

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

FELIPE ANTUNES DE LIMA

SISTEMA PORTÁTIL PARA ENSINO PRÁTICO E CARACTERIZAÇÃO DO
DIAGRAMA DE RADIAÇÃO DE ANTENAS UHF

Itajaí

2025

FELIPE ANTUNES DE LIMA

SISTEMA PORTÁTIL PARA ENSINO PRÁTICO E CARACTERIZAÇÃO DO
DIAGRAMA DE RADIAÇÃO DE ANTENAS UHF

Monografia submetida ao curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - Câmpus Itajaí como requisito para a obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. Roddy Alexander Romero Antayhua

Coorientador: Me. Douglas Alexandre Rodrigues de Souza

Itajaí

2025

Ficha de Identificação da obra elaborada pelo autor, através do cadastro de ficha de identificação disponível no portal discente do Sistema Integrado de Gestão Acadêmica - SIGAA, do IFSC.

Lima, Felipe Antunes de

Sistema portátil para ensino prático e caracterização do diagrama de radiação de antenas uhf / Felipe Antunes de Lima;

Orientador(a): Roddy Alexander Romero Antayhua; Coorientador(a): Douglas Alexandre Rodrigues de Souza. - Itajaí, SC, 2025.

90 p.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Itajaí. Engenharia Elétrica.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Antenas. 3. Diagrama de Radiação. 4. Radiofrequência. 5. Ensino Prático. I. Antayhua, Roddy Alexander Romero. II. Souza, Douglas Alexandre Rodrigues de. III. Instituto Federal de Santa Catarina. Engenharia Elétrica. IV. Sistema portátil para ensino prático e caracterização do diagrama de radiação de antenas uhf.

FELIPE ANTUNES DE LIMA

SISTEMA PORTÁTIL PARA ENSINO PRÁTICO E CARACTERIZAÇÃO DO
DIAGRAMA DE RADIAÇÃO DE ANTENAS UHF

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

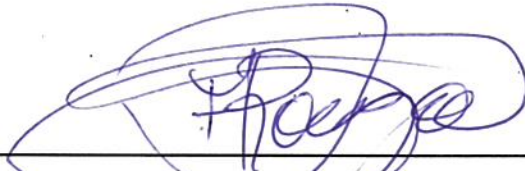
Itajaí, 08 de dezembro de 2025.



Prof. Dr. Eng. Roddy Alexander Romero Antayhua

Orientador

Instituto Federal de Santa Catarina - Câmpus Itajaí



Prof. Me. Eng. Douglas Alexandre Rodrigues de Souza

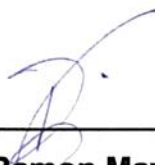
Coorientador

Instituto Federal de Santa Catarina - Câmpus Itajaí



Prof. Dr. Eng. Tiago Drummond Lopes

Instituto Federal de Santa Catarina - Câmpus Itajaí



Prof. Dr. Sc. Ramon Mayor Martins

Instituto Federal de Santa Catarina - Câmpus São José

Dedico este trabalho a Deus, por me dar força e guiar meus passos. À minha namorada, pelo amor, paciência e apoio incondicional. Aos meus familiares, por serem minha base e inspiração. E aos meus amigos, pela parceria e grandes momentos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder a saúde e a força necessárias para completar esta jornada e me tornar engenheiro.

À minha namorada, Laryssa, por todo o apoio, companheirismo, e por compartilhar do meu sonho e acreditar em mim.

Agradeço aos meus pais, Julio e Patricia, e ao meu irmão Julio, por serem o alicerce fundamental em minha vida e por me darem o impulso necessário para realizar meus sonhos.

Agradeço à minha avó, Julia, que mesmo de longe, sempre investiu em mim, e ao meu avô, João Maria, que não pude conhecer, mas sei que sempre me guiou em minha jornada. Agradeço aos meus falecidos avós, Rita e Jorge, por serem minha inspiração de vida e meus principais incentivadores. Agradeço ao meu falecido tio, Marcus Vinicius, que de todas as maneiras torceu por mim e me motivou.

A todos os meus parentes e aos familiares da minha namorada, pelo carinho e pela torcida demonstrados ao longo do caminho.

Agradeço aos meus amigos Luiz Fernando e Yan, pela verdadeira amizade e apoio criados durante a minha trajetória. Agradeço a todos os amigos que fiz nesta jornada acadêmica e que me ajudaram a concluir este ciclo.

Ao Gustavo e à HBR Marine, meu reconhecimento pela confiança em meu potencial profissional e pelas oportunidades concedidas.

Obrigado a todos os meus professores, em especial ao meu orientador, Roddy, pela paciência, orientação e por sempre se empenhar em auxiliar os alunos.

RESUMO

O ensino prático de antenas em engenharia é frequentemente limitado pelo alto custo e complexidade de equipamentos de análise comercial, ou pela dependência de instrumentos externos em protótipos acadêmicos. Tendo isto em vista, o trabalho busca suprir a ausência de equipamentos laboratoriais acessíveis, comum em instituições de ensino, e integrar teoria e prática por meio de uma ferramenta que permita medições indiretas de potência recebida em função ao ângulo de incidência da onda eletromagnética na antena. O sistema desenvolvido concentra-se na recepção de sinais de radiofrequência (RF) e na elaboração do diagrama de radiação, empregando uma arquitetura baseada em microcontrolador, detector de potência AD8313, sensor angular AS5600 e motor de passo NEMA 17 para o posicionamento preciso da antena receptora. A metodologia incluiu a elaboração do modelo do sistema, implementação da eletrônica de controle, desenvolvimento do *software* de aquisição e processamento dos dados, além da integração de recursos de armazenamento local e exportação automática para nuvem. Ensaios experimentais foram conduzidos com diferentes tipos de antenas e parâmetros de varredura, permitindo avaliar a repetibilidade, resolução e coerência dos diagramas obtidos em comparação com padrões teóricos. Os resultados demonstraram que o protótipo foi capaz de caracterizar adequadamente distintos padrões de radiação, apresentando comportamento consistente frente às variações de passo angular e quantidade de amostras por ponto. Conclui-se que o protótipo desenvolvido constitui uma ferramenta eficaz e acessível, representando uma contribuição significativa para o ensino de engenharia elétrica ao facilitar a conexão indispensável entre a teoria e a prática no estudo de antenas, com potencial para futuras melhorias como um sistema de antitorção aprimorado e uma interface de controle móvel.

Palavras-Chave: Sistema Didático. Antenas. Diagrama de Radiação. Detector de Potência.

ABSTRACT

Hands-on antenna education in engineering is often limited by the high cost and complexity of commercial analysis equipment, or by the reliance on external instruments in academic prototypes. With this in mind, the work seeks to supply the absence of accessible laboratory equipment, common in educational institutions, and to integrate theory and practice through a tool that allows for indirect measurements of received power as a function of the angle of incidence of the electromagnetic wave on the antenna. The developed system focuses on the reception of radiofrequency (RF) signals and the generation of the radiation pattern, employing a microcontroller-based architecture, an AD8313 power detector, an AS5600 angular sensor, and a NEMA 17 stepper motor for the precise positioning of the receiving antenna. The methodology included the system model design, implementation of control electronics, development of data acquisition and processing software, as well as the integration of local storage and automatic cloud export features. Experimental trials were conducted with different antenna types and scanning parameters, allowing the evaluation of the repeatability, resolution, and consistency of the obtained patterns compared to theoretical standards. The results demonstrated that the prototype was capable of adequately characterizing distinct radiation patterns, exhibiting consistent behavior when subjected to variations in angular step size and the number of samples per point. It is concluded that the developed prototype constitutes an effective and accessible tool, representing a significant contribution to electrical engineering education by facilitating the essential link between theory and practice in the study of antennas. It has potential for future improvements, such as an enhanced anti-torsion system and a mobile control interface.

Keywords: Didactic System. Antennas. Radiation Pattern. Power Detector.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – <i>Antenna Trainer</i> AT-01	15
Figura 2 – Antena como um dispositivo de transição	21
Figura 3 – Configuração de antenas filamentosas	22
Figura 4 – Configuração de antenas de abertura	22
Figura 5 – Lóbulos de radiação de um diagrama de antena	23
Figura 6 – Gráfico linear de um diagrama de potência.....	24
Figura 7 – Diagrama de radiação de uma antena omnidirecional	25
Figura 8 – Diagrama de radiação de uma antena direcional	26
Figura 9 – Regiões de campo	27
Figura 10 – Sistema de medição de antenas	28
Figura 11 – Bancada didática EANC	30
Figura 12 – Plataforma medição de antenas na faixa de micro-ondas.....	31
Figura 13 – Posicionador de antenas automatizado de baixo custo	32
Figura 14 – Diagrama de blocos sistema didático	33
Figura 15 – Motor de passo Nema 17	34
Figura 16 – <i>Driver</i> Motor de Passo TMC2208	35
Figura 17 – Diagrama de ligação TMC2208.....	35
Figura 18 – Sensor Angular AS5600	36
Figura 19 – Resolução 12 bits AS5600	36
Figura 20 – Módulo detector de potência de radiofrequência AD8313.....	38
Figura 21 – <i>Display</i> LCD 16x2 com I2C	38
Figura 22 – Teclado Matricial de Membrana 4x4	39
Figura 23 – Módulo expensor I2C PCF8574	40
Figura 24 – Módulo cartão MicroSD	41
Figura 25 – Sensor de temperatura DS18B20	41
Figura 26 – <i>Cooler</i> 12V	42
Figura 27 – <i>Buzzer</i>	43
Figura 28 – Placa de desenvolvimento ESP32	43
Figura 29 – Pinagem do microcontrolador ESP32	44
Figura 30 – Bateria de íon-Lítio 7,4V	45
Figura 31 – Voltímetro digital.....	45
Figura 32 – Fonte de alimentação 12V	46

Figura 33 – Módulo Regulador de Tensão <i>Step Down</i> XL4015.....	47
Figura 34 – Módulo Regulador de Tensão <i>Step Up</i> MT3608.....	47
Figura 35 – Placa perfurada protótipo de teste	51
Figura 36 – Placa de circuito impresso sistema geral	52
Figura 37 – Placa de circuito impresso detector de potência	52
Figura 38 – Curva de relação entre a tensão de saída e a potência AD8318	56
Figura 39 – Configuração geral teste prático.....	57
Figura 40 – Projeto 3D modelado do sistema	59
Figura 41 – Vista frontal do sistema didático.....	59
Figura 42 – Vista interna do sistema didático.....	60
Figura 43 – Vista Geral do sistema didático	60
Figura 44 – Configuração ensaio antena <i>Quasi-Yagi Uda</i> plano H	61
Figura 45 – Configuração ensaio antena dipolo plano H.....	62
Figura 46 – Referência de diagrama de radiação antena <i>Quasi-Yagi Uda</i>	63
Figura 47 – Diagrama de radiação antena <i>Quasi-Yagi Uda</i> configuração padrão.....	63
Figura 48 – Referência de diagrama de radiação antena dipolo plano H.....	64
Figura 49 – Diagrama de radiação antena dipolo plano H configuração padrão.....	65
Figura 50 – Configuração ensaio antena dipolo plano E.....	66
Figura 51 – Referência de diagrama de radiação antena dipolo plano E.....	67
Figura 52 – Diagrama de radiação antena dipolo plano E configuração padrão.....	67
Figura 53 – Configuração ensaio antena <i>Quasi-Yagi Uda</i> distância de 100cm.....	68
Figura 54 – Diagrama de radiação antena <i>Quasi-Yagi Uda</i> distância de 100cm	69
Figura 55 – Diagrama de radiação antena <i>Quasi-Yagi Uda</i> com 15 medições	70
Figura 56 – Diagrama de radiação antena <i>Quasi-Yagi Uda</i> com 1° de passo.....	71

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Faixas de frequências em conformidade UIT	19
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ADC – Conversores Analógico-Digitais
- AM – Amplitude Modulada
- ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações
- BMS – Sistema de Gerenciamento de Bateria
- CNC – Controle Numérico Computadorizado
- CSV – *Comma-Separated Values* (valores separados por vírgulas)
- DAC – Conversores Digital-Analógicos
- EHF – *Extremely High Frequency* (frequência extremamente alta)
- FAT/FAT32 – *File Allocation Table* (tabela de alocação de arquivos)
- FM – Frequência Modulada
- GPIOs – Entrada e Saída de Propósito Geral
- HF – *High Frequency* (frequência alta)
- I2C – Circuito Inter-Integrado
- IDE – Ambiente de Desenvolvimento Integrado
- IoT – *Internet of Things* (*internet* das coisas)
- LCD – *Display* de Cristal Líquido
- LED – Diodo Emissor de Luz
- LF – *Low Frequency* (frequência baixa)
- Li-ion – Íon-Lítio
- LoRA – *Long Range* (tecnologia de longo alcance)
- MF – *Medium Frequency* (frequência média)
- MicroSD – *Micro Secure Digital* (micro digital seguro)
- MicroSDHC – *Micro Secure Digital High Capacity* (micro digital seguro de alta capacidade)
- NTP – Protocolo de Tempo de Rede
- PCI – Placas de Circuito Impresso
- RF – Radiofrequência
- RFID – *Radio-Frequency Identification* (identificação por radiofrequência)
- RSSI – *Received Signal Strength Indicator* (indicador de intensidade do sinal recebido)
- SCL – *Serial Clock*
- SDA – *Serial Data*

SDR – Rádio Definido por *Software*

SHF – *Super High Frequency* (frequência super alta)

SPI – *Serial Peripheral Interface* (interface periférica serial)

SWR – *Standing Wave Ratio* (razão de onda estacionária)

UHF – *Ultra High Frequency* (frequência ultra alta)

UIT – União Internacional de Telecomunicações

VHF – *Very High Frequency* (frequência muito alta)

VLF – *Very Low Frequency* (frequência muito baixa)

VNA – *Vector Network Analyzer* (analisador vetorial de redes)

