecer os meus amigos de Macapá, meus amigos de Belém e meus amigos de faculdade, Daniel, Marcus, Leonan, para citar alguns, que sabem tanto quanto eu as dificuldades que é estar na graduação e mesmo assim conseguimos chegar até o final e atingir nossos objetivos.

Agradecer os meus amigos do LCT, em especial o Professor Miércio, pela oportunidade de integrar o grupo de eletromagnetismo aplicado e ter iniciado minha vida científica, sem sua confiança e sua orientação nada disso seria possível.

“Assim, as perturbações magnéticas propagadas pelo campo eletromagnético concordam com a luz nisto: a perturbação em qualquer ponto é transversal à direção de propagação, e tais ondas podem ter todas as propriedades da luz polarizada.”

(James Clerk Maxwell)

RESUMO

Neste trabalho foram desenvolvidos o projeto e a validação experimental de um arranjo linear composto por seis antenas monopolo de $\lambda/4$ para operar na frequência de 3,5 GHz, faixa atribuída à tecnologia de comunicação sem fio de quinta geração. A escolha por antenas monopolo justifica-se por sua ampla utilização em estações rádio-base e pela simplicidade de fabricação. Considerando a complexidade inerente à relação não linear entre os parâmetros geométricos e a resposta eletromagnética da estrutura, desenvolveu-se um modelo de regressão baseado no algoritmo dos K vizinhos mais próximos (K nearest neighbors - KNN), cuja simplicidade e baixo custo computacional demonstraram-se vantajosos frente a outros métodos de regressão. O modelo proposto realiza o mapeamento da frequência de ressonância (variável de entrada) para o raio do condutor e um fator de correção da altura (variáveis de saída). O conjunto de dados utilizado das respostas eletromagnética do arranjo para o treinamento do modelo KNN foi calculado por meio da técnica de Interações Finitas, e o algoritmo implementado em Python (v3.13), utilizando a biblioteca Scikit-Learn. A partir dos resultados, foram fabricados protótipos do arranjo projetado para validação experimental dos obtidos numericamente, confirmando um coeficiente de reflexão S_{11} inferior a -10 dB em 3,5 GHz e um padrão de radiação adequado no campo distante.

Palavras-chave: Arranjo de antenas; 5G; K vizinhos mais próximos; análise numérica; prototipagem; eletromagnetismo aplicado.

ABSTRACT

In this work, we developed the design and experimental validation of a linear array composed of six $\lambda/4$ monopole antennas designed to operate at 3.5 GHz, the frequency band allocated for fifth-generation (5G) wireless communication technology. The choice of monopole antennas is justified by their widespread use in radio base stations and their manufacturing simplicity. Given the inherent complexity of the nonlinear relationship between the geometric parameters and the electromagnetic response of the structure, we developed a regression model based on the K-Nearest Neighbors (KNN) algorithm, whose simplicity and low computational cost proved advantageous compared to other regression methods. The proposed model maps the resonant frequency (input variable) to the conductor radius and a height correction factor (output variables). The dataset used for training the KNN model was generated from the electromagnetic responses of the array, computed using the Finite Integration Technique (FIT). The algorithm was implemented in Python (v3.13) using the Scikit-Learn library. Based on the results, prototypes of the designed array were fabricated for experimental validation of the numerical findings, confirming a reflection coefficient (S_{11}) below -10 dB at 3.5 GHz and a suitable far-field radiation pattern.

Keywords: Antenna array; 5G; K-Nearest Neighbor; numerical analysis; prototyping; applied electromagnetics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação da radiação eletromagnética em antenas	18
Figura 2 – Representação das regiões de campo de uma antena.	20
Figura 3 – Diagrama de campo do dipolo hertziano.	21
Figura 4 – Características do diagrama de irradiação.	22
Figura 5 – Dipolo filamental de meio comprimento de onda.	25
Figura 6 – Diagrama de irradiação de um dipolo filamental.	26
Figura 7 – Monopolo filamental com plano terra.	26
Figura 8 – Diagrama de radiação do arranjo de antenas linear (visão polar 2D).	28
Figura 9 – Configuração Broadside.	28
Figura 10 – Configuração End-Fire.	29
Figura 11 – Geometria e parâmetros de arranjo planar.	30
Figura 12 – Geometria de arranjo circular com um anel.	31
Figura 13 – Arquitetura de uma Rede Neural Artificial (RNA)	33
Figura 14 – Exemplo do Funcionamento do KNN	34
Figura 15 – Fluxograma das etapas realizadas no projeto.	37
Figura 16 – Distribuição dos dados do banco de dados.	38
Figura 17 – Comparativo entre valores reais e preditos pela KNN	39
Figura 18 – Estrutura do arranjo linear de seis elementos construído no ambiente virtual.	40
Figura 19 – Gráfico de perda de retorno dos elementos do arranjo linear.	40
Figura 20 – Diagrama de radiação para o campo elétrico e magnético na forma cartesiana.	41
Figura 21 – Gráficos de ganho da antena.	42
Figura 22 – Distribuição de campo elétrico e magnético no arranjo de antenas.	43
Figura 23 – Visão do protótipo desenvolvido.	43
Figura 24 – Medição do protótipo.	44
Figura 25 – Gráfico comparativo de perda de retorno entre o medido e o simulado.	45

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Motivações	14
1.2	Objetivos	14
1.2.1	Objetivo Geral	14
1.2.2	Objetivos Específicos	14
1.3	Estrutura do Trabalho	15
2	TRABALHOS CORRELATOS	16
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
3.1	Antenas	18
3.1.1	Parâmetros característicos de antenas	18
3.1.1.1	Regiões de propagação das antenas	19
3.1.1.2	Diagrama de radiação	20
3.1.1.3	Intensidade de irradiação	22
3.1.1.4	Ganho	23
3.1.1.5	Perda de Retorno	23
3.1.2	Antena Filamentar	24
3.2	Arranjos de Antenas	27
3.2.1	Arranjo Linear com N Elementos	27
3.2.1.1	Configuração Broadside	28
3.2.1.2	Configuração End-Fire	29
3.2.2	Arranjo Planar	29
3.2.3	Arranjo Circular	30
3.3	Modelos de Regressão	31
3.3.1	Método dos Mínimos Quadrados	32
3.3.2	Redes Neurais Artificiais	33
3.3.3	K Vizinhos Mais Próximos	33
4	METODOLOGIA	35
4.1	Modelagem Computacional	35
4.2	Ambiente de Simulações	36
4.3	Projeto do Protótipo	36
5	RESULTADOS	38
5.1	Regressão via K vizinhos mais próximos	38
5.2	Resultados Simulados	39
5.3	Resultados Experimentais	43

6	CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
6.1	Trabalhos Futuros	46
	REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de comunicação móvel de quinta geração (5G) representam um avanço paradigmático nas telecomunicações, oferecendo melhorias fundamentais em relação às gerações anteriores (ANATEL, 2021):

- Aumento das taxas de transmissão: maior velocidade;
- Baixa latência: redução do tempo entre o estímulo e a resposta da rede de telecomunicações;
- Maior densidade de conexões: aumento da quantidade de dispositivos conectados em uma determinada área;
- Maior eficiência espectral: incremento da quantidade de dados transmitidos por unidade de espectro eletromagnético;
- Maior eficiência energética dos equipamentos: redução do consumo de energia, com consequente aumento da sustentabilidade.

Esta revolução tecnológica possibilita a implementação prática dos conceitos da Sociedade 5.0, onde infraestruturas inteligentes integram-se organicamente ao cotidiano humano. Contudo, como destacado por Huawei Technologies CO., LTD (2019), a implantação efetiva desta tecnologia demanda o desenvolvimento de novos dispositivos antenados capazes de operar em todas as bandas de frequência alocadas para o 5G, particularmente na faixa de 3,5 GHz, objeto deste estudo.

Ao se considerar a região amazônica, as suas particularidades apresentam dificuldades e desafios para a implementação do 5G devido à atenuação causada pela densa floresta e áreas pouco habitadas, resultando na cobertura desigual e no número baixo de usuários da rede em relação as outras regiões do Brasil (Laviano, 2023). Neste contexto, arranjos de antenas surgem como solução técnica vantajosa para contornar os problemas de cobertura da região, permitindo: controle preciso do diagrama de radiação, ganho direcional aumentado e redução de interferências.

Portanto, neste trabalho compromete-se realizar o projeto da estrutura de um arranjo de antenas com seis elementos monopolo de um quarto de comprimento de onda para trabalhar na rede 5G. Para isso, por conta da não linearidade nas relações entre os parâmetros geométricos das antenas, realizar a modelagem regressiva via K-Vizinhos Mais Próximos (*K-Nearest Neighbor* - KNN) para determinar os parâmetros utilizados na simulação eletromagnética feitas no CST *Studio Suite* e, por fim, realizar a validação experimental com a prototipagem do arranjo.

1.1 Motivações

A implementação do 5G no Brasil iniciou-se em 2022, o que a priori ficou restrito às capitais dos estados e o Distrito Federal, contudo a agenda para o 5G tem como objetivo atender cem por cento dos municípios com população igual ou superior a 30 mil habitantes até 2029 (ANATEL, 2024). Por conta disso, o debate sobre como será feita a implementação e quais estruturas serão utilizadas deve ser feito com inteligência para democratizar ao máximo o 5G para os brasileiros. Para isso, soluções inteligentes como antenas de múltiplas entradas e múltiplas saídas (*multiple input, multiple outputs* - MIMO) e antenas inteligentes são cruciais para manter a qualidade do serviço nas diversas áreas de cobertura, e todas essas tecnologias fundamentam-se na teoria de arranjo de antenas, pois os arranjos de antenas possibilitam a modificação adaptativa do diagrama de radiação para realizar uma filtragem espacial dos sinais melhorando a transmissão e a recepção (Björnson; Demir, 2024). Então, arranjos de baixo custo que sejam economicamente viáveis para regiões de baixa densidade populacional torna-se imprescindível para acelerar a implementação nessas regiões.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver e construir um arranjo de antenas linear com seis elementos monopolo de um quarto de comprimento de onda para operar na rede de quinta geração. Utilizar um modelo de regressão baseado na KNN para prever os parâmetros geométricos das antenas a fim de reduzir o número de simulações. Comparar os resultados numéricos e experimentais para validação do protótipo. Além de utilizar materiais de baixo custo para facilitar a fabricação em larga escala do produto.

1.2.2 Objetivos Específicos

Esta proposta concentra seus estudos concentra-se nos seguintes estudos:

- Realizar estudo paramétrico via CST Studio Suite para construção do banco de dados para o treino da KNN implementada em Python a fim de reduzir o custo computacional;
- Modelar e simular o arranjo de antenas para operar na banda S do espectro de frequência, especialmente em 3,5 GHz;
- Confeccionar e avaliar a fabricação artesanal do arranjo para verificar a resposta em frequência das antenas e estabilidade mecânica com objetivo de reprodução em larga escala do protótipo.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este documento organiza-se conforme a seguinte estrutura:

- **Capítulo 2 - Estado da Arte:** Revisão crítica de:
 - Arranjos filamentosas
 - Sistemas operando em 3,5 GHz
 - Técnicas de síntese de antenas
- **Capítulo 3 - Referencial Teórico:** Fundamentação em:
 - Teoria de antenas
 - Modelos de regressão
 - Eletromagnetismo aplicado
- **Capítulo 4 - Metodologia:** Detalhamento de:
 - Fluxograma de desenvolvimento
 - Parâmetros de simulação
 - Protocolos experimentais
- **Capítulo 5 - Resultados:** Análise de:
 - Desempenho do modelo KNN
 - Diagramas de radiação
 - Parâmetros de impedância
- **Capítulo 6 - Conclusão:** Síntese de:
 - Contribuições científicas
 - Limitações identificadas
 - Trabalhos futuros

2 TRABALHOS CORRELATOS

Em Queiroz (2020), foi proposto um conjunto de antenas do tipo *patch* operando na frequência de 3,5 GHz, visando aplicações na tecnologia 5G. Inicialmente, foram desenvolvidas duas geometrias de antenas isoladas: uma retangular e outra circular. Após a validação individual, os autores simularam quatro arranjos lineares 1x2 com e sem estruturas de banda eletromagnética proibida (*Electromagnetic Band Gap* - EBG). Foram analisados parâmetros como perda de retorno e o diagrama de irradiação. Os arranjos com elementos retangulares apresentaram ressonância próxima da frequência alvo, sendo que a estrutura sem EBG obteve a menor perda de retorno, atingindo -35 dB. Já os arranjos com elementos circulares também se aproximaram de 3,5 GHz, porém, neste caso, o melhor desempenho foi obtido com o uso de EBG. Em todos os casos, os autores consideraram satisfatórios os resultados de ganho e diretividade.

No trabalho de Ribeiro e Carrijo (2022), foi desenvolvido um arranjo planar 4x4 de antenas fractais tipo *patch* para aplicações em redes 4G e 5G. A estrutura utilizou o substrato Rogers RT/duroid 5880. A antena apresentou diversas bandas de operação, abrangendo frequências tanto da banda C quanto de ondas milimétricas. Os diagramas de radiação obtidos revelaram ganhos variando de 10 dBi a 15 dBi, com boa diretividade nas regiões de interesse. No entanto, o projeto não foi validado experimentalmente.

Wu, Xu e Chen (2023) propuseram em seu trabalho um arranjo de antenas baseado no conceito de dipolos cruzados, resultando em uma estrutura omnidirecional inovadora para estações rádio-base operando abaixo de 6 GHz. Uma das vantagens do projeto é a necessidade de apenas uma porta de alimentação para gerar o diagrama omnidirecional, graças à ortogonalidade entre os dipolos. Os autores confeccionaram e testaram o protótipo, que apresentou bom alinhamento entre os resultados simulados e medidos. A antena obteve largura de banda de 3,83 GHz a 5,02 GHz e ganho máximo de 7,44 dBi em 4,4 GHz. Apesar do bom desempenho, seu tamanho limita o uso em aplicações *indoor*.

Em Gupta, Harish e Gogineni (2022), os autores desenvolveram uma antena dipolo log-periódica filamentar para operação na faixa sub-UHF (168–230 MHz). A antena foi composta por cinco elementos direcionadores e um refletor, visando ampliar o ganho. Além disso, foi simulado um arranjo 4x2 com essa estrutura, que alcançou ganho de 18,3 dBi e um diagrama de radiação mais diretivo. Apesar dos bons resultados, o trabalho não contempla frequências comerciais do 5G, nem validação experimental.

Saleh et al. (2021) realizaram um estudo comparativo entre diferentes topologias de arranjos MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), como arranjos planares, circulares e conformais, operando em 2,6 GHz. Foi utilizada uma antena dipolo curvo filamentar de meia onda. O arranjo conformal apresentou os melhores resultados, com perdas de retorno reduzidas e eficiência de 94%. No entanto, o estudo não contemplou a frequência de 3,5 GHz nem analisou arranjos lineares, o que limita sua aplicação ao presente contexto.

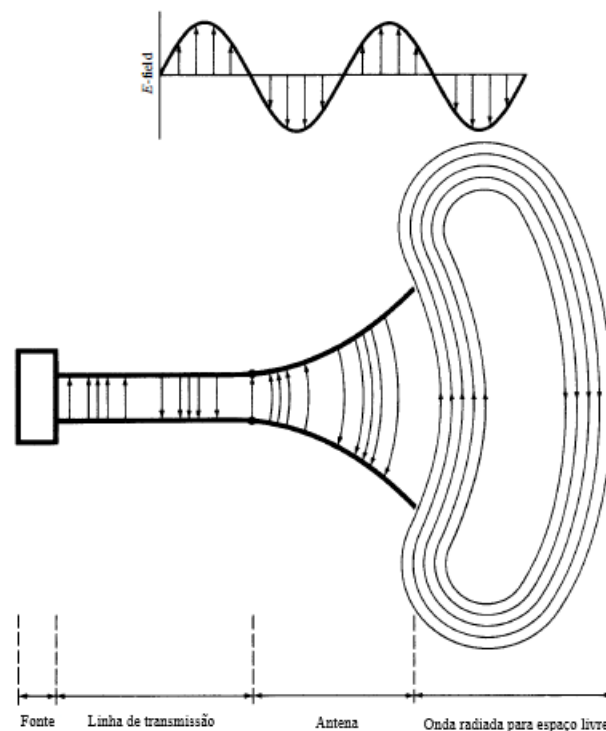
Por fim, Benmahmoud e Tedjini (2021) desenvolveram uma antena monopolo filamentar voltada para a faixa da banda C (3,4–3,6 GHz), cada elemento composto por sete fios de cobre dispostos em diferentes orientações. A geometria foi otimizada via algoritmo genético. A antena obteve largura de banda entre 3,25 GHz e 3,61 GHz e ganho de 5,72 dBi. Apesar do desempenho promissor, o trabalho não investigou a performance da antena em arranjos lineares, o que seria essencial para aplicações no contexto 5G.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Antenas

Antenas são dispositivos capazes de transmitir e receber informações por meio de ondas eletromagnéticas no espaço livre. Para que isso ocorra, é necessário que um condutor seja alimentado por uma fonte de corrente ou tensão variável no tempo. O resultado dessa excitação é o movimento dos elétrons livres no condutor, os quais oscilam para frente e para trás na frequência da corrente ou tensão aplicada. Essa aceleração e desaceleração contínua dos elétrons gera a radiação eletromagnética. Segundo Fusco (2006), a aceleração de partículas eletricamente carregadas provoca um distúrbio eletromagnético, cujo efeito final é a geração de uma frente de onda que se propaga para o espaço e se expande à medida que avança.

Figura 1 – Representação da radiação eletromagnética em antenas



Fonte: Balanis (2009).

3.1.1 Parâmetros característicos de antenas

Para que se possa extrair todo o potencial de um dispositivo como a antena em uma determinada aplicação, é necessário avaliar seu desempenho por meio de parâmetros específicos. Medidas como ganho e perda de retorno são fundamentais para determinar se uma antena é adequada ao uso pretendido. No entanto, para que esses fatores possam ser corretamente mensurados, é imprescindível compreender outras grandezas básicas associadas ao comportamento das

antenas, entre as quais se destacam: as regiões de operação da antena, o diagrama de radiação, a intensidade de irradiação e a diretividade. (Balanis, 2009)

3.1.1.1 Regiões de propagação das antenas

As antenas apresentam diferentes regiões de campo onde a radiação eletromagnética se propaga. Segundo Gross (2015), essas regiões são divididas em quatro domínios distintos, cada um com características próprias.

A primeira é a Região da Antena, que corresponde ao limite físico do elemento radiador. Essa região é definida pela seguinte equação:

$$R \leq \frac{L}{2} \quad (3.1)$$

em que R representa o raio da região e L é a maior dimensão física da antena.

A seguir, tem-se a Região de Campo Próximo Reativo, caracterizada pela predominância da energia reativa armazenada nas imediações da antena. Essa região engloba a Região da Antena e se estende até um limite determinado por:

$$\frac{L}{2} \leq R \leq 0,62\sqrt{\frac{L^3}{\lambda}} \quad (3.2)$$

A terceira é a Região de Campo Próximo Radiante, também chamada de Região de Fresnel. Nela, a energia radiante já se sobrepõe à energia reativa, e o campo decai inversamente com a distância radial. No entanto, essa região pode ser menos útil para medições práticas, devido a possíveis erros de fase causados pela proximidade com a antena. Seu intervalo é definido por:

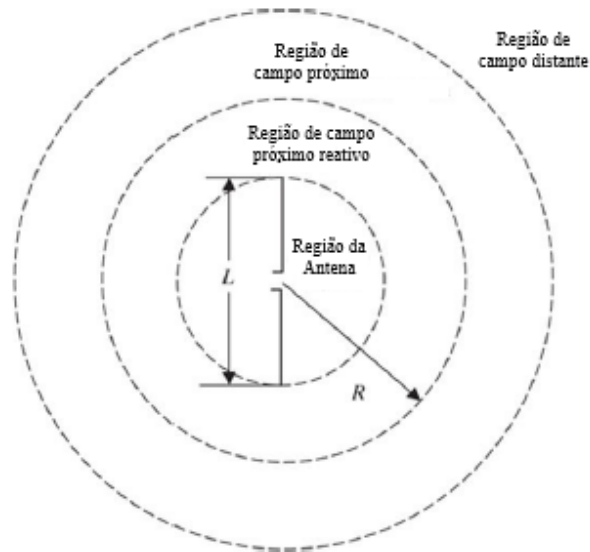
$$0,62\sqrt{\frac{L^3}{\lambda}} \leq R \leq \frac{2L^2}{\lambda} \quad (3.3)$$

A quarta e última é a Região de Campo Distante, também conhecida como Região de Fraunhofer. Nesta região, as componentes de campo elétrico, magnético e a direção de propagação tornam-se ortogonais entre si, formando um campo essencialmente transversal, conforme a regra da mão direita.

Para aplicações em telecomunicações — especialmente em altas frequências, como na faixa de UHF (*Ultra-high Frequency*)— essa é a região mais relevante, pois o diagrama de irradiação se estabiliza e os lóbulos principais e secundários se tornam bem definidos (Balanis, 2009). O início da Região de Campo Distante é dado por:

$$R \geq \frac{2L^2}{\lambda} \quad (3.4)$$

A Figura 2 ilustra a divisão e sequência das regiões de campo descritas:

Figura 2 – Representação das regiões de campo de uma antena.

Fonte: Adaptada de Gross (2015).

3.1.1.2 Diagrama de radiação

O diagrama de radiação de uma antena é uma representação gráfica que descreve o comportamento direcional das propriedades irradiadas por essa antena, como o campo elétrico ou a densidade de potência (Gross, 2015).

Os diagramas podem ser representados em duas ou três dimensões. Na forma bidimensional, podem ser utilizados sistemas de coordenadas polares ou retangulares: fixa-se um dos ângulos (θ ou ϕ) e o outro é variado no eixo horizontal, enquanto o eixo vertical representa a intensidade do parâmetro analisado. Para representações tridimensionais, utilizam-se coordenadas esféricas.

A análise do diagrama de radiação é geralmente realizada na região de campo distante da antena, onde o campo apresenta comportamento estável e direcional. Para exemplificar, o padrão de campo normalizado de uma antena do tipo dipolo de Hertz é dado por:

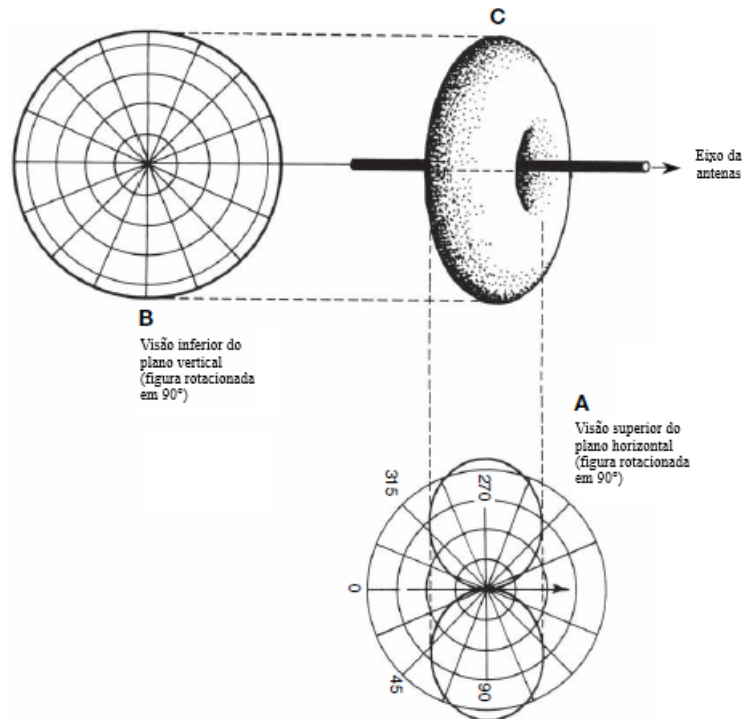
$$f(\theta) = |\sin \theta| \quad (3.5)$$

No que se refere à densidade de potência irradiada (ou potência relativa), o diagrama correspondente é definido por:

$$f^2(\theta) = \sin^2 \theta \quad (3.6)$$

A Figura 3 apresenta os diagramas de radiação de campo para o dipolo hertziano, considerando diferentes planos angulares:

Figura 3 – Diagrama de campo do dipolo hertziano.