Wi-Fi – *Wireless Fidelity* (fidelidade sem fio)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	15
1.2	Objetivos	16
1.2.1	Objetivo geral	16
1.2.2	Objetivo específico	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Definições	18
2.1.1	Radiofrequência	18
2.1.2	Faixa UHF	19
2.1.3	Antenas	20
2.1.4	Diagrama de Radiação	23
2.1.5	Diretividade	24
2.2	Sistemas de Análise de Antenas	26
2.3	Sistemas Didáticos Existentes para Análise de Antenas	28
2.3.1	Sistemas Didáticos Comerciais	29
2.3.2	Protótipos Acadêmicos Desenvolvidos	30
3	DESENVOLVIMENTO	33
3.1	Materiais utilizados	33
3.1.1	Motor de Passo Nema 17	33
3.1.2	<i>Driver</i> Motor de Passo TMC2208	34
3.1.3	Sensor Angular AS5600	36
3.1.4	Módulo Detector de Potência de Radiofrequência AD8313	37
3.1.5	<i>Display</i> LCD 16x2 com I2C	38
3.1.6	Teclado Matricial de Membrana 4x4	39
3.1.7	Módulo Expansor I2C PCF8574	39
3.1.8	Módulo Cartão MicroSD	40
3.1.9	Sensor de Temperatura DS18B20	41
3.1.10	<i>Cooler</i> 12V	42
3.1.11	<i>Buzzer</i>	42
3.1.12	Microcontrolador ESP32	43
3.1.13	Bateria de Íon-Lítio 7,4V	44
3.1.14	Voltímetro Indicador de Bateria	45

3.1.15 Fonte de Alimentação 12V	46
3.1.16 Módulo Regulador de Tensão <i>Step Down</i> XL4015	46
3.1.17 Módulo Regulador de Tensão <i>Step Up</i> MT3608.....	47
3.2 Circuito Projetado.....	47
3.2.1 Circuito de Alimentação.....	48
3.2.2 Circuito de Controle.....	49
3.2.3 Placa de Circuito Impresso.....	51
3.3 Código e Comunicação.....	53
3.3.1 Código IDE	53
3.3.2 Código <i>Apps Script</i>	55
3.4 Método de Testes	55
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	59
4.1 Comparação dos Tipos de Antenas	61
4.2 Comparação dos Planos de Medição.....	65
4.3 Análise do Efeito da Distância	68
4.4 Análise do Efeito das Amostras... ..	69
4.5 Análise do Efeito do Passo... ..	70
5 CONCLUSÃO	73
REFERÊNCIAS.....	75
APÊNDICE A – Circuito de Alimentação Projetado	79
APÊNDICE B – Circuito de Controle Projetado.....	80
APÊNDICE C – Fluxograma Verificação Inicial	81
APÊNDICE D – Fluxograma Menu Inicial.....	82
APÊNDICE E – Fluxograma Menu Configurações	83
APÊNDICE F – Fluxograma Menu Mais Configurações	84
APÊNDICE G – Fluxograma Código <i>Apps Script</i>.....	85
APÊNDICE H – Código Implementado no <i>Apps Script</i>.....	86
APÊNDICE I – Configuração Ensaios Práticos	89
APÊNDICE J – Tabela de Componentes e Custos.....	90

1 INTRODUÇÃO

A análise de sinais de radiofrequência (RF) desempenha um papel importante no estudo de sistemas de comunicações e antenas, especialmente na área educacional, onde a prática é indispensável para melhorar o entendimento e o desempenho na formação acadêmica. A aprendizagem baseada em atividades práticas tem se mostrado um método eficaz de forma aumentar a motivação e o engajamento dos estudantes de engenharia, facilitando a conexão entre conceitos teóricos e aplicações do mundo real (Attia *et al.*, 2017). Uma análise realizada por Oje, Adesope e Oje (2021) apoia essa visão, demonstrando um impacto positivo e estatisticamente significativo na aprendizagem prática e motivação dos alunos nas áreas de ciência e tecnologia.

No campo das telecomunicações, que abrange desde a teoria eletromagnética até o projeto de antenas e redes de comunicações, a experimentação é fundamental. A recepção da potência de um sinal em antenas UHF (*Ultra High Frequency* – frequência ultra alta), por exemplo, quando realizada de forma experimental, facilita a compreensão de conceitos complexos como ganho e diagrama de radiação, que muitas vezes permanecem abstratos no ensino teórico (Moreira, 2023).

Um obstáculo significativo para instituições de ensino técnico e superior é a ausência de dispositivos acessíveis e portáteis que possibilitam medições e análises. Em muitos casos, os laboratórios enfrentam desafios relacionados ao alto custo de equipamentos comerciais sofisticados, o que pode limitar o acesso dos estudantes a experiências práticas essenciais (Achuthan; Murali, 2015). A automação da coleta de dados, é desejável para otimizar o tempo em laboratório e reduzir erros de medições manuais, que podem ser processos repetitivos e desmotivadores (Franco, 2016).

Nesse contexto, o desenvolvimento de *kits* didáticos de baixo custo, baseados em plataformas de *hardware* abertas e acessíveis, surge como uma solução promissora. Esses *kits* não apenas suprem a carência de equipamentos acessíveis, mas também promovem maior autonomia dos estudantes e ampliam as possibilidades de aprendizado prático (Quintino *et al.*, 2016). Atualmente, o mercado oferece soluções como o *Antenna Trainer* AT-01 da KITEK, conforme ilustrado na Figura 1, e a bancada didática EANC da Edibon. Embora esses produtos respondam à demanda por ferramentas práticas, seu alto custo e complexidade dificultam a sua implementação em instituições de ensino.

Figura 1 – Antenna Trainer AT-01



Fonte: Kitek Technologies (2025).

Para solucionar os desafios práticos na análise de antenas, este projeto propõe o desenvolvimento de um sistema didático, automatizado e portátil para a faixa de UHF (300 MHz a 3 GHz), visando superar as dificuldades do aprendizado prático. O sistema concentra-se na movimentação controlada e da medição da intensidade do sinal da antena receptora, gerando dados para a plotagem do diagrama polar de irradiação, permitindo a caracterização e identificação da antena sob teste.

1.1 Justificativa

A crescente demanda por profissionais capacitados na área de engenharia de telecomunicações reforça a importância de ferramentas didáticas que integrem teoria e prática. A análise de parâmetros como ganho e diagrama de radiação de antenas é fundamental nesse campo, porém, muitas instituições de ensino enfrentam restrições orçamentárias que impedem a aquisição de equipamentos de laboratório, limitando o acesso dos estudantes a experiências práticas essenciais.

As soluções comerciais existentes, como a Antenna Trainer AT-01 da KITEK, embora úteis, possuem um sistema de captação de dados manual e têm um custo aproximado entre 1.000 e 1.200 dólares. Em um patamar superior, sistemas como a Bancada Didática EANC da Edibon oferecem automação completa e controle via *software* SCADA para "simulação industrial real", características que sugerem um

custo ainda mais elevado e uma complexidade que pode ser excessiva para o ensino de conceitos introdutórios.

A faixa UHF foi definida para este projeto devido ao fato de suas antenas serem menores e mais leves em comparação com as de frequências mais baixas. Essa característica possibilita o desenvolvimento de um módulo portátil, facilitando seu uso em diferentes ambientes de aprendizagem, tanto em laboratório quanto em campo. Além disso, a faixa UHF é amplamente utilizada em diversas aplicações práticas, como RFID, Wi-Fi e LoRA, tornando o aprendizado diretamente aplicável a tecnologias do dia a dia.

O sistema proposto pode contribuir significativamente para o aprimoramento da compreensão de sistemas de comunicações e antenas, ao proporcionar uma experiência educacional que simula aplicações reais. O projeto reforça a importância da integração entre *hardware* e *software* no desenvolvimento de soluções tecnológicas, além de explorar conceitos fundamentais de antenas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver um sistema didático automatizado e portátil com foco na recepção de sinais na faixa UHF, que permita a medição de potência de sinais e a elaboração do diagrama de radiação de antenas, atendendo às necessidades de ensino prático em engenharia elétrica.

1.2.2 Objetivo específico

- Projetar e implementar uma estrutura giratória automatizada, controlada por microcontrolador, para o posicionamento angular da antena receptora e gerenciamento da varredura.
- Integrar o módulo detector de potência de RF para coletar dados em diferentes ângulos da varredura.
- Criar uma interface de usuário e implementar um sistema de registro e exportação de dados, permitindo armazenamento local e remoto.
- Desenvolver o sistema de alimentação portátil baseado em uma bateria recarregável e módulo conversor de tensão CC-CC, garantindo os níveis de tensão adequados aos componentes do circuito.
- Realizar a validação do sistema por meio de medições práticas, verificando a

precisão e a consistência dos dados gerados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Definições

Esta seção apresenta termos utilizados em sistemas de comunicações e antenas, fundamentais para o desenvolvimento e a análise do sistema didático proposto.

2.1.1 Radiofrequência

Segundo Kraus e Marhefka (2017), a radiofrequência é definida como a porção do espectro eletromagnético que abrange as frequências nas quais as ondas eletromagnéticas são geradas por correntes elétricas alternadas. Diferentemente de tecnologias que necessitam de um meio físico para a transmissão de dados, como cabos coaxiais e cabos de fibra óptica, as ondas de radiofrequência propagam-se pelo espaço livre.

A interconexão entre campos elétricos e magnéticos que variam no tempo é o mecanismo fundamental que permite a existência e a propagação dessas ondas, incluindo as de radiofrequência, que se movem à velocidade da luz (Griffiths, 2017).

Por ser um espectro vasto, a radiofrequência é subdividida em diversas bandas, cada qual com características e aplicações distintas. Por exemplo, as bandas de VLF (*Very Low Frequency* – frequência muito baixa) e LF (*Low Frequency* – frequência baixa) são empregadas em comunicações de longo alcance e navegação, dada a sua capacidade de contornar obstáculos e seguir a curvatura da Terra (Sklar, 2001). As bandas de MF (*Medium Frequency* – frequência média) e HF (*High Frequency* – frequência alta) são amplamente utilizadas em transmissões de rádio AM (Amplitude Modulada) e comunicações de ondas curtas, aproveitando-se da reflexão ionosférica. Em contraste, as bandas de VHF (*Very High Frequency* – frequência muito alta) e UHF são ideais para rádio FM (Frequência Modulada), televisão, comunicações móveis e redes sem fio, devido à sua menor suscetibilidade a ruídos e à maior largura de banda disponível (Rappaport, 2002). Acima da UHF, encontram-se as bandas de micro-ondas, como SHF (*Super High Frequency* – frequência super alta) e EHF (*Extremely High Frequency* – frequência extremamente alta), essenciais para comunicações via satélite, radar e enlaces ponto a ponto de alta capacidade.

No Brasil, as definições das faixas de frequência e as aplicações de cada banda são estabelecidas pela ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações), em

conformidade com o Regulamento de Rádio da UIT (União Internacional de Telecomunicações), como mostra a Figura 2.

Quadro 1 – Faixas de frequências em conformidade UIT

Símbolo	Faixa de frequências (excluindo o limite baixo, incluindo o limite alto)
VLF	3-30 kHz
LF	30-300 kHz
MF	300-3000 kHz
HF	3-30 MHz
VHF	30-300 MHz
UHF	300-3000 MHz
UHF	300-3000 MHz
SHF	3-30 GHz
EHF	30-300 GHz

Fonte: ANATEL (2025).

A escolha da banda de RF para uma aplicação específica depende das características desejadas para a propagação do sinal, como alcance, penetração em barreiras e capacidade de transmissão de dados (Goldsmith, 2005).

2.1.2 Faixa UHF

A faixa UHF, que abrange o intervalo de 300 MHz a 3 GHz, é internacionalmente definida pela UIT e nacionalmente regulamentada pela ANATEL. Esta porção do espectro eletromagnético é amplamente empregada em sistemas de comunicação modernos devido à sua notável eficiência na transmissão de dados e à sua compatibilidade com dispositivos compactos.

Conforme Rappaport (2002), a faixa UHF é adequada para diversas aplicações, incluindo televisão digital, comunicações móveis, redes *Wi-Fi* e *Bluetooth*. As múltiplas aplicações são dadas pela sua capacidade de oferecer uma largura de banda superior em comparação com faixas de frequência mais baixas, o que viabiliza a transmissão

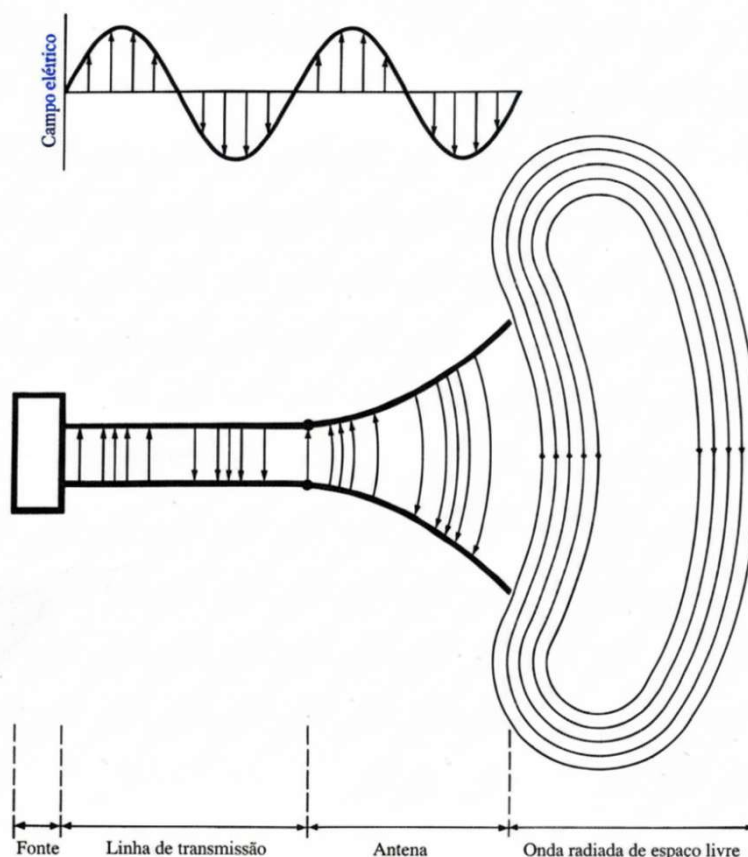
de dados em alta velocidade. De acordo com Balanis (2009), o menor comprimento de onda característico da faixa UHF permite a construção de antenas de dimensões significativamente reduzidas. Essa particularidade simplifica a integração em projetos compactos, tornando a faixa especialmente interessante para o desenvolvimento de dispositivos modernos e eficientes.

Sobre as características de propagação, Kraus e Marhefka (2017) apontam que os sinais em UHF são fortemente influenciados pelas condições do ambiente, como a presença de barreiras e superfícies refletoras. Apesar disso, os sistemas que operam nessa faixa se beneficiam de uma excelente relação entre alcance, penetração e qualidade de sinal, sobretudo em áreas densamente povoadas. Por fim, a faixa UHF possibilita a criação de sistemas de baixo custo e alta aplicabilidade, impulsionando o desenvolvimento de soluções tecnológicas práticas e acessíveis para diversas finalidades.

2.1.3 Antenas

De acordo com Balanis (2009), uma antena é uma estrutura que serve como intermediário entre um dispositivo de transmissão ou recepção, como uma linha de transmissão, e o espaço livre, como visto na Figura 2. Essa função de transição é crucial, pois a antena atua como um elemento de acoplamento de impedâncias, otimizando a transferência de energia entre o sistema de transmissão guiado e o meio não guiado. Em sua função, ela converte sinais elétricos em ondas eletromagnéticas para transmissão, ou captura ondas eletromagnéticas e as converte de volta em sinais elétricos para recepção. Este processo de conversão envolve a aceleração de cargas elétricas na estrutura da antena, que por sua vez gera campos elétricos e magnéticos variantes no tempo, propagando-se como ondas eletromagnéticas no espaço. O mesmo autor enfatiza que as características de uma antena, como sua eficiência e padrão de radiação, são diretamente influenciadas por sua geometria, dimensões e materiais.

Figura 2 – Antena como um dispositivo de transição



Fonte: Balanis (2009).

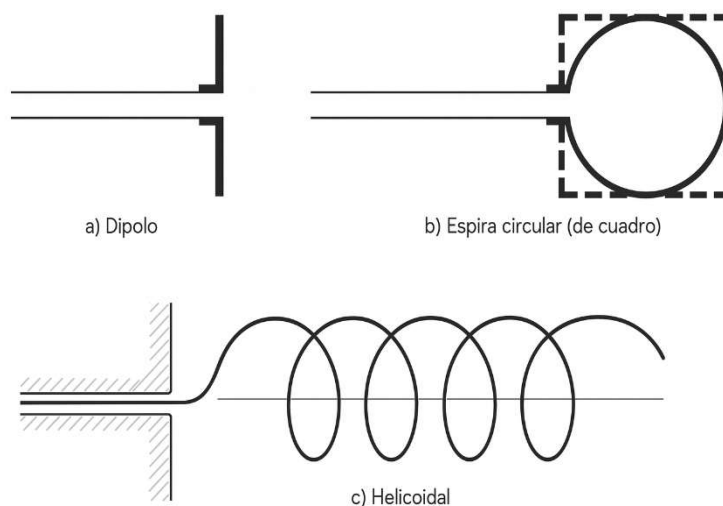
A evolução contínua no *design* desses dispositivos, como apresentado por Tawk, Constantine & Christodoulou (2016), mostra sua crescente complexidade para atender às novas demandas dos sistemas de comunicação. Essa complexidade reflete a necessidade de antenas que operem em múltiplas bandas de frequência que sejam compactas para integração em dispositivos portáteis, ou que possuam capacidades avançadas como configurabilidade, para otimizar a cobertura e a capacidade em ambientes de comunicação dinâmicos.

A antena deve, portanto, assumir diferentes formas para atender a uma particular necessidade, podendo ter a forma de um fio condutor, uma abertura, uma plaqueta (*patch*), um agrupamento de elementos (conjunto), um refletor, uma lente, e assim por diante. (Balanis, 2009, p.3).

As antenas se classificam de diversas formas, como as antenas filamentosas e as antenas de abertura, entre outras, cada uma com aplicações específicas. Nesse contexto, as antenas filamentosas são as mais comuns e estão presentes em inúmeros locais, como automóveis e edificações. Balanis (2009) descreve que essas

antenas podem assumir diversos formatos, incluindo dipolos, antenas de quadro circular e helicoidais, como é mostrado na Figura 3.

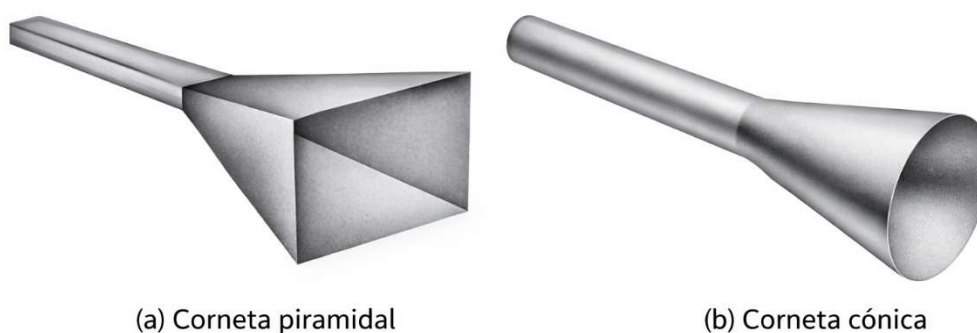
Figura 3 – Configuração de antenas filamentosas



Fonte: Balanis (2009).

Por outro lado, as antenas de abertura, expostas na Figura 4, são amplamente utilizadas em radares e em sistemas de comunicação via satélite. De acordo com Balanis (2009), são projetadas para operar em frequências mais elevadas e, geralmente, são cobertas por materiais dielétricos que oferecem proteção contra intempéries.

Figura 4 – Configuração de antenas de abertura



Fonte: Balanis (2009).

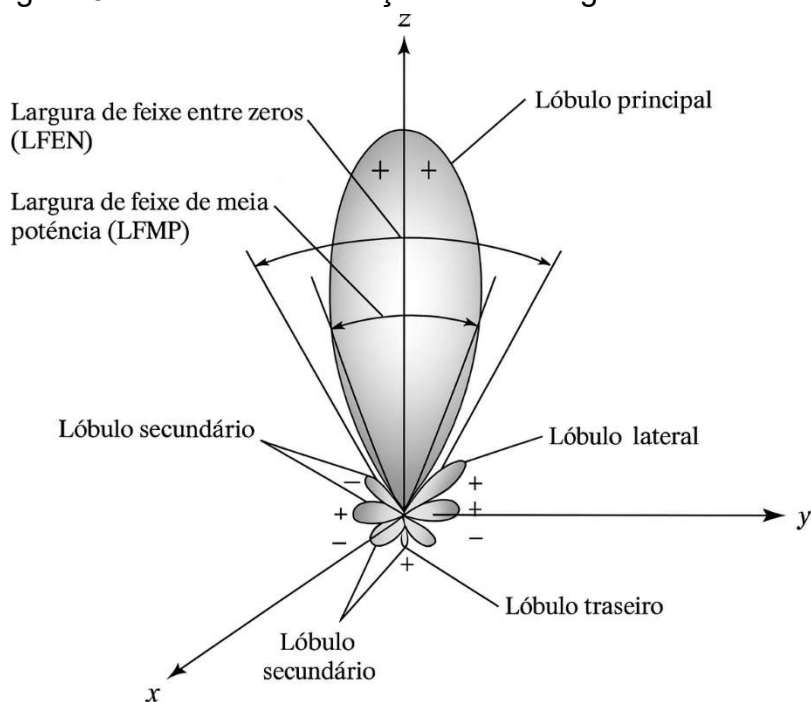
Nesse cenário, a pesquisa e o desenvolvimento de novas topologias e materiais são cruciais para superar os desafios impostos por tecnologias emergentes, como 5G, IoT (*Internet of Things* – *internet* das coisas) e comunicações espaciais.

2.1.4 Diagrama de Radiação

O diagrama de radiação de uma antena é uma representação gráfica da distribuição angular da potência irradiada ou da sensibilidade de recepção de uma antena no espaço tridimensional. Consiste em uma ferramenta fundamental para a caracterização de antenas, ao exibir a forma como a energia eletromagnética é distribuída espacialmente pela estrutura irradiante. Sua expressão pode ser dada em termos de intensidade de campo elétrico ou de densidade de potência, frequentemente normalizada, e é tipicamente apresentada em escalas linear ou logarítmica (Balanis, 2009).

De acordo com Balanis (2009), a obtenção do diagrama pode ser realizada por meio de medições experimentais em ambientes controlados, como câmaras anecoicas, ou através de simulações computacionais avançadas, onde a antena é analisada sob diversas direções de incidência ou emissão. A varredura angular dos valores de potência ou campo permite a construção do padrão de irradiação, que é comumente representado nos planos horizontal e vertical. A Figura 5 apresenta uma visualização tridimensional do diagrama de radiação de uma antena.

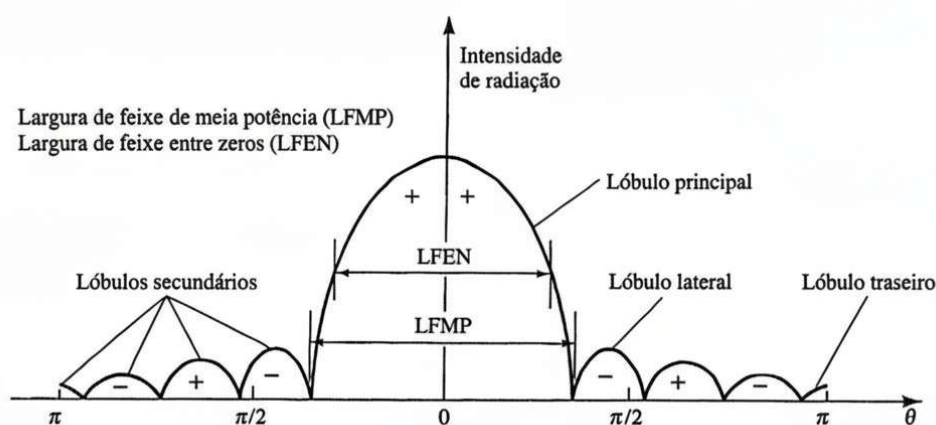
Figura 5 – Lóbulos de radiação de um diagrama de antena



Fonte: Balanis (2009).

A Figura 6 exibe a representação linear bidimensional do diagrama de radiação de uma antena. Dentro dessas representações gráficas, destaca-se o conceito de lóbulos de radiação. Conforme Balanis (2009) define, um lóbulo de radiação é uma porção do diagrama de radiação limitada por regiões de intensidade de radiação relativamente fraca. Esses lóbulos podem ser classificados em principais, secundários, laterais ou posteriores, conforme sua direção e intensidade relativas.

Figura 6 – Gráfico linear de um diagrama de potência



Fonte: Balanis (2009).

O lóbulo principal representa a região do diagrama onde se concentra a maior intensidade de energia, sendo direcionado à área desejada de comunicação. Já os lóbulos secundários, formados pela energia irradiada em direções não intencionais, representam perdas de potência e podem ocasionar interferências em sistemas próximos. A identificação e análise desses lóbulos são fundamentais, pois influenciam diretamente o desempenho da antena e sua adequação a diferentes aplicações em sistemas de comunicação.

2.1.5 Diretividade

A diretividade é um dos parâmetros fundamentais na caracterização de uma antena, pois expressa a sua capacidade de concentrar a energia irradiada em uma direção específica. Segundo Balanis (2009), a diretividade é definida como a razão entre a densidade de potência irradiada na direção de máxima intensidade e a densidade de potência média irradiada em todas as direções. Em termos mais simples, ela indica quão concentrada é a radiação da antena em uma direção específica, em comparação com um radiador isotrópico, que distribui a energia

uniformemente em todas as direções. Matematicamente, a diretividade (D) pode ser expressa, conforme Balanis (2009), pela Equação 1.

$$D = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (1)$$

Onde:

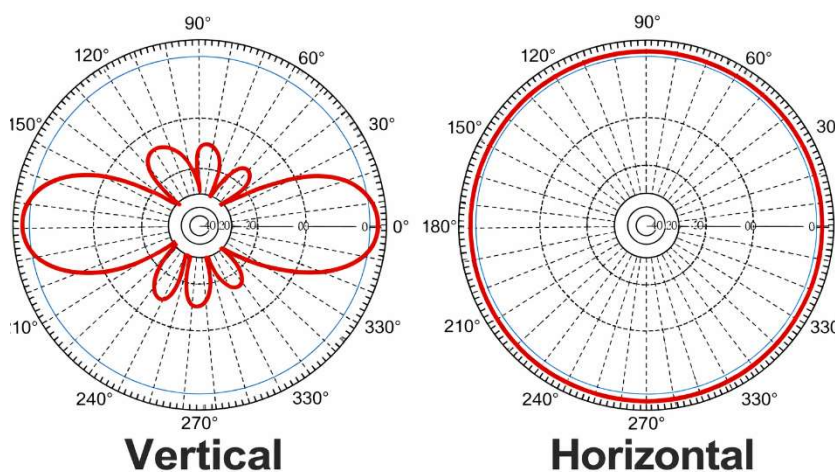
D = Diretividade;

U = Densidade de Potência;

P_{rad} = Potência Total Irradiada.

Além de ser um parâmetro essencial na caracterização do desempenho, a diretividade de uma antena é uma das especificações mais importantes no projeto e na análise de antenas, pois auxilia na identificação do tipo de antena e de sua aplicação prática (Balanis, 2009). Essa afirmação se concretiza de forma mais evidente através da análise prática dos diagramas de radiação, como mostram as Figuras 7 e 8.

Figura 7 – Diagrama de radiação de uma antena omnidirecional

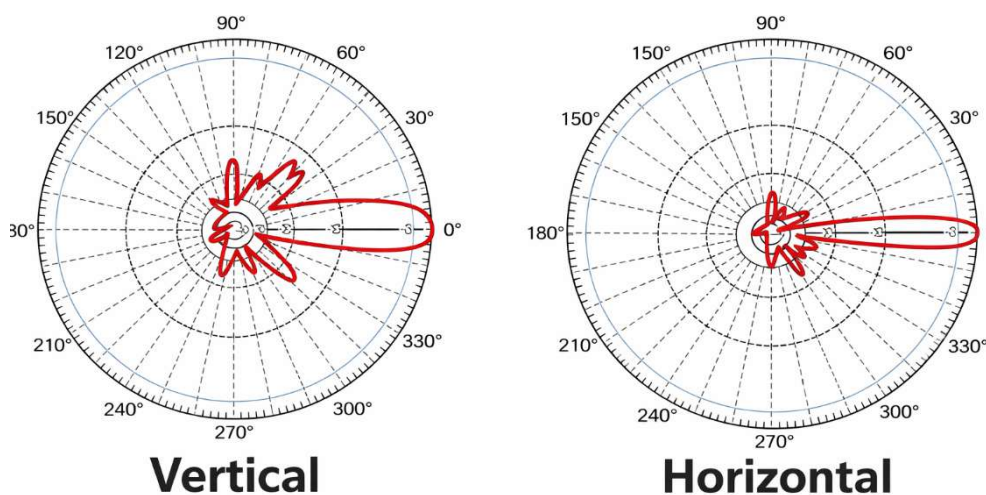


Fonte: Padrisa (2016).

Na Figura 7, observa-se um diagrama de radiação típico de uma antena omnidirecional, que apresenta baixa diretividade, configuração comum em antenas Wi-Fi, onde se deseja irradiar o sinal de forma relativamente uniforme em torno da antena no plano horizontal. Por outro lado, na Figura 8, o diagrama de radiação corresponde a uma antena com alta diretividade, característica das antenas

direcionais, como as antenas Yagi-Uda e *AirGrid*, essas antenas concentram a energia em uma direção específica.