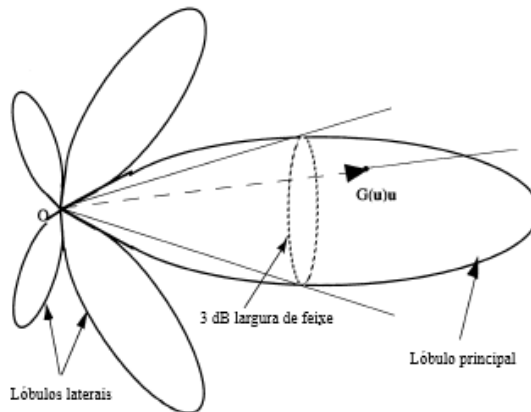


Fonte: Adaptada de Carr e Hipple (2007).

A partir do diagrama de radiação é possível identificar os lóbulos da antena. Esses lóbulos representam as regiões de maior ou menor intensidade de radiação em diferentes direções. São classificados em:

- **Lóbulo principal:** corresponde à direção de maior irradiação da antena. A largura angular desse lóbulo entre os pontos de meia potência é chamada de Largura de Feixe de Meia Potência (*Half Power Beam Width – HPBW*).
- **Lóbulos laterais (ou secundários):** são regiões adjacentes ao lóbulo principal que irradiam com menor intensidade. Em geral, são indesejados, pois representam perda de diretividade.
- **Nulos:** conforme definido por Chen e Luk (2009), são regiões em que a intensidade de radiação é praticamente nula. Apesar de estreitas, essas regiões são úteis em aplicações de supressão de interferências.

A Figura 4 ilustra os principais elementos do diagrama de radiação de uma antena:

Figura 4 – Características do diagrama de irradiação.

Fonte: Adaptada de Drabowitch S. (1998).

3.1.1.3 Intensidade de irradiação

A intensidade de irradiação é definida como a potência irradiada por uma antena em uma determinada direção, por unidade de ângulo sólido diferencial, medido em esferorradianos (sr). Esse parâmetro é fundamental para caracterizar a distribuição angular da potência irradiada no espaço. Matematicamente, a intensidade de irradiação é expressa por:

$$U(\theta, \phi) = r^2 P_{\text{méd}} \quad (3.7)$$

em que r representa a distância radial (na região de campo distante) e $P_{\text{méd}}$ é a densidade de potência média no ponto considerado. Assim como o diagrama de radiação, essa grandeza deve ser avaliada na região de campo distante, onde o campo eletromagnético assume um comportamento mais uniforme e direcional.

A potência total média irradiada pela antena pode ser obtida pela integração da intensidade de irradiação sobre toda a esfera:

$$P_{\text{ir}} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \quad (3.8)$$

Nessa equação, $d\Omega = \sin \theta d\theta d\phi$ representa o elemento diferencial de ângulo sólido em coordenadas esféricas.

Para uma antena isotrópica, isto é, que irradia igualmente em todas as direções, a intensidade de irradiação média é calculada como:

$$U_{\text{méd}} = \frac{P_{\text{ir}}}{4\pi} \quad (3.9)$$

3.1.1.4 Ganho

O ganho é um dos parâmetros fundamentais para a caracterização do desempenho de uma antena, pois incorpora tanto suas propriedades direcionais quanto a eficiência de radiação. Trata-se de uma grandeza mensurável que permite avaliar a capacidade da antena de concentrar energia em uma determinada direção, levando em conta eventuais perdas internas.

Segundo Sadiku (2012), o ganho diretivo $G_d(\theta, \phi)$ de uma antena é definido como a razão entre a intensidade de irradiação em uma dada direção (θ, ϕ) e a intensidade de irradiação média sobre toda a esfera:

$$G_d(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_{\text{méd}}} = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{\text{ir}}} \quad (3.10)$$

Esse parâmetro expressa a capacidade da antena de direcionar a potência irradiada, sendo útil para determinar as direções em que o sinal é mais fortemente propagado.

Além do ganho, outro parâmetro intimamente relacionado é a diretividade. Diferentemente do ganho, a diretividade considera apenas as características direcionais da antena, desconsiderando eventuais perdas de eficiência. De acordo com Sadiku (2012), a diretividade D é definida como a razão entre a intensidade de irradiação máxima $U_{\text{máx}}$ e a intensidade média:

$$D = \frac{U_{\text{máx}}}{U_{\text{méd}}} \quad (3.11)$$

Essa grandeza fornece uma medida de quão concentrado está o lóbulo principal do diagrama de radiação. Em geral, quanto mais estreito for o feixe principal, maior será a diretividade da antena.

A relação entre ganho e diretividade pode ser expressa considerando a eficiência total η da antena:

$$G = \eta \cdot D \quad (3.12)$$

Tanto o ganho quanto a diretividade são grandezas adimensionais e, na prática, são frequentemente expressos em decibéis em relação a uma antena isotrópica (dBi).

3.1.1.5 Perda de Retorno

Outro parâmetro de grande importância para a avaliação do desempenho de antenas é a perda de retorno (*Return Loss – RL*), também chamado de Coeficiente de Reflexão ou simplesmente S_{11} . Fisicamente, esse parâmetro está relacionado à quantidade de energia refletida na interface entre a linha de transmissão e a antena, sendo, portanto, uma medida do grau de casamento de impedância entre a fonte e a carga. Quando há um bom casamento de impedância, a maior parte da potência é transferida para a antena, com mínima reflexão.

Segundo Stutzman e Thiele (2013), a perda de retorno é expressa em decibéis (dB) e está relacionada ao coeficiente de reflexão Γ , que por sua vez depende da Razão de Onda Estacionária de Tensão (do inglês, *Voltage Standing Wave Ratio* – VSWR). As relações entre essas grandezas são dadas por:

$$|\Gamma| = \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} \quad (3.13)$$

$$RL = -20 \log_{10} |\Gamma| \quad (3.14)$$

Altos valores de Γ , aumentando também o módulo de RL , indicam que pouca potência está sendo refletida, o que implica em um bom acoplamento entre a antena e a linha de transmissão.

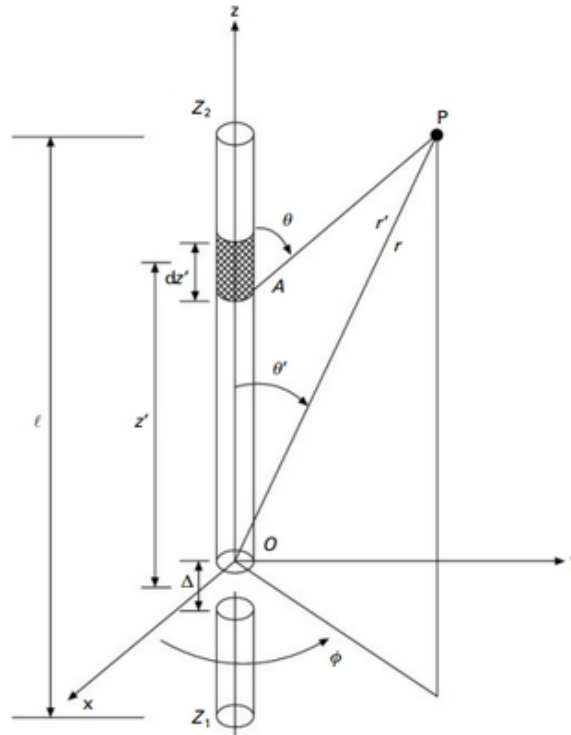
Além disso, a perda de retorno também representa a resposta em frequência da antena. Através da análise dessa resposta, é possível identificar a frequência de ressonância e, conseqüentemente, a faixa de frequência de operação eficiente do dispositivo (Chen; Luk, 2009). Esse parâmetro é fundamental para a determinação da largura de banda da antena, uma vez que as características de ressonância estão diretamente relacionadas ao seu tamanho físico. Por essa razão, projetistas utilizam a perda de retorno como base para ajustes estruturais nas antenas, de forma a atender aos requisitos específicos de operação.

3.1.2 Antena Filamentar

Além dos parâmetros utilizados para avaliação, as antenas também são classificadas conforme seu tipo, o qual se distingue pela geometria, pelos materiais utilizados na sua construção e pelas aplicações a que se destinam. Dentre os diversos tipos, as antenas filamentosas são consideradas uma das mais fundamentais, sendo frequentemente utilizadas como base para o desenvolvimento de geometrias mais complexas. Apesar de sua simplicidade, esse tipo de antena ainda é amplamente utilizado.

As antenas filamentosas recebem esse nome por serem compostas exclusivamente por fios condutores. Dependendo da flexibilidade do material condutor, essas antenas podem assumir diferentes formas. Inicialmente, será analisado o funcionamento das antenas dipolo de meio comprimento de onda (Balanis, 2009). A Figura 5 ilustra uma antena dipolo filamentar.

Figura 5 – Dipolo filamento de meio comprimento de onda.



Fonte: Fusco (2006).

Nesse tipo de antena, o comprimento total corresponde à metade do comprimento de onda da frequência de operação. A alimentação ocorre na região central, entre os condutores. O comportamento dos campos elétrico e magnético radiados por essa antena pode ser descrito pelas seguintes expressões:

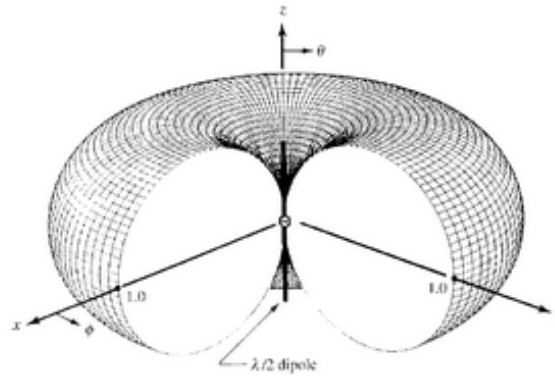
$$|E_{\theta}| = j\eta \frac{kI_0 l \sin \theta}{4\pi r} \left[1 + \frac{1}{jkr} - \frac{1}{(kr)^2} \right] e^{-jkr} \quad (3.15)$$

$$|H_{\phi}| = j \frac{kI_0 l \sin \theta}{4\pi r} \left[1 + \frac{1}{jkr} \right] e^{-jkr} \quad (3.16)$$

Onde E_{θ} e H_{ϕ} são as componentes dos campos elétrico e magnético, respectivamente; η_0 é a impedância característica do espaço livre; k é o número de onda; I_0 é a amplitude da corrente de alimentação; r é a distância até o ponto de observação; e θ é o ângulo de elevação.

A popularidade do dipolo de meia onda se deve ao fato de ser uma antena ressonante e de construção simples (Stutzman; Thiele, 2013). Além disso, ele é considerado um elemento omnidirecional no plano ortogonal ao condutor, ou seja, irradia igualmente em todas as direções desse plano, o que o torna pouco diretivo. Analiticamente, seu diagrama de irradiação é descrito por:

$$F(\theta) = \frac{\cos[(\pi/2) \cos \theta]}{\sin \theta} \quad (3.17)$$

Figura 6 – Diagrama de irradiação de um dipolo filamentoar.

Fonte: Balanis (2009).

Essa antena apresenta várias características relevantes, como a potência total irradiada, que pode ser obtida a partir da seguinte integral:

$$P_{\text{rad}} = \eta \frac{|I_0|^2}{8\pi} \int_0^{2\pi} \frac{1 - \cos y}{y} dy \quad (3.18)$$

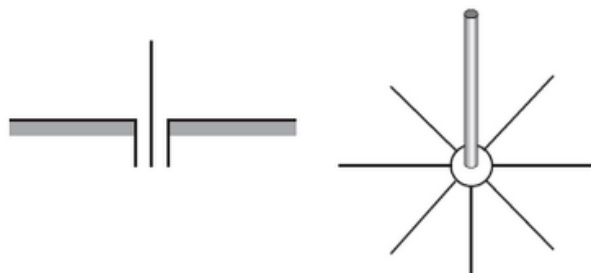
Onde:

$$dy = \eta \frac{|I_0|^2}{8\pi} C_{\text{in}}(2\pi) \quad (3.19)$$

Com $C_{\text{in}} = 2,435$. A diretividade desse tipo de dipolo é aproximadamente $D_0 \approx 1,643$ (ou 2,15 dBi), e sua resistência de entrada é de cerca de 73Ω .