Figura 8 – Diagrama de radiação de uma antena direcional



Fonte: Padrisa (2016).

Conforme Kraus e Marhefka (2017), a diretividade está diretamente relacionada ao diagrama de radiação da antena, sendo este a representação gráfica da distribuição angular da potência irradiada. Antenas com alta diretividade apresentam diagramas de radiação com lóbulos principais bem definidos e lóbulos secundários minimizados, característica desejável para reduzir perdas e interferências em sistemas de comunicação. Balanis (2009) complementa que, quando combinada à eficiência da antena, a diretividade contribui para a determinação do ganho da antena.

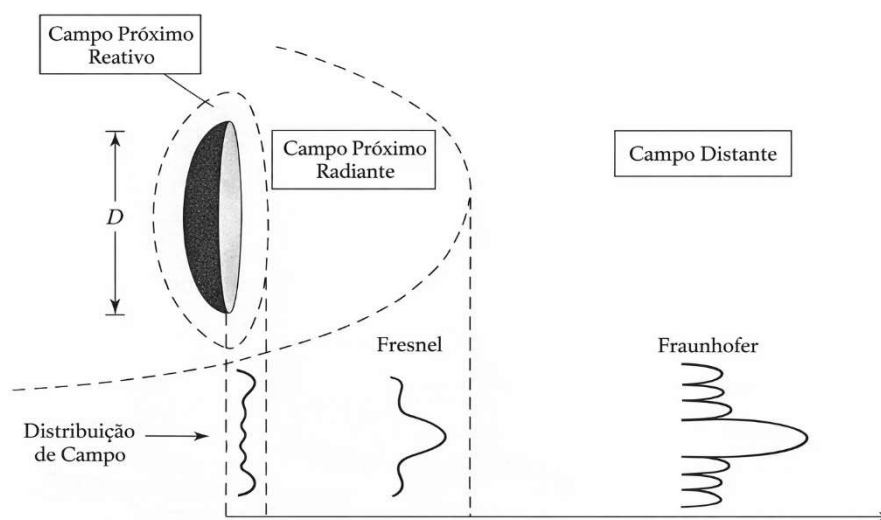
2.2 Sistemas de Análise de Antenas

Sistemas para medição de antenas são ferramentas fundamentais utilizadas para caracterizar e validar os protótipos de antenas desenvolvidos com o auxílio de *software* de análise eletromagnética (Donini, 2016). Dentre todas as medições existentes, a análise do diagrama de irradiação é a que exige maior cautela, sendo uma das características mais importantes de uma antena (Araújo *et al.*, 2018). Essa medição indica as variações de ganho do dispositivo de acordo com a direção, o que permite verificar parâmetros essenciais como a largura de feixe, a polarização e diretividade (Pinto; Leão; Cerqueira Jr., 2023).

Esses sistemas de medição podem ser classificados com base na região do campo eletromagnético em que as amostras do sinal são coletadas, dividindo-se

principalmente em campo distante e campo próximo (Bósio, 2010). A diferença entres campos pode ser visualizado na Figura 9.

Figura 9 – Regiões de campo

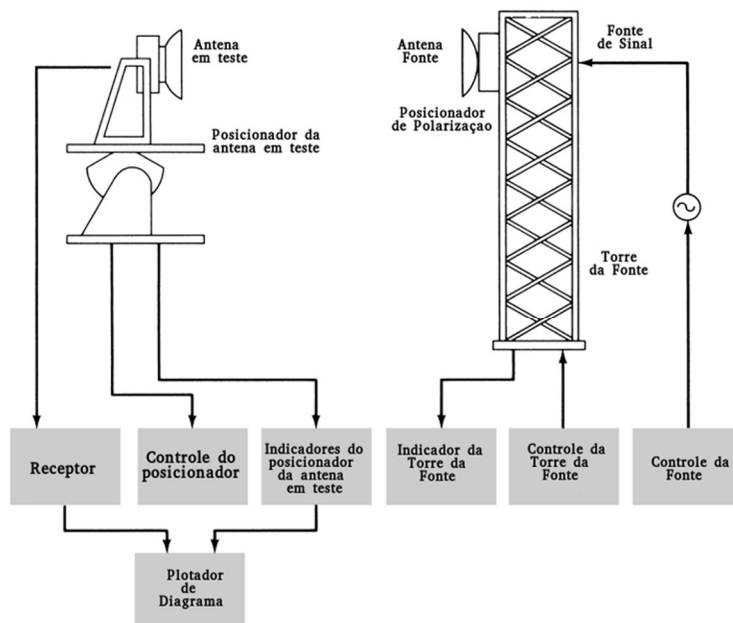


Fonte: Balanis (2009).

As medições em campo distante, mais tradicionais, exigem que a antena sob teste seja posicionada a uma grande distância da antena transmissora, para garantir uma frente de onda aproximadamente plana (Balanis, 2008). Já as técnicas de varredura em campo próximo, mais complexas, consistem em amostrar o campo eletromagnético em uma superfície geométrica definida (planar, cilíndrica ou esférica) muito mais próxima da antena, permitindo que os testes sejam realizados em ambientes internos e controlados, como câmaras anecóicas (Bósio, 2010).

Um sistema de medição, seja em campo próximo ou distante, é geralmente composto por três subsistemas principais que operam de forma integrada: o subsistema de RF, o subsistema de posicionamento e o subsistema de controle e processamento (Bósio, 2010). O princípio de funcionamento consiste, de modo geral, em irradiar um sinal por meio de uma antena fonte e medir a resposta em uma antena de teste, enquanto um posicionador varia a orientação de uma delas para cobrir diferentes ângulos no espaço, como visto na Figura 10.

Figura 10 – Sistema de medição de antenas



Fonte: Bósio (2010).

Os componentes essenciais que integram esses subsistemas incluem uma antena transmissora, alimentada por um gerador de sinais que produz uma onda com frequência e amplitude definidas, e uma antena receptora, que capta o sinal irradiado (Donini, 2016). O sinal recebido é então medido por equipamentos como um VNA (*Vector Network Analyzer* – analisador vetorial de redes) ou um analisador de espectro, que quantificam a potência e a fase do sinal (Donini, 2016; Pinto; Leão; Cerqueira Jr., 2023).

Para possibilitar a variação da orientação espacial entre as antenas, um sistema de posicionamento é indispensável. Esse sistema geralmente é composto por uma estrutura móvel acionada por motores de passo, os quais permitem rotações com incrementos angulares discretos e elevada precisão (Donini, 2016; Neto *et al.*, 2019). Para facilitar a análise e automação dessas medições, sistemas didáticos e de baixo custo tem sido desenvolvidos com o uso de microcontroladores, interfaces gráficas e controle por rede *Ethernet*.

2.3 Sistemas Didáticos Existentes para Análise de Antenas

Para contextualizar o desenvolvimento de novas ferramentas educacionais, é fundamental analisar os sistemas didáticos para o ensino de antenas já existentes. Apresentam-se, a seguir, soluções comerciais e protótipos acadêmicos que

frequentemente priorizam a inovação e o baixo custo.

2.3.1 Sistemas Didáticos Comerciais

Entre as soluções comerciais disponíveis para o ensino de antenas, destaca-se a *Antenna Trainer* AT-01, da KITEK (Figura 1). Este sistema de bancada manual foi projetado para auxiliar no ensino dos conceitos fundamentais de antenas. A estrutura é composta por um gerador de RF configurável, um conjunto com aproximadamente 21 antenas (incluindo modelos como dipolos e Yagi-Uda) e um goniômetro que permite a rotação manual de 360°, possibilitando ao estudante explorar ajustes tanto na emissão quanto na recepção do sinal. O método de funcionamento deste *kit* baseia-se na interação prática, na qual o estudante gira a antena e registra manualmente os valores de potência. Embora o *kit* possua uma didática interessante, seu método de aquisição de dados apresenta algumas desvantagens, como o longo tempo necessário para as medições e a suscetibilidade a erros. Além disso, a precisão é limitada para medições que exigem alta resolução. Outro ponto a ser considerado é o custo do equipamento, estimado em US\$ 1.200,00, o que pode representar um obstáculo para instituições com recursos financeiros limitados.

Uma outra opção é a bancada didática EANC (Figura 11), da Edibon, um sistema totalmente automatizado e controlado por computador que visa simular práticas industriais. Utilizando um *software* SCADA baseado em *LabVIEW*, a bancada opera um posicionador motorizado e realiza a aquisição de dados por meio de um analisador de espectro de alto desempenho (50 MHz a 6 GHz). Esse conjunto possibilita medições precisas de diagramas de radiação, SWR (*Standing Wave Ratio* – razão de onda estacionária) e largura de banda. No entanto, o seu elevado custo e o foco na aplicação industrial tornam a solução inviável para a maioria dos ambientes educacionais.

Figura 11 – Bancada didática EANC

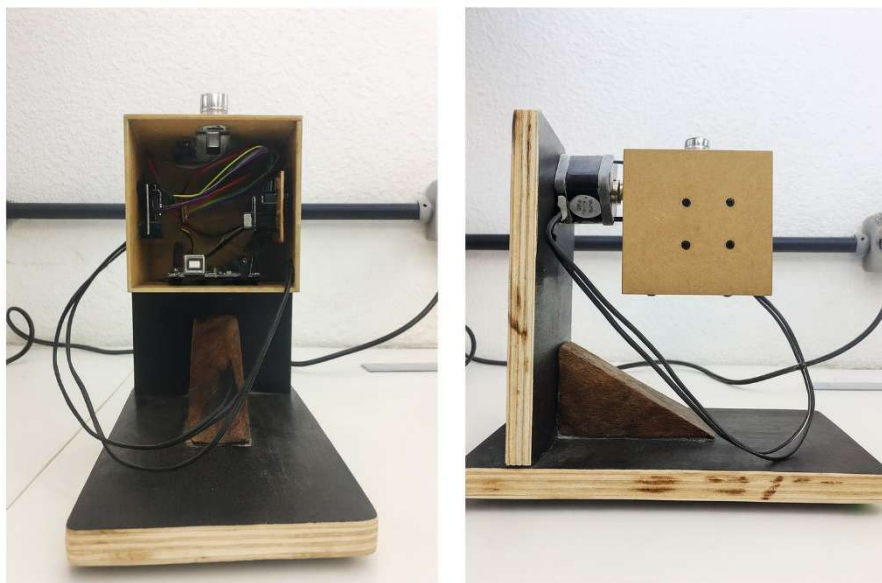


Fonte: Datasonic (2025).

2.3.2 Protótipos Acadêmicos Desenvolvidos

Com a necessidade de preencher a lacuna deixada pelas soluções comerciais, a comunidade acadêmica tem desenvolvido protótipos de baixo custo. O trabalho de Orlando Neto *et al.* (2019) teve como objetivo criar um posicionador de baixo custo para a caracterização de antenas na faixa de micro-ondas. O sistema foca na recepção do sinal, automatizando a rotação da antena receptora para a obtenção do diagrama de irradiação de um sinal de 2,45 GHz (Figura 12). A aquisição de dados seguiu um processo semiautomatizado, no qual o operador utilizava um controle remoto infravermelho para movimentar a antena em passos angulares e, a cada passo, era necessária a marcação manual dos valores de potência exibidos em um VNA externo. Para a análise, os dados coletados foram posteriormente comparados com simulações no *software* Ansys HFSS. Os resultados obtidos demonstraram boa proximidade com os simulados, validando a eficácia do posicionador, embora o processo de medição permanecesse trabalhoso e com limitações físicas, como uma rotação vertical de apenas 180°.

Figura 12 – Plataforma medição de antenas na faixa de micro-ondas

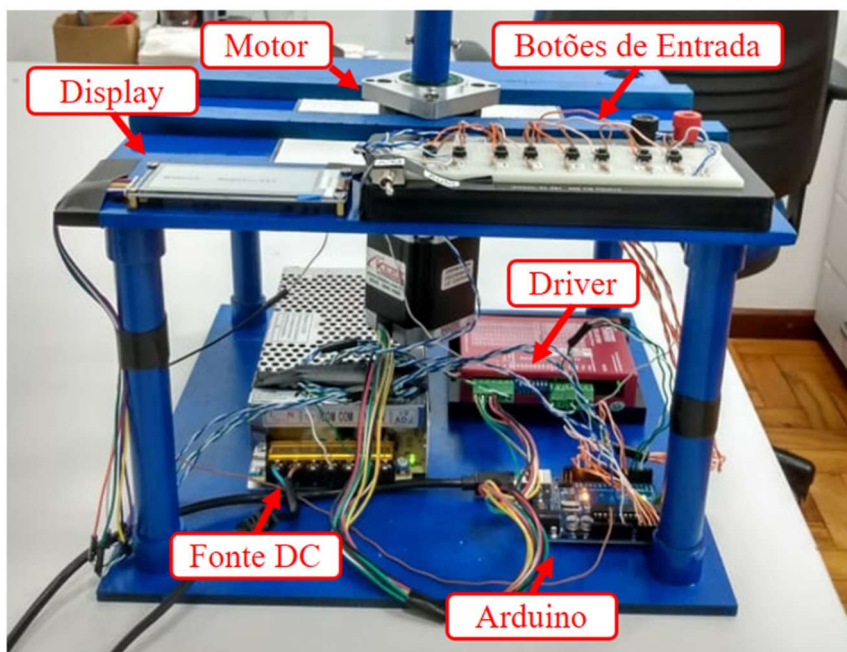


Fonte: Orlando Neto *et al.* (2019).

Outra abordagem foi apresentada no trabalho de Pinto *et al.* (2023), que desenvolveu um sistema totalmente automatizado para superar a imprecisão das medições manuais, exposto na Figura 13. O objetivo era caracterizar o diagrama de radiação de uma antena receptora com um sinal de alta frequência (26 GHz). O grande diferencial do projeto foi seu método de aquisição e exposição de dados. Através de um *script* em *Python*, todo o processo era comandado e organizado, controlando a rotação do posicionador e, simultaneamente, automatizando a captura de dados do VNA. Essa automação foi implementada pela programação do controle da interface gráfica do *software* de visualização remota do instrumento, capturando uma imagem da tela para cada ângulo medido. Ao final da varredura, o *script* extraía os valores de potência das imagens salvas e os exibia ao usuário, gerando um gráfico polar para visualização imediata e salvando os dados em um arquivo CSV (*Comma-Separated Values* – valores separados por vírgulas).

O método de análise consistiu na comparação do diagrama medido com simulações no software ANSYS HFSS. Os resultados foram satisfatórios, mostraram boa aproximação com as simulações e provaram que o sistema conseguiu capturar padrões complexos com alta precisão angular. Contudo, a abordagem de automação por interface gráfica mostrou-se pouco robusta, pois sua funcionalidade depende de elementos visuais estáticos, como a posição de botões e janelas, que podem mudar a cada atualização do *software* do VNA ou alteração na resolução da tela.

Figura 13 – Posicionador de antenas automatizado de baixo custo



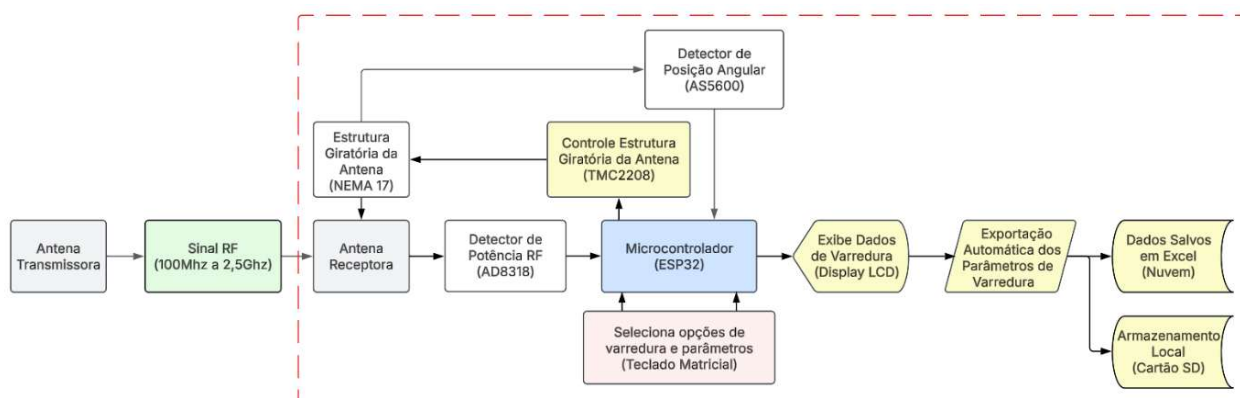
Fonte: Pinto *et al.* (2023).

Os protótipos acadêmicos provam a viabilidade da automação de baixo custo para controle e posicionamento, mas permanecem com algumas limitações, como a dependência de equipamentos de medição externos (VNA) e o uso de métodos de aquisição de dados pouco robustos. Contudo, torna-se necessário o desenvolvimento de um sistema que seja independente de medições externas, com uma interface de dados direta e autônoma, que integre não apenas o posicionamento, mas também a detecção de RF e mantenha o baixo custo de investimento e aplicação.

3 DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento do projeto teve início com a elaboração de um diagrama de blocos (Figura 14), que serviu como base para a definição da estrutura do sistema de análise de antenas, na qual o foco do projeto é a parte de recepção, delimitada em vermelho na Figura 14. O sistema é composto por uma antena transmissora fixa e uma antena receptora acoplada a um mecanismo de movimentação, responsável pela medição do diagrama de radiação. Tanto o controle da rotação quanto a aquisição de dados são totalmente automatizados, sendo um microcontrolador encarregado de registrar e analisar os valores de potência recebida em cada ângulo de posicionamento. Posteriormente, esses dados são exportados para a construção do diagrama de irradiação, permitindo a caracterização e a identificação do tipo de antena receptora. A partir dessa estrutura, foi possível estabelecer a lógica de funcionamento e dar início à fase de implementação prática.

Figura 14 – Diagrama de blocos sistema didático



Fonte: Autor.

3.1 Materiais utilizados

A execução do projeto seguiu a estrutura definida pelo diagrama, começando pela seleção dos materiais e componentes necessários para a montagem de cada um dos blocos.

3.1.1 Motor de Passo Nema 17

Os motores de passo NEMA 17 são amplamente empregados em impressoras 3D, máquinas CNC (Controle Numérico Computadorizado), sistemas de automação e robótica leve, devido à sua precisão e facilidade de controle. O modelo JK42HS40-

1004AC, exposto na Figura 15, é um motor híbrido de quatro fios que opera no modo bipolar, realizando movimentos angulares de $1,8^\circ$ por passo, sendo necessários 200 passos para completar uma volta de 360° .

Esse modelo opera com uma corrente nominal de 1A por fase e tensão de 3,9V, resultando em uma potência elétrica aproximada de 3,9W por fase. Cada fase possui uma resistência de $3,9\Omega$, fator que influencia diretamente na resposta dinâmica do motor. O torque de retenção é de $4,0\text{kg}\cdot\text{cm}$, fornecendo força suficiente para movimentar componentes com precisão, mesmo sob carga. Com comprimento de 40mm e peso de 280g, o motor apresenta dimensões adequadas para aplicações compactas. Sua construção robusta garante boa estabilidade e durabilidade, sendo ideal para projetos que exigem repetibilidade e controle preciso de posição, muitas vezes dispensando o uso de sensores de realimentação.

Figura 15 – Motor de passo Nema 17



Fonte: Alibaba (2024).

3.1.2 *Driver* Motor de Passo TMC2208

O *driver* TMC220, ilustrado na Figura 16, foi selecionado para o controle do motor de passo NEMA 17, pois possui capacidade de suportar a corrente nominal compatível com a do motor utilizado. O *driver* é capaz de fornecer até 2A por fase, com pico de até 2,8A, desde que utilizado com dissipação térmica adequada, o que garante desempenho estável em aplicações que demandam torque elevado. O TMC220 opera com tensão de alimentação de até 36V e possui suporte a controle por micropassos com resolução de até 1/256 de passo, o que permite maior suavidade no movimento e precisão de posicionamento. O *driver* pode ser controlado por sinais de passo e direção (STEP/DIR) e conta com uma interface SPI (*Serial Peripheral*

Interface – interface periférica serial) para ajustes avançados. Seu encapsulamento compacto facilita a integração em sistemas embarcados, e sua eficiência no gerenciamento térmico contribui para maior confiabilidade durante o funcionamento contínuo. Por essas características elétricas e mecânicas, o TMC220 se mostrou adequado para atender às necessidades do sistema proposto.

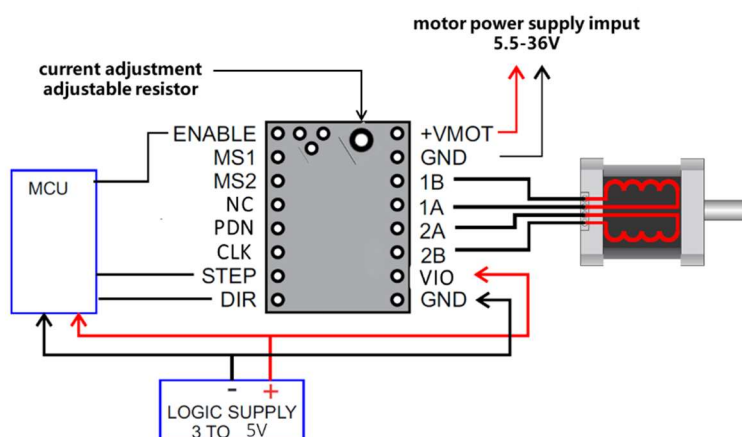
Figura 16 – *Driver Motor de Passo TMC2208*



Fonte: Autocorerobótica (2025).

A Figura 17 apresenta o esquema de ligação do *driver* TMC2208 utilizado neste trabalho, no qual o controle do motor de passo é realizado por meio do envio de sinais de passo (STEP) e direção (DIR).

Figura 17 – Diagrama de ligação TMC2208

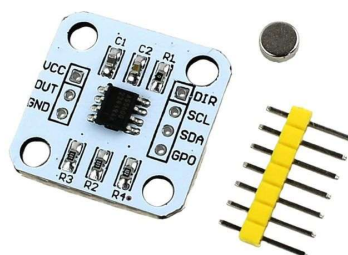


Fonte: Fysetc (2025).

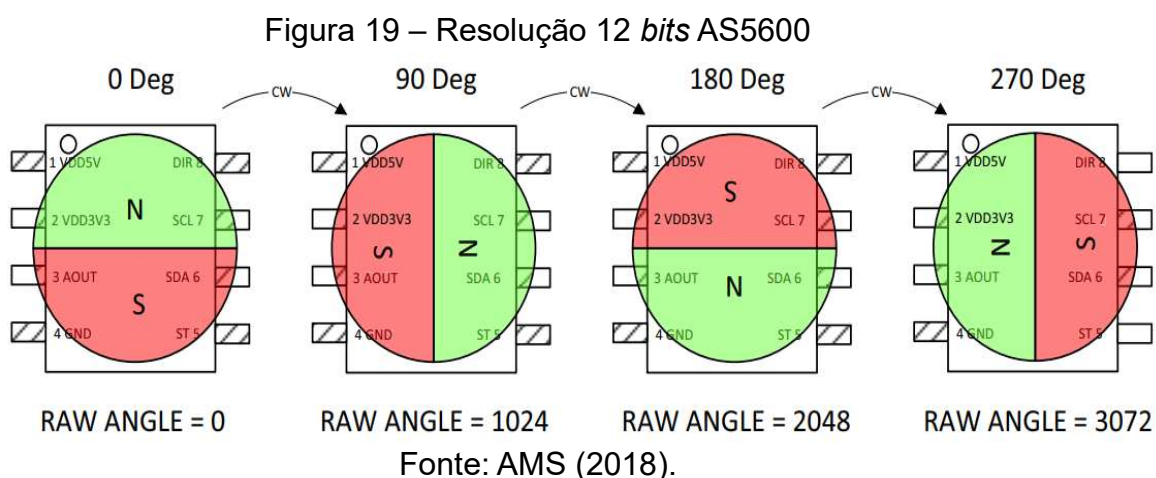
3.1.3 Sensor Angular AS5600

Para a captação precisa do deslocamento angular do motor de passo NEMA 17, foi selecionado o sensor de posição rotativo magnético AS5600 (Figura 18). O funcionamento do AS5600 se dá pela detecção da variação do campo magnético gerado por um ímã diametralmente magnetizado, posicionado sobre o eixo de rotação. Este campo magnético é detectado por sensores Hall internos que, por meio de um sistema de amplificação, digitalização e processamento vetorial, convertem a posição angular do ímã em um valor digital ou analógico correspondente. O sensor possui resolução de 12 bits, o que permite a medição de até 4096 posições distintas em uma rotação completa de 360°, como mostra a Figura 19. Ele pode operar em modo analógico ou digital, sendo possível programar a faixa de atuação por meio da interface I2C (Circuito Inter-integrado), de 0° até 360°, além de ajustar posições de início e fim da medição.

Figura 18 – Sensor Angular AS5600



Fonte: Saravati (2025).



Em termos de características elétricas, o AS5600 opera com tensões de

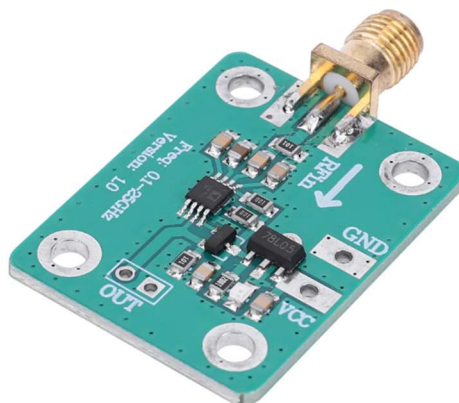
alimentação de 3,3V ou 5V, com consumo típico de corrente de 6,5mA. O campo magnético ideal para o funcionamento do sensor deve ter intensidade entre 30mT e 90mT, com uma folga típica de 0,5mm a 3mm entre o ímã e o sensor. O sensor também é equipado com funções de autoajuste de ganho, detecção da presença do ímã, modos de histerese para evitar ruído na medição e modos de baixa potência para aplicações de baixo consumo.

3.1.4 Módulo Detector de Potência de Radiofrequência AD8313

A etapa de captação e medição dos sinais de radiofrequência é crítica para a precisão do projeto. Por essa razão, foi selecionado o módulo detector de potência de radiofrequência AD8313 (Figura 20), que apresenta uma ampla faixa de frequência de operação, além de resposta mais linear e precisa, em comparação a demoduladores AM, que apresentam desafios como não linearidade e faixa dinâmica limitada.

O AD8313 é um detector de alta performance, operando em uma ampla faixa de frequência que vai de 100MHz até 2,5GHz. Embora esta faixa não cubra toda a UHF, ela abrange as frequências não licenciadas no Brasil, centradas em 915MHz e 2,45GHz, que são as faixas utilizadas pelas antenas sob teste. Ele possui uma faixa dinâmica de até 70dB, sendo eficaz para medições em ambientes de sinais variados. Seu funcionamento baseia-se em uma saída de tensão contínua proporcional ao nível de potência de entrada em escala logarítmica, ideal para medições RSSI (*Received Signal Strength Indicator* – indicador de intensidade do sinal recebido). O componente opera com uma tensão de alimentação entre 7V e 15V. Sua arquitetura interna é composta por oito estágios amplificadores e células detectores que realizam a retificação de forma precisa e eficiente. No contexto deste projeto, o AD8313 desempenha o papel fundamental de converter os sinais recebidos pela antena receptora para leitura do microcontrolador, viabilizando a caracterização do diagrama de radiação da antena em análise.

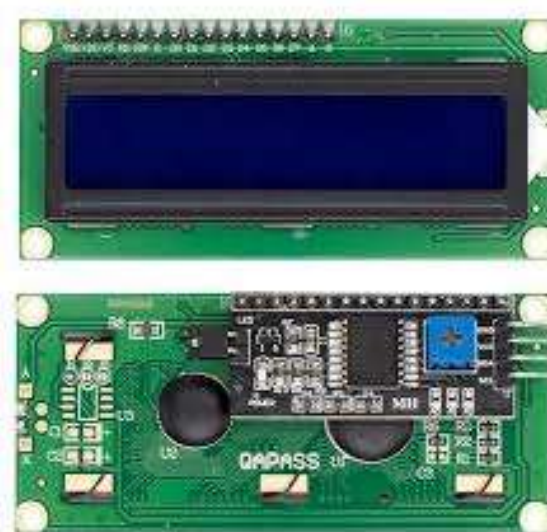
Figura 20 – Módulo detector de potência de radiofrequência AD8313



Fonte: Aliexpress (2025).

3.1.5 *Display* LCD 16x2 com I2C

O *display* LCD (*Display* de Cristal Líquido) 16x2 com interface I2C, conforme apresentado na Figura 21, foi selecionado para o sistema devido à sua simplicidade, facilidade de integração e disponibilidade no mercado. Com dimensões aproximadas de 80mm x 36mm, este *display* permite a visualização de até 32 caracteres, distribuídos em duas linhas de 16 posições. A principal vantagem do módulo I2C é a redução na quantidade de fios de conexão, de 16 para apenas quatro fios, sendo dois para alimentação (VCC e GND) e dois para a comunicação serial.