Uma variação bastante comum da antena filamentoar é o monopolo de um quarto de comprimento de onda. Diferentemente do dipolo, o monopolo utiliza apenas metade do condutor, sendo a outra metade substituída por um plano terra condutor. Essa configuração oferece vantagens como simplificação da estrutura e manutenção da eficiência do campo irradiado, uma vez que o plano terra funciona como uma imagem refletida da antena (Balanis, 2009).

O monopolo apresenta maior diretividade que o dipolo, com $D_0 \approx 3,286$, e sua resistência de entrada é reduzida para $R_{\text{in}} = 36,5\Omega$. A seguir, apresenta-se a ilustração de um monopolo com plano terra:

Figura 7 – Monopolo filamentoar com plano terra.

Fonte: Stutzman e Thiele (2013).

Além dos dipolos e monopolos, outras configurações também fazem parte da classe de antenas filamentosas, como: a antena em V invertido, o dipolo dobrado, a antena Yagi-Uda, a antena loop e as antenas fractais, entre outras. Cada uma delas possui características específicas que as tornam adequadas para diferentes aplicações.

3.2 Arranjos de Antenas

Como demonstrado na literatura técnica, antenas dipolo e monopolos filamentosas apresentam baixa diretividade, o que pode limitar seu desempenho em aplicações que exigem padrões de radiação direcional (Roddy, 2006). Quando empregado como elemento único, o radiador filamentar exibe diagrama de irradiação omnidirecional, característica que implica em duas desvantagens operacionais: a transmissão de sinal para regiões não desejadas e suscetibilidade elevada a interferências na recepção.

A solução para esse problema consiste na utilização de arranjos de antenas, nos quais múltiplos elementos radiadores são dispostos geometricamente para sintetizar padrões de radiação específicos. Conforme Balanis (2009), o diagrama resultante é função de dois parâmetros fundamentais:

1. Espaçamento interelementar (d), tipicamente expresso em comprimentos de onda (λ);
2. Distribuição de corrente de alimentação (amplitude e fase).

Os arranjos podem adotar três configurações básicas: Linear (elementos alinhados), Planar (matriz bidimensional) e Circular (disposição anular).

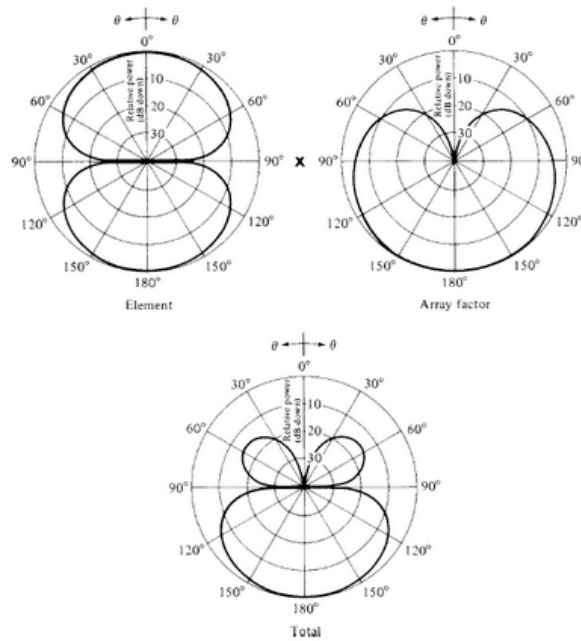
3.2.1 Arranjo Linear com N Elementos

Considerando um arranjo linear uniforme com N elementos equidistantes (espaçamento $d = \alpha\lambda$, onde $\alpha \in (0, 1]$), cada radiador é alimentado com corrente de fase progressiva β . O fator de arranjo (*Array Factor* - AF) para essa configuração é dado por:

$$AF(\theta) = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kd \cos \theta + \beta)} \quad (3.20)$$

onde k número de onda ($2\pi/\lambda$), θ ângulo de elevação (rad) e β é a progressão de fase dos elementos (rad). A Figura 8 ilustra o padrão de radiação resultante para um arranjo linear de dois elementos, evidenciando que o fator de arranjo é a ponderação do diagrama de radiação característico das antenas utilizada no arranjo.

Figura 8 – Diagrama de radiação do arranjo de antenas linear (visão polar 2D).



Fonte: Balanis (2009).

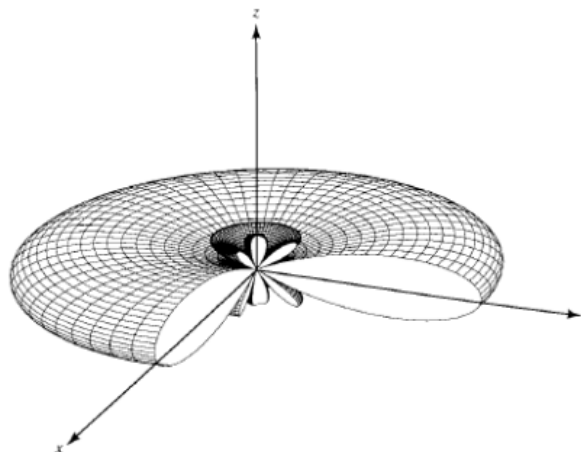
3.2.1.1 Configuração Broadside

Nos arranjos do tipo *broadside*, a radiação máxima ocorre perpendicularmente ao eixo do arranjo ($\theta = \pi/2$ rad). Essa condição é atingida quando:

$$\beta = 0 \quad \text{e} \quad d \leq \lambda \tag{3.21}$$

Conforme mostra a Figura 9, o diagrama apresenta simetria bilateral com lóbulo principal orientado a 90°.

Figura 9 – Configuração Broadside.



Fonte: Balanis (2009).

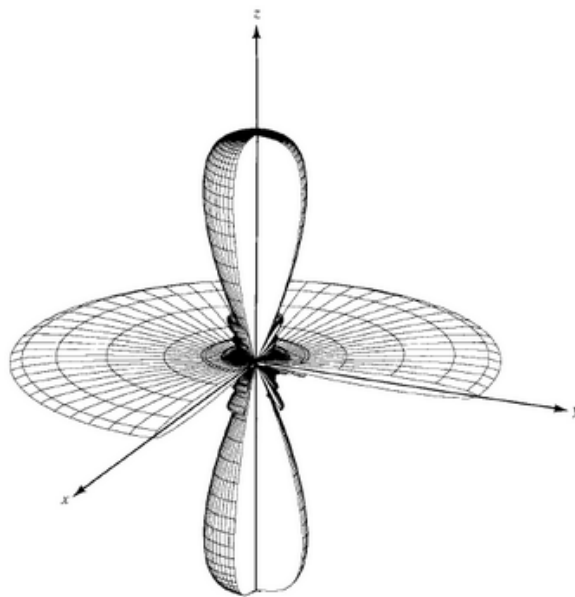
3.2.1.2 Configuração End-Fire

Para arranjos *end-fire*, a radiação máxima se concentra ao longo do eixo do arranjo ($\theta = 0$ rad), requerendo:

$$\beta = \pm kd \quad (\text{fase progressiva crítica}) \quad (3.22)$$

A Figura 10 demonstra o padrão direcional típico, com estreitamento do lóbulo principal na direção axial.

Figura 10 – Configuração End-Fire.



Fonte: Balanis (2009).

3.2.2 Arranjo Planar

De forma análoga aos arranjos lineares uniformes, os arranjos planares caracterizam-se pela disposição dos elementos radiadores em um mesmo plano, com configurações geométricas regulares (quadradas ou retangulares). Conforme Balanis (2009), essa organização espacial permite o controle bidimensional do diagrama de radiação, oferecendo maior flexibilidade na modelagem do feixe eletromagnético.

O AF para essa configuração é dado pela expressão:

$$AF(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N I_{1n} \left[\sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta_x)} \right] e^{j(n-1)(kd_y \sin \theta \sin \phi + \beta_y)} \quad (3.23)$$

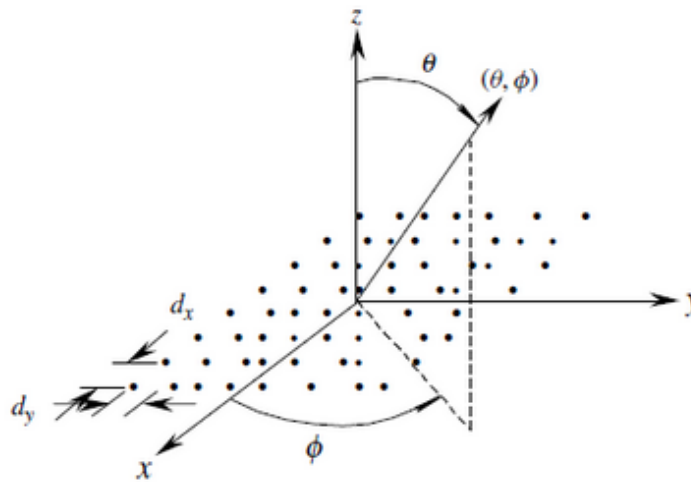
A Figura 11 ilustra a geometria típica desses arranjos, destacando:

Tabela 1 – Descrição dos parâmetros do arranjo planar

Símbolo	Descrição
I_{m1}, I_{1n}	Coefficientes de excitação (amplitude)
d_x, d_y	Espaçamentos interelementares nas direções x e y (m)
β_x, β_y	Progressões de fase nas direções x e y (rad)
θ, ϕ	Ângulos esféricos (elevação e azimutal, em rad)
k	Número de onda ($2\pi/\lambda$)

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 11 – Geometria e parâmetros de arranjo planar.



Fonte: Balanis (2009).

3.2.3 Arranjo Circular

Os arranjos circulares constituem uma classe importante de configurações multidimensionais, onde os elementos radiadores são dispostos concentricamente em anéis circulares. Para fins didáticos, consideraremos inicialmente o caso fundamental de um único anel de raio a , com N elementos igualmente espaçados. Segundo Stutzman e Thiele (2013), essa geometria oferece vantagens singulares:

- Simetria azimutal para padrões de radiação omnidirecionais;
- Capacidade de varredura eletrônica em 360° ;
- Uniformidade na resposta do diagrama para diferentes ângulos ϕ .

O fator de arranjo para essa configuração é descrito por:

$$AF(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N I_n e^{j[ka \sin \theta \cos(\phi - \phi_n) + \alpha_n]} \quad (3.24)$$

A Figura 12 ilustra a geometria característica deste arranjo, evidenciando:

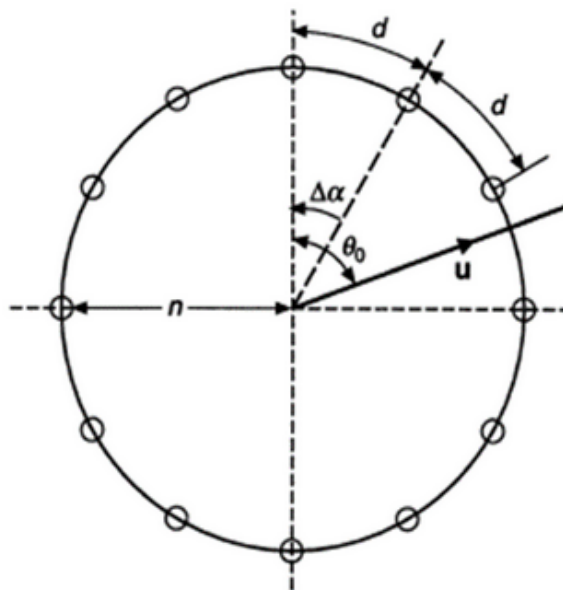
Tabela 2 – Parâmetros característicos do arranjo circular

Símbolo	Descrição	Unidade
I_n	Amplitude de excitação do n -ésimo elemento	Adimensional
k	Número de onda	rad/m
a	Raio do anel	m
α_n	Fase do n -ésimo elemento	rad
ϕ_n	Posição angular do elemento	rad
θ, ϕ	Ângulos esféricos	rad

Fonte: elaborado pelo autor.