Figura 21 – *Display* LCD 16x2 com I2C

Fonte: Baú da Eletrônica (2025).

O *display* opera com 5V e seu *backlight* azul, que consome em média 20 mA, garante visibilidade em ambientes de pouca luminosidade. Sua implementação é facilitada pela vasta documentação e pela alta compatibilidade com bibliotecas prontas para plataformas como Arduino e ESP32.

3.1.6 Teclado Matricial de Membrana 4x4

O teclado matricial de membrana 4x4 (Figura 22) é amplamente empregado em automação, sistemas embarcados e interfaces homem-máquina, destacando-se por sua simplicidade, baixo custo e fácil integração com microcontroladores.

Figura 22 – Teclado Matricial de Membrana 4x4



Fonte: RoboCore (2025).

O teclado é composto por 16 teclas dispostas em uma matriz de quatro linhas por quatro colunas, o que permite a identificação precisa de cada acionamento por meio da leitura cruzada. Sua estrutura em membrana confere um perfil fino, leveza e resistência, tornando-o ideal para ambientes com espaço restrito ou que demandam uma interface discreta e durável. O funcionamento do teclado baseia-se na detecção do fechamento de contato elétrico quando uma tecla é pressionada, informando ao sistema a posição exata da tecla acionada.

3.1.7 Módulo Expansor I2C PCF8574

O Módulo Expansor I2C PCF8574, mostrado na Figura 23, é um circuito integrado que expande em 8 bits as entradas e saídas via interface I2C. Operando com tensões de 2,5V a 6V, ele se comunica por apenas duas linhas de sinal: SDA

(Serial Data) e SCL (Serial *Clock*). Atuando como auxiliar do teclado 4x4, o PCF8574 reduz significativamente o número de pinos necessários no microcontrolador. Ao invés de ocupar 8 portas GPIO (quatro para linhas e quatro para colunas), o teclado é controlado por apenas duas portas I2C, liberando as demais para outras funcionalidades. As portas bidirecionais do módulo são ideais para a varredura do teclado, e sua saída de interrupção pode notificar o processador sobre o pressionamento de uma tecla, otimizando o sistema.

Figura 23 – Módulo expensor I2C PCF8574



Fonte: Curto-circuito (2025).

3.1.8 Módulo Cartão MicroSD

O módulo de cartão MicroSD (*Micro Secure Digital* – micro digital seguro) é um dispositivo compacto e eficiente, compatível com tensões de alimentação de 3,3V e 5V. A comunicação do módulo é através do protocolo SPI, um padrão de comunicação serial síncrona que simplifica a troca de dados e requer poucos pinos de conexão. Ele suporta cartões MicroSD e MicroSDHC (*Micro Secure Digital High Capacity* – micro digital seguro de alta capacidade) formatados nos sistemas de arquivos FAT/FAT32 (*File Allocation Table* – tabela de alocação de arquivos), o que o torna ideal para diversas aplicações, como criação de históricos de dados, registro de leituras de sensores e armazenamento de arquivos de configuração ou multimídia. O Módulo é apresentado na Figura 24.

Figura 24 – Módulo cartão MicroSD



Fonte: MakerHero (2025).

3.1.9 Sensor de Temperatura DS18B20

O sensor de temperatura digital DS18B20, ilustrado na Figura 25, utiliza o protocolo de comunicação *1-Wire* (uma linha), que permite a conexão de múltiplos sensores utilizando apenas uma única linha de dados, o que reduz significativamente a complexidade e o número de conexões necessárias. O DS18B20 fornece leituras de temperatura com resolução configurável de 9 a 12bits e opera em uma faixa que vai de -55°C a $+125^{\circ}\text{C}$, apresentando uma precisão de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ na faixa entre -10°C e $+85^{\circ}\text{C}$. Com uma faixa de tensão operação de 3,0V a 5,5V, o DS18B20 é compatível com a maioria dos microcontroladores disponíveis no mercado.

Figura 25 – Sensor de temperatura DS18B20



Fonte: Eletrogate (2025).

3.1.10 Cooler 12V

O *cooler* é um dispositivo eletromecânico utilizado para promover a circulação de ar e a dissipação de calor em sistemas eletrônicos (Figura 26). Neste projeto, ele será empregado como parte do sistema de ventilação interna da caixa que abriga os componentes, garantindo a troca de ar e evitando o superaquecimento. Sua ativação será controlada em conjunto com o sensor de temperatura digital DS18B20, que monitorará continuamente a temperatura interna do sistema e acionará o *cooler* sempre que os níveis de temperaturas ultrapassarem os limites no *software* de controle. Essa integração previne falhas e prolonga a vida útil de todos os componentes do sistema.

Figura 26 – Cooler 12V



Fonte: Autor.

3.1.11 Buzzer

O *buzzer* é um dispositivo eletrônico utilizado para emitir sinais sonoros simples, sendo amplamente empregado em sistemas embarcados devido à sua praticidade e fácil integração com microcontroladores (Figura 27). Neste projeto, foi utilizado um modelo de *buzzer* que opera com tensões entre 0 e 5V, o que o torna compatível com os níveis lógicos comuns em plataformas como Arduino. Ele fará parte do sistema de sinalização sonora, alertando o usuário em casos de erros e no início e fim das varreduras do sistema, contribuindo para uma interação mais intuitiva e eficaz com o equipamento.

Figura 27 – Buzzer



Fonte: UsinalInfo (2025).

3.1.12 Microcontrolador ESP32

O ESP32 (Figura 28) é um microcontrolador de alto desempenho e baixo custo, desenvolvido pela Espressif Systems, amplamente utilizado em projetos de automação, *IoT* e sistemas embarcados. O microcontrolador possui um processador *Dual-Core 32-bit*, que pode operar em *clocks* de até 240MHz. Um dos destaques desse componente é a capacidade de oferecer conectividade Wi-Fi e *Bluetooth* em um único módulo, sendo uma solução completa e compacta.

Figura 28 – Placa de desenvolvimento ESP32

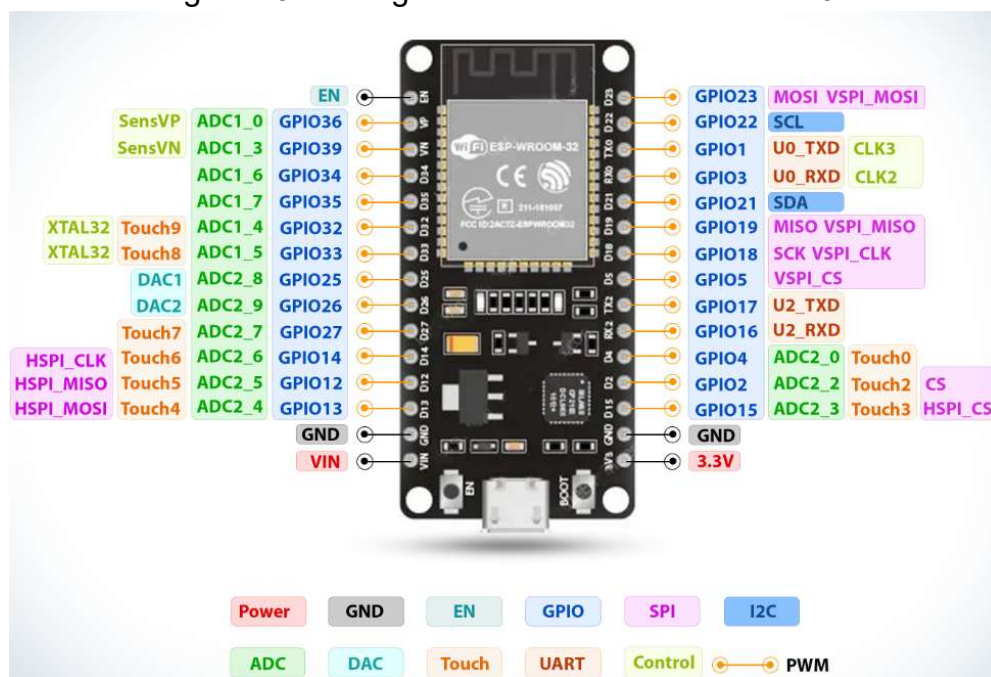


Fonte: Saravati (2025).

O módulo utilizado neste trabalho dispõe de 38 pinos de entrada e saída de propósito geral (GPIOs), que operam com um nível lógico de 3,3 V (Figura 29). Esses GPIOs possuem diversos recursos como conversores analógico-digitais (ADC), conversores digital-analógicos (DAC) e interfaces de comunicação serial (SPI, I2C, UART). A alimentação do ESP32 é tipicamente operada com uma tensão nominal de

3,3V, a placa possui regulador de tensão interno que permite a entrada de 5V, geralmente através da porta USB-C ou de um pino VIN dedicado, convertendo essa tensão para os 3,3V necessários para o microcontrolador.

Figura 29 – Pinagem do microcontrolador ESP32



Fonte: Adaptado de Wilson (2020).

3.1.13 Bateria de Íon-Lítio 7,4V

Para o sistema de armazenamento e distribuição de energia, foi utilizado a bateria de íon-lítio (Li-ion) de 7,4V com capacidade de 4400mAh, configurada em um arranjo de duas células de 3,7V, onde são conectadas em série para atingir a tensão nominal desejada (Figura 30). A escolha por um módulo de 7,4V foi definida com base em uma análise de custo-benefício e capacidade energética, onde modulo nessa faixa de tensão possui um custo mais acessível em comparação com configurações de maior tensão, ao mesmo tempo que oferecem uma excelente densidade de energia.

A capacidade de 4400mAh, por sua vez, garante uma autonomia operacional prolongada para a aplicação, um fator crucial em projetos móveis ou de longa duração. A bateria é composta por células do modelo 18650, conhecidas por sua confiabilidade e ciclo de vida útil. Indispensável para a operação segura do conjunto, o Sistema de Gerenciamento de Bateria (BMS) integrada monitora continuamente a tensão e a corrente, protegendo as células contra sobrecargas, descargas profundas e curtos-circuitos.

Figura 30 – Bateria de íon-Lítio 7,4V



Fonte: Mercado Livre (2025).

3.1.14 Voltímetro Indicador de Bateria

Para o monitoramento do estado energético do sistema, foi empregado um voltímetro digital com *display* de LED (Diodo Emissor de Luz), conforme a Figura 31. Este componente se destaca pela simplicidade de integração, que utiliza apenas dois fios, e por sua faixa de operação de 4,5 a 30VCC. Por meio do monitoramento da tensão, é possível determinar se a bateria está plenamente carregada ou se atingiu um nível crítico que indica a necessidade de recarga. A utilização deste voltímetro fornece uma interface visual imediata e confiável para a gestão da autonomia do projeto, assegurando que a condição da fonte de alimentação seja constantemente supervisionada.

Figura 31 – Voltímetro digital



Fonte: Proesi (2025).

3.1.15 Fonte de Alimentação 12V

Para o sistema de recarga da bateria de íon-lítio, utilizou-se de uma fonte de alimentação externa do tipo chaveada, conforme mostra a Figura 32. Operando com uma faixa de tensão de entrada, de 100V a 240V em corrente alternada com frequência de 50/60Hz. Em sua saída, a fonte fornece uma tensão estabilizada de 12V em corrente contínua e uma capacidade de corrente de até 2A.

Figura 32 – Fonte de alimentação 12V



Fonte: Autor.

3.1.16 Módulo Regulador de Tensão *Step Down* XL4015

Para a alimentação do microcontrolador ESP32, bem como da maioria dos sensores e módulos que compõem o sistema, foi empregado o módulo regulador de tensão *step-down* baseado no circuito integrado XL4015 (Figura 33). Este componente é essencial para a conversão da tensão de 7,4V, fornecida pela bateria, para uma tensão estável e contínua de 5V, adequada para a operação da maioria dos componentes do sistema. Com a capacidade de fornecer 5A de corrente, o módulo garante uma ampla margem de segurança para suprir a demanda energética de todo o conjunto, incluindo os picos de corrente que podem ocorrer durante a ativação de periféricos ou a transmissão de dados pelo ESP32.

Figura 33 – Módulo Regulador de Tensão *Step Down* XL4015

Fonte: Piscaled (2025).

3.1.17 Módulo Regulador de Tensão *Step Up* MT3608

Para a alimentação dos componentes de 12V do sistema, optou-se pela utilização do módulo regulador de tensão *step-up* MT3608 (Figura 34). O MT3608 é um conversor DC-DC do tipo *boost*, caracterizado por sua alta eficiência e capacidade, que tem a função de elevar a tensão fornecida pela bateria de 7,4V para um nível de 12V estável e contínuo.

Figura 34 – Módulo Regulador de Tensão *Step Up* MT3608

Fonte: MakerHero (2025).

3.2 Circuito Projetado

Seguindo a estrutura definida pelo diagrama de blocos apresentado na Figura 14, foi projetado o circuito eletrônico completo do sistema. Este circuito foi dividido logicamente em blocos funcionais, sendo eles o circuito de alimentação e o circuito de controle. O circuito de alimentação, exposto no Apêndice A, contém toda a parte de

geração e administração de energia, com as baterias, fontes e chaves elétricas. Já o circuito de controle (Apêndice B) integra todos os subsistemas: posicionamento, detecção de RF, controle e interface com o usuário.

3.2.1 Circuito de Alimentação

O circuito de alimentação, no diagrama unifilar do Apêndice A, foi projetado para garantir a portabilidade e a autonomia energética do sistema, além de fornecer os diferentes níveis de tensão exigidos pelos componentes eletrônicos. O principal item do sistema de alimentação é uma bateria de íon-lítio (V2) de 7,4V e 4400mAh, que é protegida por um fusível (F1) de 4A contra sobrecorrentes. O sistema conta com uma entrada para uma fonte externa de 12V (V1), que atua exclusivamente como carregador da bateria. O diodo D1, posicionado entre a fonte e a bateria, impede que a corrente da bateria retorne para o carregador, funcionando como uma barreira de proteção.

Durante o carregamento, o circuito conta com um sistema de chaveamento baseado no transistor MOSFET do tipo P (Q1), modelo IRF9540, que atua para isolar as cargas da bateria sempre que a fonte está conectada. Isso ocorre porque, ao detectar a presença da tensão do carregador, a base do Q1 é polarizada de forma a interromper a condução para as cargas, evitando que possíveis picos ou variações de tensão provenientes do carregador danifiquem os componentes alimentados. Os resistores R1 e R2 funcionam como *pull-up* e *pull-down*, respectivamente, auxiliando na correta comutação do Q1, enquanto os capacitores C1 e C2 servem como filtros para suavizar a energia chaveada, reduzindo ruídos e estabilizando a tensão.