- Disposição simétrica dos elementos;
- Sistema de coordenadas para análise;
- Parâmetros geométricos fundamentais.

Figura 12 – Geometria de arranjo circular com um anel.



Fonte: Adaptado de Stutzman e Thiele (2013).

3.3 Modelos de Regressão

Na engenharia, especificamente em sistemas sem uma formulação analíticas com dados coletados através de experimentos, erros e incertezas estão intrinsicamente associados, logo, para diminuir as incertezas provenientes dos dados empíricos e realizar estimações futuras, o uso de modelos de regressões são amplamente implementados para realizar previsões sem a necessidade de realizar novas experiências. Por conta disso, modelos de regressão é uma área bastante robusta na álgebra linear e inteligência computacional com diversas aplicações na engenharia.

3.3.1 Método dos Mínimos Quadrados

O método dos mínimos quadrados (MMQ) é uma técnica amplamente difundida nas ciências exatas, originalmente formulada para resolver problemas em astronomia por Legendre (1805) e Gauss (1809), e posteriormente aplicada a diversas áreas da engenharia.

Embora tenha sido concebido para regressão linear, o MMQ pode ser adaptado para regressões não lineares, como é o caso da regressão polinomial de grau superior a dois ou de funções exponenciais (Chapra, 2013). Por exemplo, uma regressão quadrática é expressa por:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + e, \quad (3.25)$$

onde a soma dos quadrados dos resíduos é dada por:

$$S_r = \sum (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2)^2. \quad (3.26)$$

Para ajustar o modelo aos dados, o MMQ minimiza essa soma dos quadrados. Derivando a função objetivo:

$$S(a_0, a_1, a_2) = \sum_{i=1}^n (y_i - (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2))^2, \quad (3.27)$$

em relação aos coeficientes a_0 , a_1 e a_2 e igualando as derivadas parciais a zero, obtém-se o seguinte sistema de equações normais:

$$\begin{cases} na_0 + a_1 \sum_{i=1}^n x_i + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n y_i, \\ a_0 \sum_{i=1}^n x_i + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^3 = \sum_{i=1}^n x_i y_i, \\ a_0 \sum_{i=1}^n x_i^2 + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^3 + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^4 = \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i, \end{cases} \quad (3.28)$$

onde:

- n é o número de observações;
- x_i e y_i são os valores das variáveis independente e dependente, respectivamente;
- Os somatórios abrangem todas as observações ($i = 1, \dots, n$).

A solução desse sistema fornece os coeficientes ótimos \hat{a}_0 , \hat{a}_1 e \hat{a}_2 , determinando a equação quadrática:

$$\hat{y} = \hat{a}_0 + \hat{a}_1x + \hat{a}_2x^2, \quad (3.29)$$

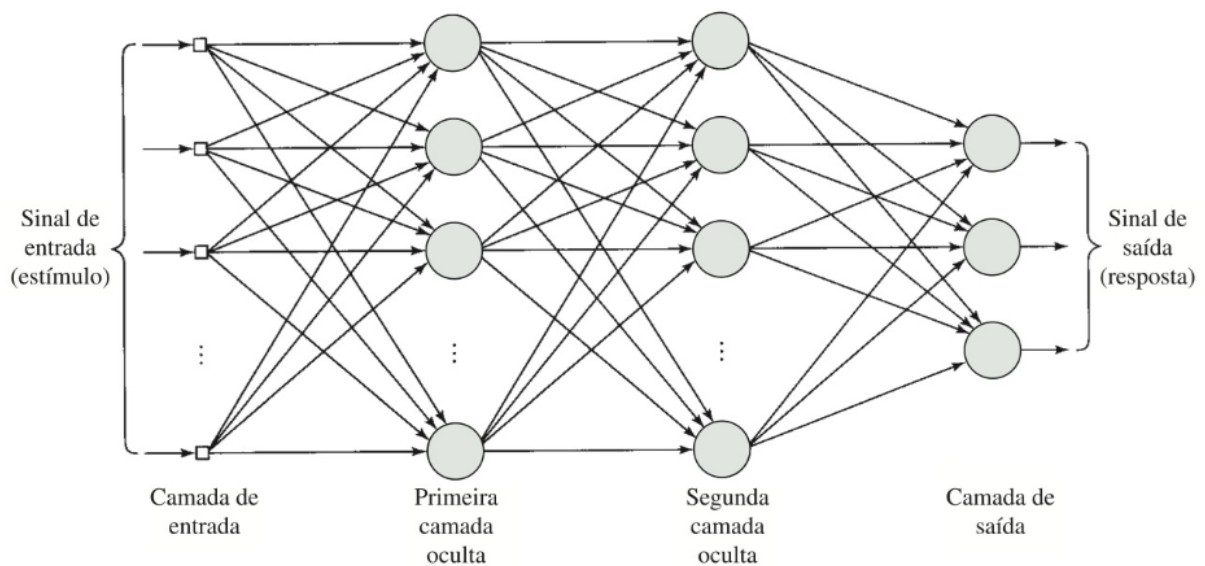
que melhor se ajusta aos dados no sentido dos mínimos quadrados. Na prática computacional, essa solução é obtida numericamente por métodos matriciais ou técnicas específicas de álgebra linear.

3.3.2 Redes Neurais Artificiais

Modelos baseados em Redes Neurais Artificiais (RNAs) são amplamente utilizados na engenharia para simular computacionalmente o funcionamento do cérebro humano. Segundo Haykin (2007), uma RNA é um sistema de processamento massivamente paralelo, composto por unidades de processamento simples. O conhecimento é adquirido a partir do ambiente por meio de um processo de aprendizado, que fortalece as conexões entre os neurônios artificiais. Esse processo é conduzido por um algoritmo de aprendizagem responsável por ajustar os pesos sinápticos da rede.

O modelo de RNA mais comum é o Perceptron de Múltiplas Camadas (MLP, do inglês *Multilayer Perceptron*). Nesse modelo, o aprendizado supervisionado é realizado com o auxílio do algoritmo de retropropagação do erro, que transmite o erro da saída em direção às camadas anteriores. Esse mecanismo permite a minimização do erro global da rede, representando um avanço significativo no campo das RNAs. A Figura 13 ilustra sua arquitetura, onde todos os neurônios estão interconectados.

Figura 13 – Arquitetura de uma Rede Neural Artificial (RNA)



Fonte: Haykin (2007).

3.3.3 K Vizinhos Mais Próximos

Enquanto o MMQ é adequado para ajustes de funções com comportamento conhecido, e as RNAs demandam alta complexidade de implementação e ajuste de hiperparâmetros, o

algoritmo K Vizinhos Mais Próximos (*K-Nearest Neighbor* - KNN) destaca-se pela simplicidade de implementação e versatilidade para classificação e regressão.

O desenvolvimento teórico do KNN remonta ao trabalho de Cover e Hart (1967), que estabeleceu os fundamentos para a predição não paramétrica. Desde então, o método se consolidou como uma das abordagens mais populares em aprendizado de máquina, com ampla aplicação em contextos acadêmicos e industriais.

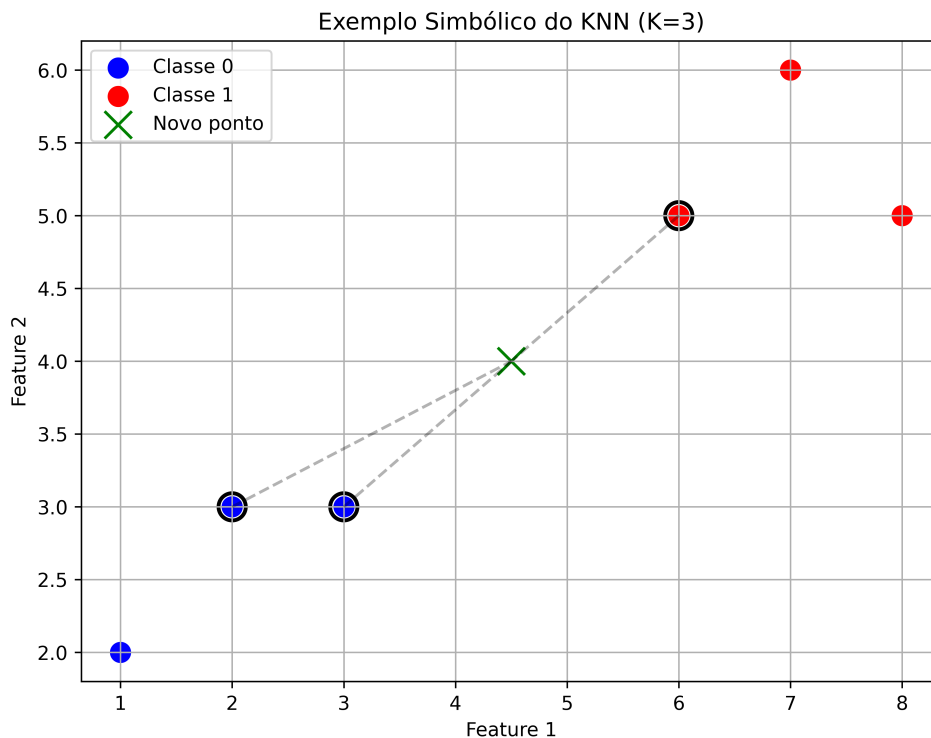
O KNN é um algoritmo de aprendizado supervisionado que funciona mapeando os dados de treinamento em um espaço multidimensional. Para classificar uma nova amostra, o algoritmo executa as seguintes etapas (Lenz M. L., 2020):

1. Calcula as distâncias entre a amostra com todos os dados de treino, comumente utilizando a distância Euclidiana:

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}; \quad (3.30)$$

2. Identifica os k vizinhos mais próximos;
3. Determina a classe predominante entre os vizinhos (para classificação) ou calcula a média dos valores (para regressão).

Figura 14 – Exemplo do Funcionamento do KNN



Fonte: Elaborado pelo autor.

4 METODOLOGIA

4.1 Modelagem Computacional

Para a construção do arranjo de antenas aplicado ao sistema móvel 5G, utilizou-se como referência o trabalho de Arruda Filho e Cavalcante (1997), onde foi desenvolvido um arranjo linear composto por seis antenas monopolo operando na frequência de 800 MHz. Neste trabalho, o arranjo foi projetado para operar na banda S, especificamente em 3,5 GHz, frequência comumente empregada nas redes 5G.

As antenas monopolo são geralmente projetadas com base na seguinte expressão (Balanis, 2009):

$$L_{monopolo} = \frac{1}{4}\lambda_0 = \frac{1}{4}\frac{c}{f} \quad (4.1)$$

em que λ_0 representa o comprimento de onda, f é a frequência central e c é a velocidade da luz no vácuo. No entanto, em frequências elevadas, é comum adicionar um fator de ajuste k , nesta parte, é ressignificado o k de número de onda para fator de ajuste, à fórmula de forma a compensar variações na velocidade de propagação e efeitos geométricos (Kausar et al., 2019). Assim, a equação ajustada é dada por:

$$L_{ajustado} = kL_{monopolo} \quad (4.2)$$

O fator de ajuste é essencial para definir com precisão a frequência de ressonância, principalmente quando o diâmetro dos monopolos não é pequeno em relação ao seu comprimento. Devido às limitações dos modelos analíticos na predição da frequência de ressonância, optou-se por desenvolver um modelo de regressão não linear utilizando a técnica dos K-vizinhos mais próximos, com o objetivo de estimar os parâmetros ideais para o arranjo de seis antenas monopolo. O uso da KNN é dada pela sua simplicidade em comparação com outros modelos de inteligência computacional (como as redes perceptron e máquinas de vetores de suporte), pois seu modelo de regressão se baseia apenas na distância das amostras, assim, trocando o tempo de processamento para treino por memória ROM.