O circuito também integra um indicador de nível de bateria, que é ativado apenas quando o botão B1 ou o carregador estão ligados. Para isso, foi utilizado um transistor NPN 2SK-2137 (Q2), que realiza o chaveamento do terminal negativo do indicador. Na base do Q2 estão conectados o pós-chave do botão B1 e o pós-carregador de bateria, e o resistor R3 atua como *pull-down*, para que o transistor permaneça desligado quando nenhuma das fontes estiver ativa, fazendo que o monitoramento de energia só ocorra quando o sistema está em uso ou em recarga. Os diodos D2 e D3, por sua vez, atuam como barreiras para que a energia do carregador não seja enviada diretamente para a carga e vice-versa, isolando os caminhos de corrente.

A alimentação das cargas do sistema é feita por meio de dois conversores: um

regulador *step-down* XL4015 (MD1), que reduz a tensão da bateria de 7,4V para 5V (A), e um *step-up* MT3608 (MD2), que eleva a tensão para 12V (B). Os capacitores C3, C4, C5 e C6 atuam como filtros nas entradas e saídas para esses conversores, garantindo tensões estáveis e com baixo ruído. O fusível F2 de 4A foi inserido na linha de saída do conversor MD1, com a finalidade de proteger contra sobrecargas ou curtos causados por componentes de maior consumo, como o motor ou o *driver*. Juntamente com o fusível, o diodo D5 foi adicionado para impedir eventuais retornos de corrente gerados por componentes indutivos, como o motor de passo, que poderiam comprometer a integridade do sistema. Dessa forma, o circuito de alimentação foi projetado não apenas para fornecer energia de maneira eficiente, mas também para proteger os componentes contra sobrecorrentes, ruídos, picos de tensão e fluxos indesejados de corrente, assegurando a estabilidade e a confiabilidade do sistema em todas as condições de operação.

3.2.2 Circuito de Controle

O circuito de controle, detalhado no Apêndice B, foi projetado para integrar os subsistemas de posicionamento da antena, detecção de radiofrequência, interface com o usuário e gerenciamento térmico, tendo o microcontrolador ESP32 (MD7) como unidade central de processamento. Este microcontrolador é responsável por gerenciar todas as operações. O ESP32 é alimentado pela rede 5V, onde possui capacitores de desacoplamento C10 e C11, que filtram ruídos da linha.

O subsistema de posicionamento é composto pelo motor de passo M2 (Nema 17), controlado pelo *driver* TMC2208 (MD6). O ESP32 envia sinais de passo (STEP) e direção (DIR) para o *driver* a partir das portas GPIO 17 e GPIO 16, respectivamente. A porta GPIO 2 do microcontrolador está conectada à porta de habilitação (EN) do *driver*, permitindo o controle de seu acionamento. A alimentação lógica do *driver* (VIO) é fornecida diretamente pela saída de 3,3V do ESP32, enquanto a alimentação do motor (VMOT) vem da linha principal de 5V do sistema. Para o *feedback* preciso da posição, o sensor magnético AS5600 (MD10) realiza a leitura de um ímã acoplado diretamente ao eixo do motor de passo. A comunicação entre o sensor e o ESP32 é feita via I2C e utiliza as portas GPIO 22 (SCL) e GPIO 21 (SDA).

A medição da potência do sinal de RF é realizada pelo módulo detector AD8313 (MD3), cujo funcionamento consiste em converter a potência do sinal de RF recebido em um sinal de tensão contínua (analógico). Esta tensão de saída, que é proporcional

ao nível de potência de entrada, é enviada à porta GPIO 34 do ESP32 para ser processada. Essa porta específica do microcontrolador funciona como um ADC, que lê a tensão e a converte em um valor digital. A resolução da medição é de 12 bits, o que significa que o ESP32 é capaz de quantificar o sinal analógico em 4096 níveis discretos, permitindo uma leitura detalhada da variação de potência. Na porta de alimentação do módulo, os componentes L1, C7 e C8 formam um filtro LC na entrada da linha de 12V para reduzir ruídos que possam afetar a medição.

A interface com o usuário, é realizada através de um teclado matricial 4x4 (TECLADO) e um *display* LCD 16x2 (MD4). No teclado matricial, para otimizar o uso dos pinos GPIO do microcontrolador, foi utilizado um expensor I2C PCF8574 (MD5), que converte os oitos pinos de sinal do teclado, em apenas quatro, sendo dois para o I2C, e dois para alimentar o modulo expensor. O *display* utilizado já possui um conversor I2C acoplado, sendo necessário só os cabos de alimentação e de comunicação. Para ajuste do brilho, foi utilizado o resistor R4 na alimentação do modulo. Como auxiliar na comunicação com o usuário, um *buzzer*, foi adicionado para dar *feedback* sonoro, sinalizando erros e inicial e final de processos. O *buzer* foi conectado diretamente à porta GPIO 25 do microcontrolador.

No sistema de armazenamento dos dados, os dados serão salvos em um cartão de memória através do Módulo Cartão MicroSD (MD11), que se comunica com o ESP32 via protocolo SPI, utilizando os pinos GPIO 15 (CS), GPIO 12 (MISO), GPIO 13 (MOSI) e GPIO 14 (SCK). E para a parte de exportação de dados, foi utilizado o próprio modulo Wi-Fi integrado no ESP32.

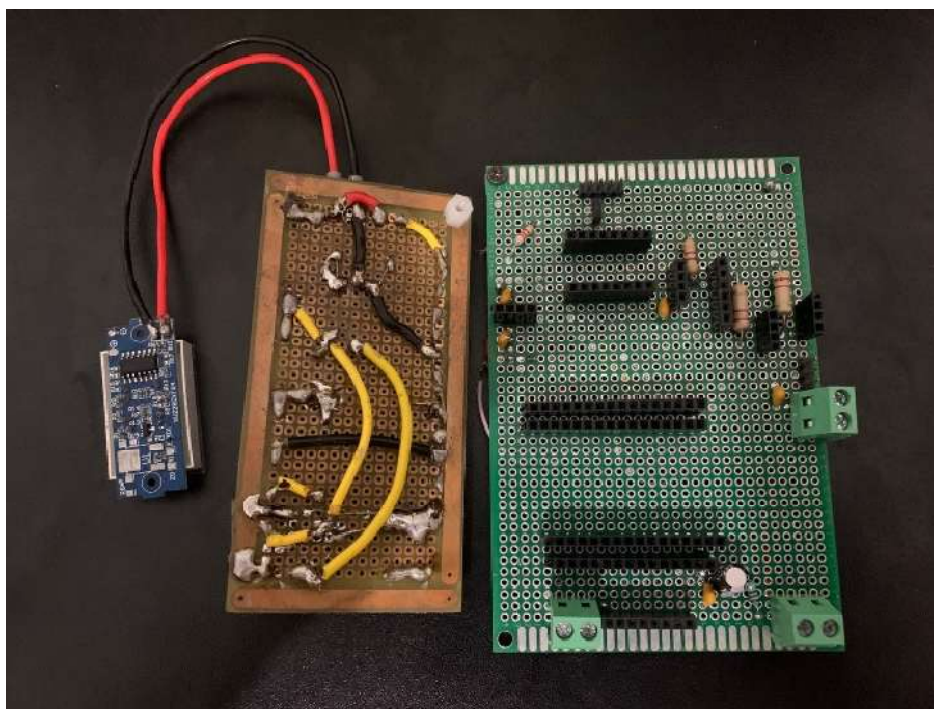
Por fim, o sistema possui um mecanismo de proteção térmica que utiliza o sensor de temperatura DS18B20 (D11) para monitorar a temperatura interna do invólucro. Este sensor se comunica com o microcontrolador pelo protocolo *1-Wire*, sendo exigido o resistor R7 de 4,7k Ω como *pull-up*. Caso a temperatura exceda um limiar predefinido, a porta GPIO 5 do ESP32 ativa o *cooler* de 12V (M1). A ativação do *cooler* é feita por meio de uma configuração com dois transistores, Q3 e Q4. Onde o processo ocorre quando o transistor Q3, do tipo P, é acionado por um sinal de 3,3V da porta GPIO 5 e faz o chaveamento de uma tensão de 5V. A saída de Q3 é então ligada à base do transistor Q4, do tipo N. Este segundo transistor, Q4, utiliza o sinal recebido de Q3 para realizar o chaveamento final da linha de 12V, ligando e desligando o *cooler* de ventilação do sistema. Para garantir que não haja acionamentos falsos dos transistores por flutuações de sinal, os resistores R5 e R6 atuam como *pull-down*

no circuito de acionamento, assegurando um estado estável quando não estão sendo ativados. O *cooler* é alimentado pela linha de 12V e possui o capacitor C9 para filtrar ruídos.

3.2.3 Placa de Circuito Impresso

Após a definição dos componentes e a elaboração dos esquemáticos dos circuitos de alimentação e controle (Apêndice A e Apêndice B), deu-se início à fase de montagem e validação física do protótipo de teste. Nesta etapa, os circuitos foram montados em uma placa de circuito impresso perfurada de dupla face, com as interconexões elétricas dos circuitos feitas com cabos individuais na parte inferior da placa, conforme ilustrado na Figura 35. A partir da montagem inicial do protótipo de teste, foi possível realizar todos os testes e ajustes práticos de funcionamento, além das configurações de programação necessárias.

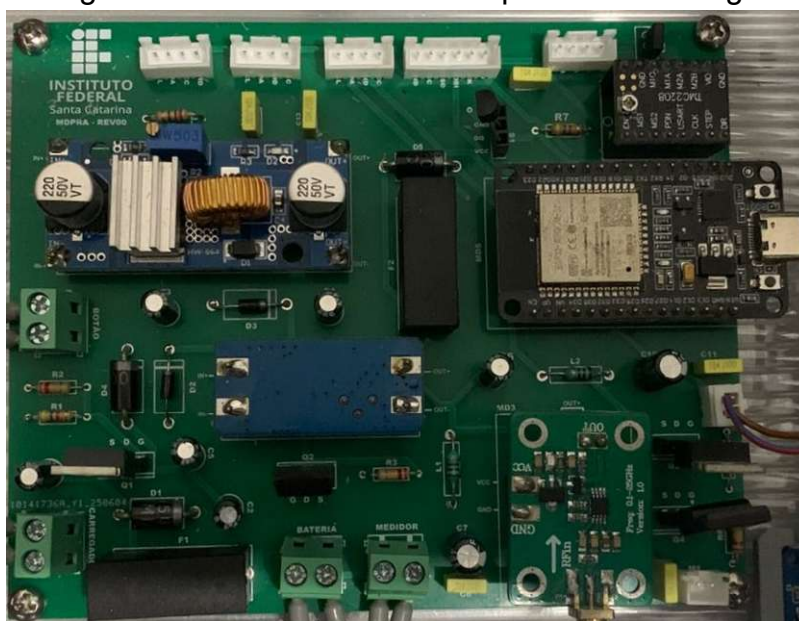
Figura 35 – Placa perfurada protótipo de teste



Fonte: Autor.

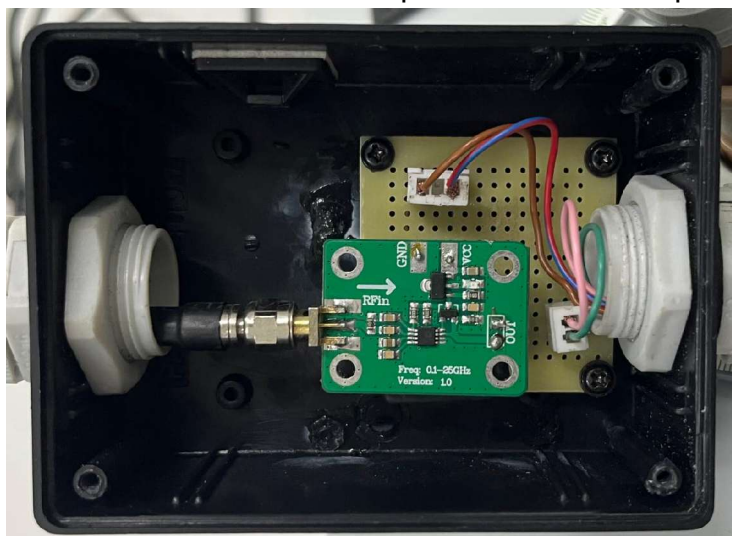
Após a conclusão dos testes e da validação do protótipo inicial, iniciou-se o desenvolvimento de duas Placas de Circuito Impresso (PCI) personalizadas. A primeira foi projetada para o sistema do detector de potência, que será acoplado ao eixo do motor, e a segunda para o restante do circuito. O objetivo das placas é reduzir os riscos de falhas por mau contato e proporcionar uma aparência mais organizada e profissional ao projeto. Para o *design*, foi utilizado o *software* EasyEDA, ferramenta que permitiu transpor os circuitos detalhados nos Apêndices A e B para em dois *layouts* de PCI (Figura 36 e 37).

Figura 36 – Placa de circuito impresso sistema geral



Fonte: Autor.

Figura 37 – Placa de circuito impresso detector de potência



Fonte: Autor.

As placas foram projetadas com um *design* modular, permitindo a fácil substituição de módulos e componentes, sendo essencial para a proposta didática do sistema, pois facilita manutenções e modificações durante as aplicações de ensino e pesquisa. As placas possuem duas camadas: a camada superior contém a maioria das trilhas de potência e sinal, enquanto a camada inferior atua como uma malha de aterramento e abriga algumas trilhas. Essa malha inferior proporciona maior estabilidade elétrica e redução de interferências eletromagnéticas. As trilhas foram dimensionadas com largura de 1,25mm como padrão, garantindo um potencial ideal de condução de corrente, reduzindo a resistência elétrica, minimizando perdas de energia e aquecimento.

3.3 Código e Comunicação

O desenvolvimento do código do sistema teve como objetivo integrar os diferentes módulos existentes no sistema e garantir o armazenamento e a exportação de dados de forma automatizada e confiável. Esta seção detalha a lógica de programação implementada no microcontrolador ESP32, responsável pelo controle do sistema, e o método de comunicação utilizando o *AppScript* para a exportação de dados, que permite o armazenamento e a análise remota dos resultados

3.3.1 Código IDE

O código implementado no microcontrolador foi desenvolvido na IDE (Ambiente de Desenvolvimento Integrado) do Arduino, utilizando a linguagem C/C++ e bibliotecas específicas para o funcionamento no ESP32. Toda a lógica de programação feita na IDE foi estruturada seguindo os fluxogramas dos Apêndices C até F. O funcionamento do código baseia-se na interface homem-máquina, que gerencia duas principais frentes de operação: a navegação pelos menus de configuração e a execução do processo de varredura automatizada.