Para o treinamento do modelo KNN, foram projetados diversos arranjos variando os valores de k e o raio dos elementos, avaliando-se as frequências de ressonância dos elementos. A base de dados foi construída a partir de simulações no software CST *Studio Suite 2024*. A escolha do CST justifica-se pelo método numérico empregado, a Técnica das Integrais Finitas (*Finite Integration Technique* - FIT), que oferece bom desempenho computacional e resultados comparáveis ao método das diferenças finitas (*Finite-Difference Time-Domain* - FDTD) (Weiland, 2003).

Após a construção da base de dados, o modelo KNN foi implementado em Python (versão 3.13), com o auxílio das funções *KNeighborsRegressor*, com o número de vizinhos igual três, e *MinMaxScaler*, disponibilizadas pela biblioteca *scikit-learn*. Por fim, a validação do modelo foi realizada com uma simulação completa do arranjo, incluindo a configuração de portas de excitação e os materiais empregados na construção do protótipo.

4.2 Ambiente de Simulações

Para o treinamento da rede KNN, as simulações foram feitas considerando apenas metade dos elementos de antenas (três ao invés de seis), fazendo uso da simetria reflexiva presente no modelo para reduzir o tempo de simulação e acelerar a construção do banco de dados. Além disso, para a construção das estruturas para o treino do regressor foi utilizando as condições teóricas perfeitas, com a estrutura do arranjo feita com material condutor elétrico perfeito (*perfect electric conductor* - PEC) e o plano terra infinito. Então, foi feita a análise da resposta em frequência das antenas e das frequências de ressonância das antenas do conjunto, logo, para ter dados suficiente para o treino e teste, foram feitas 145 amostras, resultando no tempo de simulação próximo de 16 horas para a composição do banco de dados desenvolvido numa máquina com o processador Intel Core i3-8130U CPU 2,2 GHz e 12,0 GB de memória RAM. Ademais, os dados foram repartidos em 90% para serem utilizadas no treino e 10 % no teste, porque dessa forma a rede é treinada com dados suficientes para uma boa previsão sem decorar os dados e ter amostras suficientes para uma análise teste confiável.

Já a análise eletromagnética numericamente com os parâmetros obtidos pelo regressão da KNN, o arranjo foi modelado utilizando cobre e fibra de vidro (FR4) presente na biblioteca de materiais do software. O ambiente de simulação foi criado respeitando as condições de contorno do campo distante conforme a equação 3.4. Já as portas de alimentação foram feitas utilizando *discrete port* com sinal de corrente alternada senoidal com amplitude unitária e frequência de 3,5 GHz, por último, o cálculo do campo eletromagnético foi feito utilizando o *Time Domain Solver*, que determina as soluções das equações de Maxwell utilizando a técnica a numérica FIT, para obter a direção, sentido e intensidade das componentes do campo elétrico e magnético do arranjo linear além da perda de retorno das antenas.

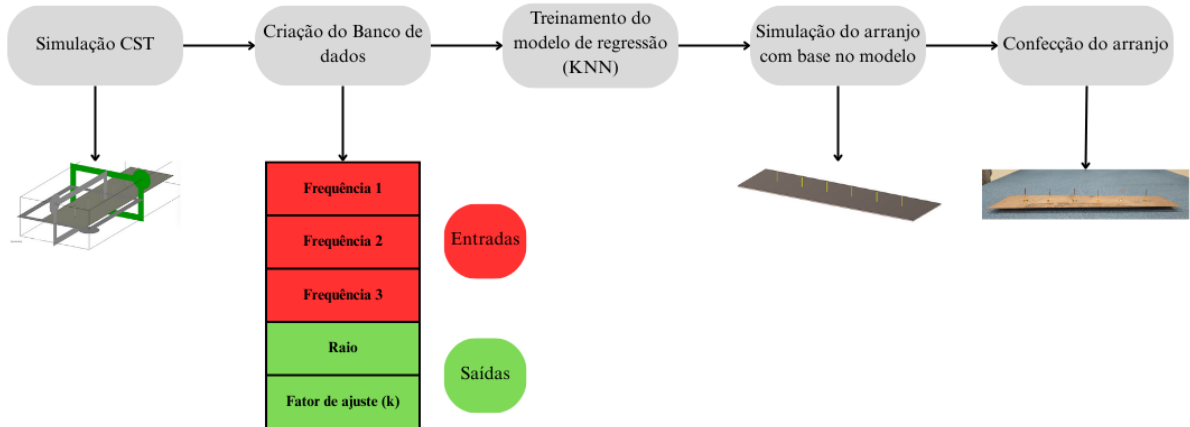
4.3 Projeto do Protótipo

Com base nas dimensões obtidas pela KNN e nas análise eletromagnética feitas no simulador, prosseguiu-se com construção do protótipo do arranjo de seis antenas monopolo. Para isso, foram utilizados conectores SMA de 50 Ω , fios de cobre para os elementos radiantes e uma placa de circuito impresso com substrato dielétrico de FR4 para o plano de terra.

As medições do protótipo foram realizadas no Laboratório de Micro-ondas do Grupo de

Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado (GTEMA), vinculado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), com o auxílio do analisador de redes vetorial Agilent E5071C, capaz de medir o coeficiente de reflexão ($|S_{11}|$) nas faixas entre 300 kHz e 20 GHz. A Figura 15 apresenta um fluxograma com as etapas seguidas no desenvolvimento do projeto.

Figura 15 – Fluxograma das etapas realizadas no projeto.



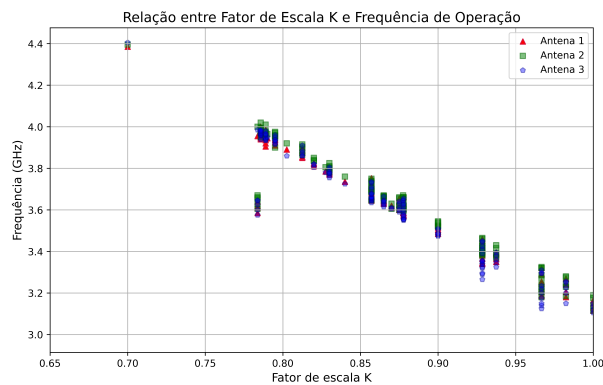
Fonte: Elaborado pelo autor.

5 RESULTADOS

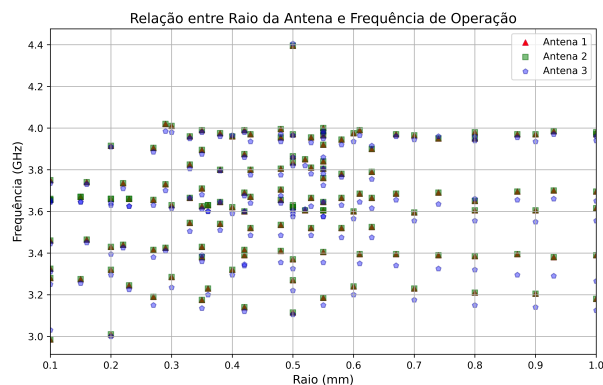
5.1 Regressão via K vizinhos mais próximos

Os principais parâmetros para ajustar a frequência de ressonância das antenas monopolo são o raio do monopolo e o fator de ajuste da altura k , então, criou-se um banco de dados com 145 amostras, cujo possui três entradas (as três frequências de ressonância) e duas saídas (raio e k). Optou-se por três entradas ao invés de seis, pois, como há simetria reflexiva no plano entre as antenas localizadas mais ao centro do arranjo, não se fez necessário simular todas as seis antenas, assim aumentando a velocidade de simulação e construção do banco de dados. As figuras abaixo estão o mapeamento dos dados de entrada e saída para a rede:

Figura 16 – Distribuição dos dados do banco de dados.



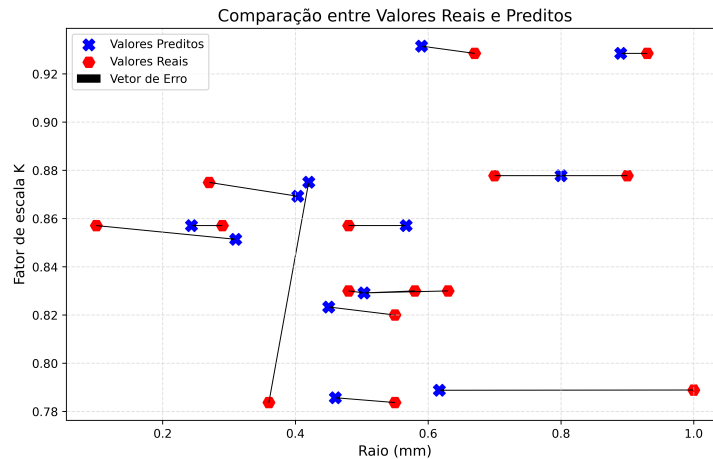
(a) Mapeamento dos dados de k



(b) Mapeamento dos dados de raio

Fonte: elaborado pelo autor.

Para a criação do banco de dados atentou-se em diversificar ao máximo as amostras para aumentar o poder de regressão da KNN. Após o treinamento, foram feitos os testes com a rede e a figura abaixo ilustra o comparativo entre os valores reais e preditos:

Figura 17 – Comparativo entre valores reais e preditos pela KNN

Fonte: elaborado pelo autor.

Além disso, a avaliação de desempenho da KNN para este caso foi realizada utilizando as seguintes métricas: erro quadrático médio (Mean Squared Error - MSE) e coeficiente de determinação (R^2), analisadas individualmente para cada saída da rede. A tabela a seguir resume os resultados obtidos.

Tabela 3 – Desempenho do modelo KNN nas previsões de raio e parâmetro k .

Métrica	Valor
MSE (Raio)	0,0194
MSE (k)	0,0006
R^2 (Raio)	0,6785
R^2 (k)	0,7111

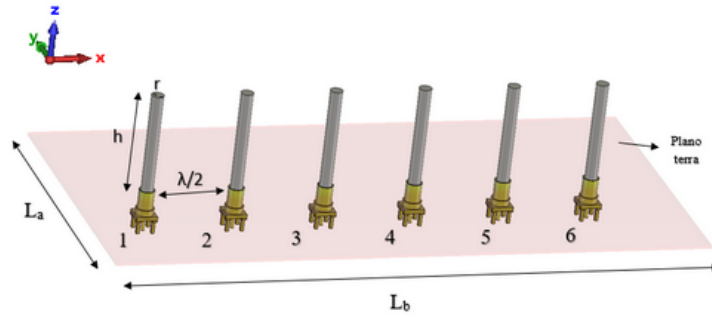
Fonte: elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos demonstram que a rede apresentou bom desempenho na previsão do fator k e do raio. Considerando que o coeficiente de determinação (R^2) varia de 0 a 1, e que valores acima de 0,7 já são considerados satisfatórios, logo, o treinamento foi considerado adequado para esta aplicação. Por último, foi realizada a validação utilizando frequências de entrada da rede em 3,5 GHz, resultando em um raio de 0,51 mm e um fator de escala k igual a 0,9.

5.2 Resultados Simulados

A modelagem computacional do dispositivo no ambiente do CST foi realizada após a determinação dos valores do raio e do fator k . Na qual foi considerado plano de terra em cobre e substrato dielétrico de fibra de vidro (FR4), com constante dielétrica igual a 4,3, e fio de cobre com 0,5 mm de raio. O arranjo modelado no ambiente computacional é apresentado na figura 18, e a tabela 4 detalha as dimensões:

Figura 18 – Estrutura do arranjo linear de seis elementos construído no ambiente virtual.



Fonte: elaborado pelo autor.

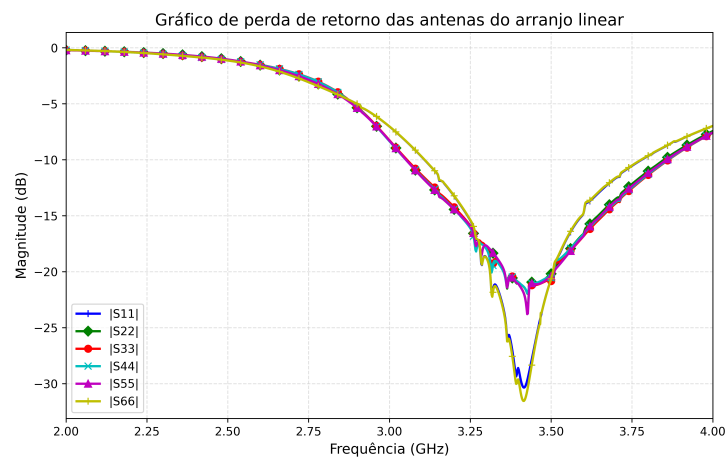
Tabela 4 – Desempenho do modelo KNN nas previsões de raio e parâmetro k .

Dimensão	Valor
Diâmetro	1,00 mm
h	19,27 mm
$L_a \times L_b$	$88 \times 300 \text{ mm}^2$
L_c	1,0 mm

Fonte: elaborado pelo autor.

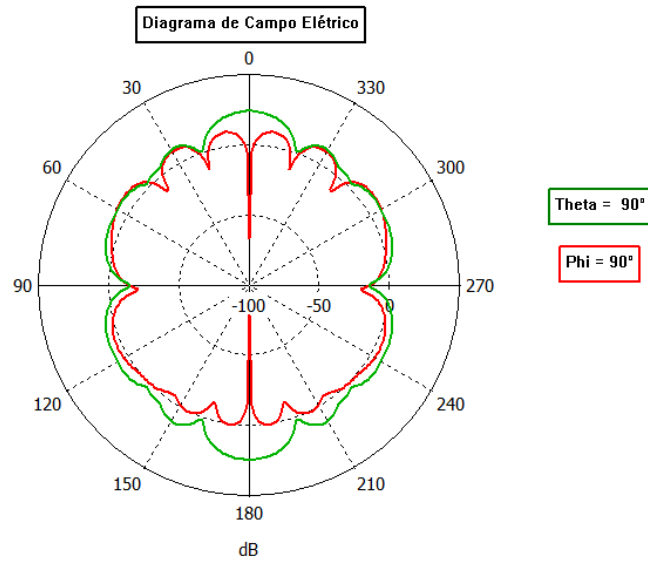
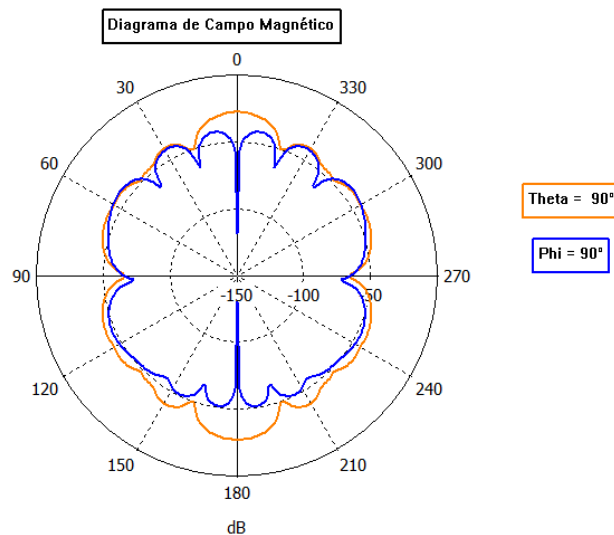
Pela simulação baseada no modelo de regressão, nota-se que a frequência de ressonância dos elementos é de 3,426 GHz, com largura de banda variando entre 700 MHz e 800 MHz, apresentando perdas de retorno entre -22 dB e -30 dB. Ademais, a frequência de interesse, 3,5 GHz, está dentro da largura de banda efetiva das antenas, com valores médios de perda de retorno próximos a -20 dB e a diferença entre a frequência simulada e a frequência de interesse representa um erro percentual de aproximadamente 2,11%, o que é considerado excelente para aplicações em sistemas de comunicação com antenas de banda larga.

Figura 19 – Gráfico de perda de retorno dos elementos do arranjo linear.



Fonte: elaborado pelo autor.

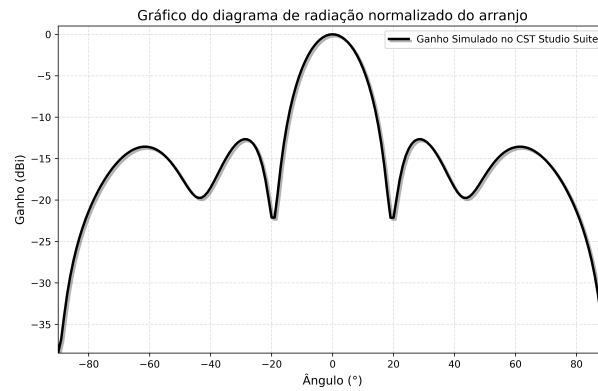
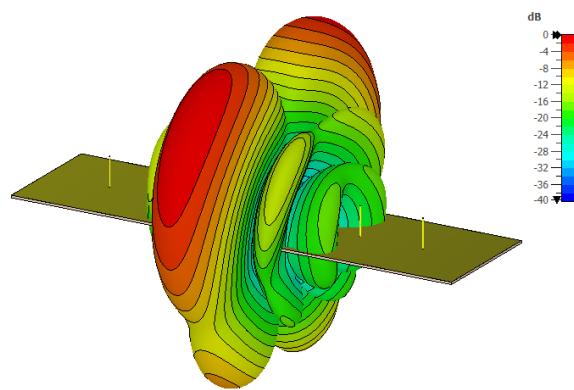
A distribuição do campo irradiado pelo arranjo e apresentado na figura 20:

Figura 20 – Diagrama de radiação para o campo elétrico e magnético na forma cartesiana.**(a) Campo elétrico****(b) Campo magnético**

Fonte: elaborado pelo autor.

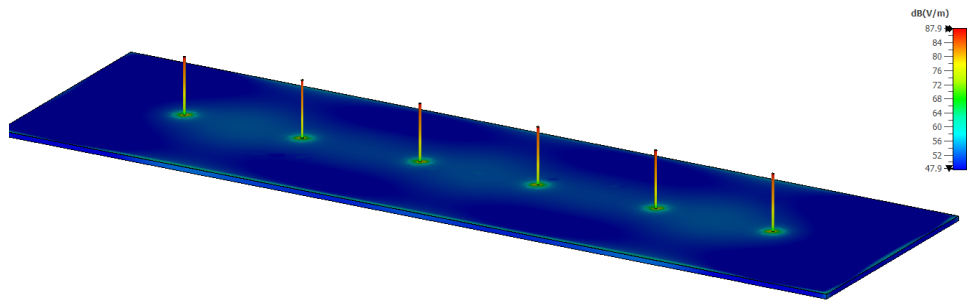
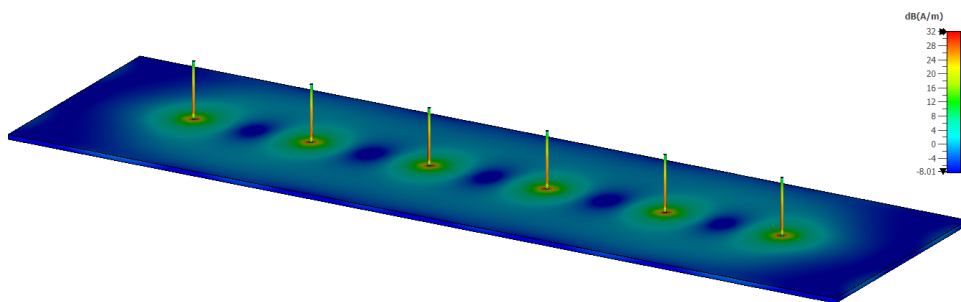
Conforme o resultado anterior, é possível verificar que o arranjo linear com seis elementos apresenta propriedade diretiva de irradiação, cujo lóbulo principal apresenta pico de potência transmitida de 23,8 dB (V/m) para o campo elétrico, e pico de -27,7 dB (A/m) para o campo magnético.

Os resultados calculados numericamente demonstram que a largura de feixe de meia potência (Half-Power Beam Width - HPBW) tem abertura de 17° , e lóbulo principal direcionado em θ igual 0° . Além disso, é possível verificar que o ganho máximo do arranjo se dá em torno de 1,44 dBi, e diagrama totalizando quatro lóbulos laterais com média de -12,7 dBi.

Figura 21 – Gráficos de ganho da antena.**(a) Gráfico de ganho visão cartesiana****(b) Gráfico de ganho visão tridimensional**

Fonte: elaborado pelo autor.

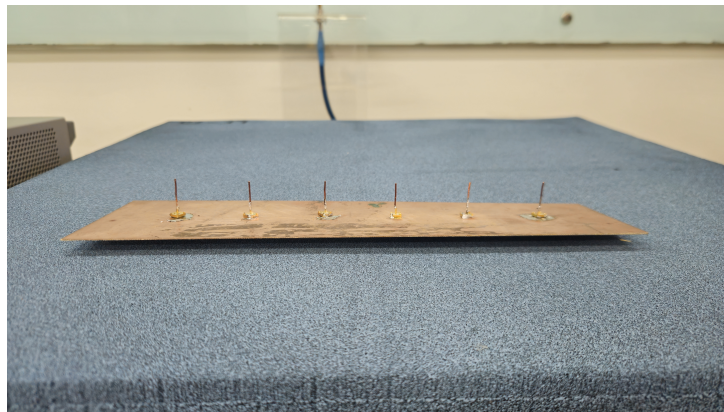
A figura abaixo apresenta o gradiente de cores para a distribuição dos campos elétrico e magnético sobre a superfície condutora do arranjo, antenas e plano de terra. Ficou evidente que o campo elétrico apresenta maior magnitude na extremidade superior das antenas, enquanto que o campo magnético possui picos maiores na extremidade inferior dos elementos.

Figura 22 – Distribuição de campo elétrico e magnético no arranjo de antenas.**(a) Campo elétrico****(b) Campo magnético**

Fonte: elaborado pelo autor.

5.3 Resultados Experimentais

Um protótipo do dispositivo foi fabricado seguindo as dimensões dispostas na tabela 4. A alimentação do arranjo foi realizada através de conectores SMA com impedância de 50Ω a imagem do protótipo é apresentada na figura 23 abaixo.

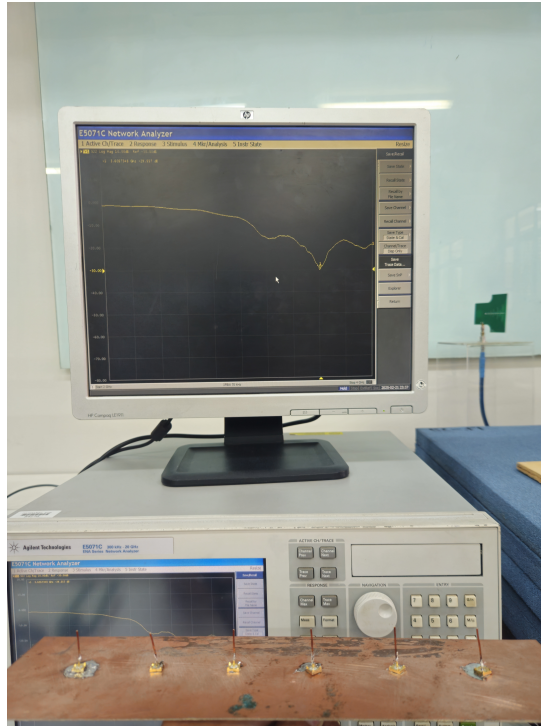
Figura 23 – Visão do protótipo desenvolvido.

Fonte: elaborado pelo autor.

Os resultados experimentais foram obtidos no Laboratório de Micro-ondas GTEMA

do IFPB. Para as medições, utilizou-se um analisador de redes vetorial de duas portas Agilent E5071C, juntamente com cabos coaxiais para alimentação das antenas.

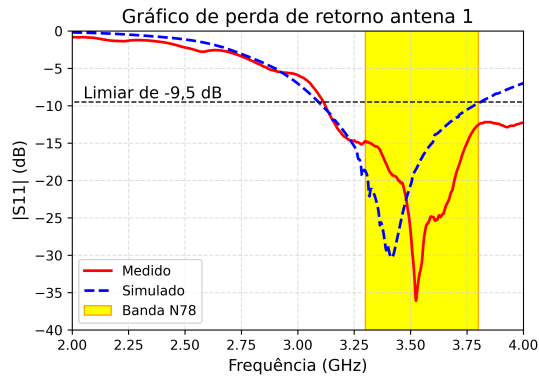
Figura 24 – Medição do protótipo.



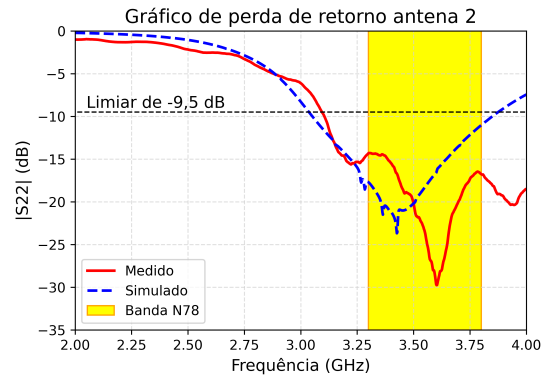
Fonte: elaborado pelo autor.

Após a análise dos resultados experimentais, foi observado um pequeno desvio na frequência central entre os valores medidos e simulados e esse desvio era esperado, devido ao processo de fabricação não ter sido conduzido com precisão industrial e por limitação de equipamentos para este fim. Contudo, ressalta-se que as medições apresentaram magnitudes do S_{11} muito próxima da frequência de interesse, 3,5 GHz, indicando uma convergência entre os resultados. Por fim, outro aspecto a ser notado é que toda a faixa do n78 (3,3-3,8 GHz) é coberta pela antenas tanto nas simulações quanto nas medições, justificando o uso do protótipo desenvolvido para a rede 5G no Brasil e especialmente na região amazônica. As imagens abaixo apresentam os comparativos entre os resultados simulados e medidos para cada antena do arranjo.

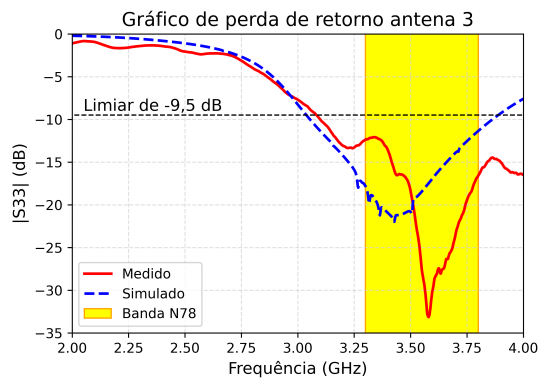
Figura 25 – Gráfico comparativo de perda de retorno entre o medido e o simulado.



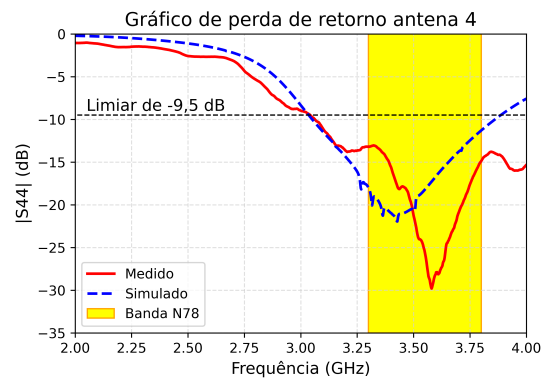
(a) Perda retorno S1,1



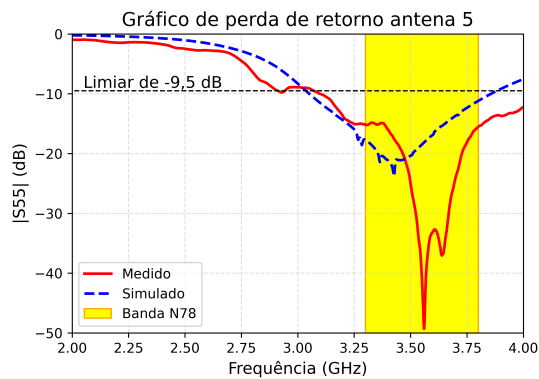
(b) Perda retorno S2,2



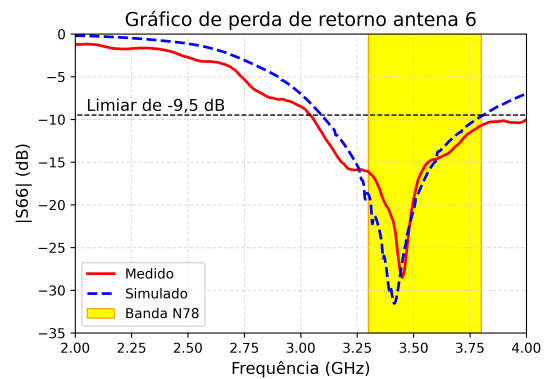
(c) Perda retorno S3,3



(d) Perda retorno S4,4



(e) Perda retorno S5,5



(f) Perda retorno S6,6

Fonte: elaborado pelo autor.

6 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foi apresentado o desenvolvimento e a análise de um arranjo linear composto por seis elementos, projetado para aplicações em sistemas de comunicação de quinta geração (5G) da rede amazônica com parametrização geométrica determinada por um modelo de regressão baseado no K-vizinhos mais próximos. Durante a realização da pesquisa, as principais dificuldades encontradas foram o tempo de simulação tanto para o treino da rede quanto para teste do arranjo, pois, o computador utilizado não era ideal para cálculos matemáticos complexos e modelagem 3D, além disso, a falta de equipamentos e a falta da disciplina de teoria de antenas na graduação de engenharia elétrica dificultaram o entendimento da física do arranjo e confecção do protótipo.

Contudo, o trabalho foi realizado com sucesso com resultado satisfatório. Pelas simulações numérico notou-se a similaridade dos resultados com o descrito na teoria, como a diretividade do ganho do arranjo, ideal para maximizar o feixe de radiação para direções de interesse, além minimizar para os pontos de interferências. Ademais, a concordância entre os resultados experimentais e simulados são fundamentais para a validação do projeto, pois, dessa forma possibilita a confecção em larga escala do sistema de antenas simples e barato para democratizar a internet móvel para a população da região amazônica, podem operar em diversas faixa da banda S do espectro de frequência utilizado pelo 5G.

6.1 Trabalhos Futuros

- Com a metodologia adotada neste texto, espera-se confeccionar novas estruturas de arranjo de antenas com o auxílio de ferramentas de construção mais sofisticadas, para aumentar a precisão e o erro entre as dimensões simuladas e experimentais, e expandir a construção para os arranjo bidimensionais planares e circulares;
- Além disso, realizar estudos mais aprofundados sobre técnicas de inteligência para o fim de modelagem de dispositivos eletromagnéticos, com antenas, filtros, absorvedores, frequência seletivo, etc. Para determinar os melhores modelos para regressão e otimização dos dispositivos
- Por último, como antenas inteligentes são baseados em técnicas de arranjo de antenas, espera-se realizar trabalhos envolvendo arranjos de antenas adaptativos para aplicações na região amazônica

REFERÊNCIAS

- ANATEL. *Tecnologia 5G*. 2021. <<https://www.gov.br/anatel/pt-br/assuntos/5G/tecnologia-5g>>. Acessado em: 6 maio 2024.
- ANATEL. *5G Completa Dois Anos de Implantação no Brasil*. 2024. <<https://www.gov.br/anatel/pt-br/assuntos/noticias/5g-completa-dois-anos-de-implantacao-no-brasil>>. Acessado em: 6 maio 2024.
- BALANIS, C. A. *Teoria de antenas: análise e síntese*. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2009. v. 1.
- BENMAHMOUD, F.; TEDJINI, S. Miniaturized 3d multi-segment wire antenna for 5g. In: *2021 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 705–706.
- BJÖRNSSON, E.; DEMIR, *Introduction to Multiple Antenna Communications and Reconfigurable Surfaces*. [S.l.]: now Publishers Inc., 2024.
- CARR, J. J.; HIPPLE, G. W. *Practical Antenna Handbook*. 5th. ed. New York: McGraw-Hill, 2007. ISBN 978-0071493314.
- CHAPRA, S. C. *Metodos numericos aplicados com MATLAB para engenheiros e cientistas*. 3. ed. Porto Alegre: AMGH Editora LTDA., 2013.
- CHEN, Z. N.; LUK, K. *Antennas for Base Station: in Wireless Communications*. 1. ed. [S.l.]: The McGraw-Hill Companies, 2009.
- COVER, T.; HART, P. Nearest neighbor pattern classification. *IEEE Transactions on Information Theory*, v. 13, n. 1, p. 21–27, 1967.
- DRABOWITZ S., e. a. *Modern Antennas*. 1. ed. Reino Unido: Chapman & Hall, 1998.
- FILHO, E. J. M. A.; CAVALCANTE, G. P. S. A neural adaptive array antenna to reduces interference signals in communications systems. In: *1997 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference. 'Linking to the Next Century'. Proceedings*. [S.l.: s.n.], 1997. v. 1, p. 303–306 vol.1.
- FUSCO, V. F. *Teoria e Técnicas de Antenas: Princípios e Prática*. 1. ed. Porto Alegre: Bookman Companhia Editora LTDA, 2006.
- GAUSS, C. F. *Theoria motus corporum coelestium in sectionibus conicis solem ambientium*. Hamburg: Perthes et Besser, 1809. Tradução do título: "Teoria do movimento dos corpos celestes em seções cônicas ao redor do Sol".
- GROSS, F. B. *Smart Antennas with MATLAB*. 2. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2015.
- GUPTA, G.; HARISH, A. R.; GOGINENI, S. P. Wideband high gain hybrid l-pda-yagi antenna. In: *2022 IEEE Wireless Antenna and Microwave Symposium (WAMS)*. [S.l.: s.n.], 2022. p. 1–4.
- HAYKIN, S. *Redes Neurais: Princípios e Prática*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2007. 185 p. E-book. Disponível em: <<https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788577800865/>>. Acesso em: 10 mai. 2025. ISBN 9788577800865.

Huawei Technologies CO., LTD. *5G Antenna White Paper: New 5G, New Antenna*. Shenzhen, 2019.

KAUSAR, Z. et al. Monopole antenna array design for 3 t and 7 t magnetic resonance imaging. *PLoS ONE*, v. 14, n. 4, 2019.

LAVIANO, E. *Os Desafios do 5G no Interior da Amazônia*. 2023. <<https://www.liberalamazon.com/pt-BR/infraestrutura/news/os-desafios-do-5g-no-interior-da-amazonia>>. Acesso em: 7 de junho de 2025.

LEGENDRE, A.-M. *Nouvelles méthodes pour la détermination des orbites des comètes*. Paris: Courcier, 1805.

LENZ M. L., e. a. *Fundamentos de aprendizagem de máquina*. [S.l.]: SAGAH, 2020.

QUEIROZ, S. K. S. S. Estudos para aplicações na tecnologia 5g em 3,5 ghz com arranjo de patch retangular e circular e inserção de ebg em antenas de microfita. In: ORGANIZAÇÃO DO ECOP 2020. *Anais do Encontro de Computação do Oeste Potiguar (ECOP 2020)*. Mossoró, 2020. (Edição Pocket, v. 1).

RIBEIRO, D.; CARRIJO, G. Smart fractal antennas in transition projects to 5g. *IEEE Latin America Transactions*, v. 20, n. 12, p. 2463–2470, 2022.

RODDY, D. *Satellite Communications*. 4. ed. EUA: The McGraw-Hill Companies, 2006.

SADIKU, M. N. O. *Elementos de Eletromagnetismo*. 5. ed. Porto Alegre: Bookman Companhia Editora LTDA, 2012.

SALEH, A. M. et al. Impact of different finite mimo array geometries on system throughput with considering mutual coupling and edge effect between array elements. *Ain Shams Engineering Journal*, v. 12, n. 3, p. 2823–2838, 2021. ISSN 2090-4479. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S209044792100112X>>.

STUTZMAN, W. L.; THIELE, G. A. *Antenna Theory and Design*. 4. ed. EUA: John Wiley & Sons, Inc., 2013.

WEILAND, T. Finite integration method and discrete electromagnetism. In: *Computational Electromagnetics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003. p. 183–198. ISBN 978-3-642-55745-3.

WU, S.; XU, J.; CHEN, Q. High-gain omnidirectional horizontally polarized dipole array for sub-6 base station. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, v. 22, n. 7, p. 1652–1656, 2023.