Na inicialização, seguindo o fluxograma do Apêndice C, o sistema realiza uma verificação completa dos periféricos essenciais, como o *display* LCD, o teclado, o sensor de ângulo, o módulo de cartão MicroSD e a conexão Wi-Fi, assegurando que todos os módulos estejam em funcionamento antes de prosseguir com o código. Após a inicialização, é dada entrada o processo de interação com o usuário, que é gerenciada por um conjunto de três menus hierárquicos: Menu Inicial (Apêndice D),

Menu Configurações (Apêndice E) e Menu Mais Configurações (Apêndice F). Todos os menus e suas funcionalidades são exibidos no *display*, permitindo a configuração de parâmetros de varredura como ângulo total, passo angular e número de leituras, e também a definição do ponto zero de referência e o monitoramento do status do sistema, como temperatura e conexão.

O elemento central do processo automatizado é a função de varredura, executada em um ciclo sequencial de estados. O ciclo inicia-se com o estado de posicionamento, no qual o motor de passo é acionado para mover a antena até o ângulo-alvo, utilizando o *feedback* contínuo do sensor magnético AS5600. Após, inicia-se o estado de estabilização, que consiste em uma pausa para garantir que vibrações mecânicas residuais não interfiram na medição de potência. Concluída a estabilização, o sistema entra em coleta de dados, no qual o microcontrolador recebe o valor de tensão do detector AD8313 e realiza a conversão para um valor digital (entre 0 e 4095), que representa a potência captada. Para garantir maior estabilidade nesta medição, calcula-se a média do número de amostras definidos pelo usuário na configuração da varredura, para cada ângulo de passo. Esse valor médio é então registrado como o resultado de potência para o ângulo em questão. Por fim, o estado de avanço calcula a próxima posição angular e reinicia o ciclo. Os dados coletados em cada passo contêm a data e a hora obtidas via NTP(Protocolo de Tempo de Rede) quando conectado à *internet*. O ângulo e o nível de potência são salvos localmente em um arquivo no formato CSV no cartão MicroSD e, ao mesmo tempo, são enviados via Wi-Fi para uma planilha no Google *Sheets*, permitindo a visualização e a análise dos resultados em tempo real.

Além disso, foram implementadas funções de segurança e monitoramento, como o controle de temperatura e o acionamento do *cooler* e do *buzzer*, que atuam tanto na proteção do sistema quanto na interação com o usuário. Outro recurso de proteção implementado foi o sistema de antitorção, que evita a torção do cabeamento que conecta a placa do sistema geral à do detector de potência. Sua lógica contabiliza as rotações em cada sentido e, ao final da operação, calcula o balanço para executar um movimento corretivo, neutralizando o ângulo sobressalente e desfazendo a torção acumulada. Essa arquitetura de *software*, que combina verificações de integridade, uma interface de usuário e uma máquina de estados para o controle da automação, resulta em um sistema eficiente e alinhado aos objetivos didáticos do projeto.

3.3.2 Código *Apps Script*

O código desenvolvido no Google *Apps Script* (Apêndice H) tem a função de intermediar a comunicação entre o microcontrolador ESP32 e a planilha do Google *Sheets*, possibilitando o armazenamento e a consulta dos dados de forma remota. A lógica do *script* segue a lógica do fluxograma do Apêndice G, foi estruturada para receber requisições enviadas pelo ESP32, interpretá-las e executar a ação correspondente na planilha.

O processo se inicia com a função principal, que identifica qual operação foi solicitada e encaminha para rotinas específicas. Entre as funcionalidades implementadas está a função “escreverEmLista”, responsável por registrar em sequência as medições de ângulo, potência e temperatura durante um *scan*. A função “escreverEmCelula” é voltada para atualizar informações isoladas, como parâmetros de configuração, e a função “lerCelula” faz a leitura de valores já armazenados, permitindo que o ESP32 recupere informações previamente salvas. Em casos de comandos inválidos, o código gera uma resposta sonora e visual de erro. O retorno de cada operação é enviado diretamente ao microcontrolador, confirmando o sucesso da ação ou informando falhas.

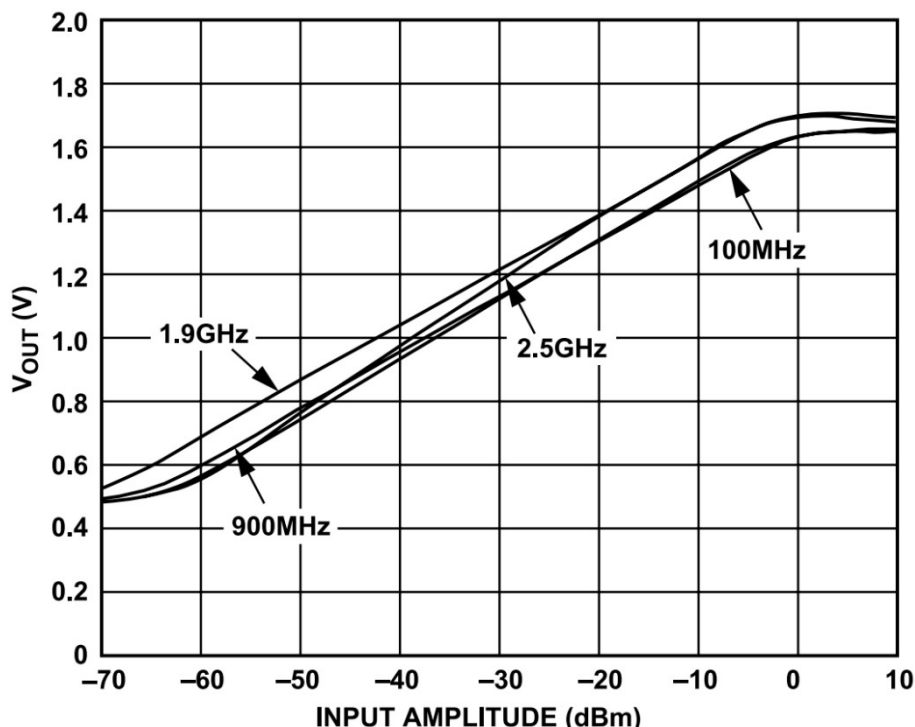
Dessa maneira, o *Apps Script* atua como uma ponte eficiente entre o *hardware* e o ambiente de nuvem, garantindo que as informações coletadas sejam devidamente registradas, acessíveis e organizadas, além de ampliar as possibilidades de análise e documentação dos experimentos realizados. Assim como o código da IDE, o *script* desenvolvido está publicamente disponível no mesmo repositório *online*¹.

3.4 Método de Testes

Para validar a funcionalidade, a precisão e a eficácia do sistema didático desenvolvido, foi elaborada uma metodologia de testes práticos. Antes da definição dos ensaios, foi realizada uma análise do comportamento do sinal enviado pelo detector de potência AD8313. Através do *datasheet* do detector, fabricado pela Analog Devices, analisou-se o gráfico que demonstra a curva de relação entre a tensão de saída e a potência de entrada em dBm. Neste gráfico, foi identificada a curva mais próxima da frequência de operação desejada (2,5GHz), a qual indicou um comportamento linear na faixa de potência entre -60dBm e -10dBm, como mostra a Figura 38.

¹ Disponível em: <https://github.com/felipeFSCITAJAI/TCC-FELIPE-LIMA>

Figura 38 – Curva de relação entre a tensão de saída e a potência AD8318



Fonte: Analog Devices (2025).

Após a verificação do sinal enviado pelo AD8313, foi possível analisar como a porta do ESP32 trata os dados recebidos pelo detector. A porta GPIO 34, responsável por receber o sinal, possui um ADC de 12 bits, que mapeia uma faixa de tensão de entrada de 0V a 3,3V e converte para valores digitais de 0 a 4095. Com base nessa relação, foi possível determinar a faixa de valores lidos pelo ADC que correspondem à região de operação linear do detector. Os valores de limites inferior e superior foram definidos pela Equação 2, que realiza um cálculo proporcional para a conversão dos valores, utilizando a relação de 3,3V equivalente ao valor digital 4095.

$$P_{rf} = \frac{V_{rf} \cdot 4095}{3,3} \quad (2)$$

Onde:

P_{rf} = Potência digital equivalente do detector de potência;

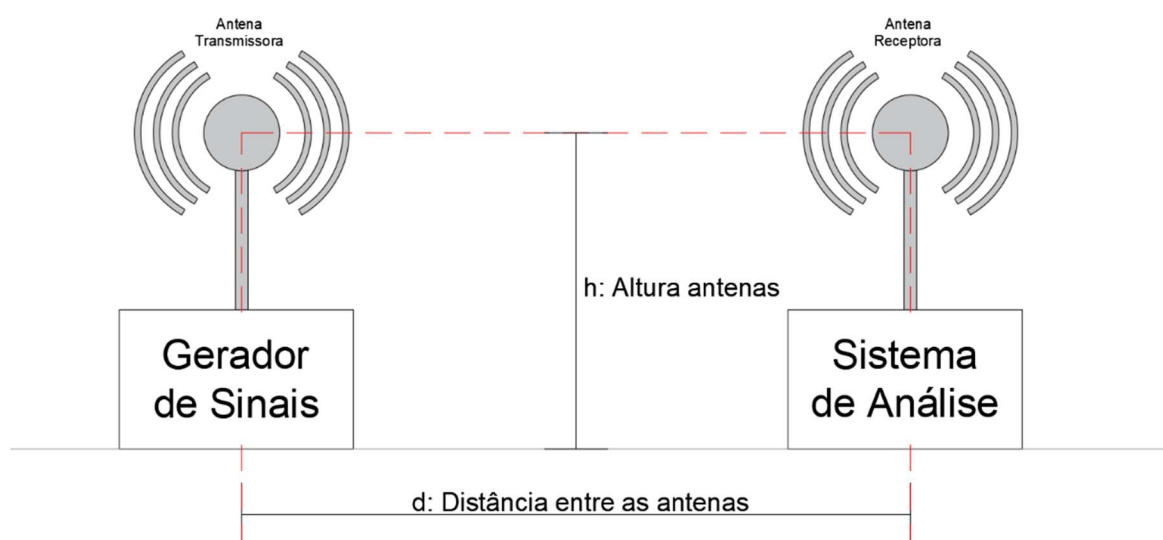
V_{rf} = Tensão de saída do detector de potência.

Dessa forma, definiu-se que os valores digitais 744 e 1985 representam, respectivamente, o limite inferior e o superior da faixa de linearidade do detector. Portanto, para uma análise mais assertiva, os valores medidos devem estar contidos

nesse intervalo. Com base nesses limites, foram realizados ensaios de calibração para assegurar a melhor transmissão durante os testes, que foi executada por uma placa de Rádio Definido por *Software* (SDR) modelo USRP B2100. O controle e a alteração dos parâmetros de transmissão como ganho e frequência foram gerenciados através do *software* GNU Radio. O processo consistiu em alterar esses parâmetros enquanto se monitorava a resposta no sistema de medição. Sendo possível, assim, determinar a configuração que maximiza o sinal de transmissão dentro da faixa linear estabelecida, definindo o ganho de transmissão em 80dB e a frequência em 2,44GHz

Para a realização dos ensaios, a antena *Quasi-Yagi Uda*² disponível no laboratório de Eletromagnetismo do Câmpus IFSC Itajaí foi definida como a antena transmissora. Esta escolha se deu pela sua disponibilidade e pela característica de diretividade, permitindo concentrar o sinal na antena sob teste. No lado da recepção, foram utilizadas duas antenas com diagramas de irradiação distintos: uma antena dipolo e uma segunda antena *Quasi-Yagi Uda*. Entretanto, cabe observar que nenhuma das antenas empregadas, possuíam um diagrama de irradiação simulado de referência. Todos os testes foram conduzidos em laboratório, simulando o ambiente operacional destinado ao uso do sistema. A montagem experimental seguiu o modelo de ensaio exibido na Figura 39, onde as antenas transmissora e receptora foram alinhadas na mesma altura e em seus respectivos eixos principais de radiação.

Figura 39 – Configuração geral teste prático



Fonte: Autor.

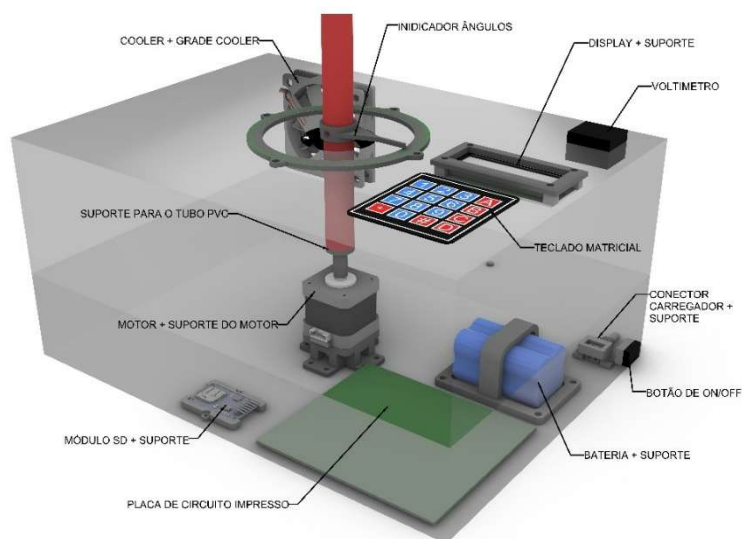
² O prefixo "Quasi-" (do latim, que significa quase ou semelhante a) é utilizado para indicar que a antena imita o comportamento e a estrutura da Yagi-Uda, mas não é uma Yagi-Uda tridimensional clássica.

Seguindo o *layout* prático exposto na Figura 39, foram definidas as configurações padrão de teste, nas quais os ensaios seriam realizados. Definiu-se, assim, como padrão, a distância entre as antenas em 50cm, amplitude de varredura de 180° e passo angular de 5°. Todas as varreduras terão início no ângulo zero, seguindo a sinalização do sensor de ângulo e do marcador de referência angular do invólucro. Visto que os diagramas de radiação das antenas são simétricos, os dados medidos serão espelhados para compor o gráfico polar completo de 360°. Em cada ângulo, serão realizadas 30 medições de potência, e a média aritmética desses valores será utilizada como o valor resultante daquele ângulo, visando atenuar flutuações do sinal. O Apêndice I detalha as configurações definidas para os testes e as suas variações em cada ensaio. No Ensaio 1, dada a inexistência de diagramas práticos anteriores, os diagramas obtidos para as duas antenas serão comparados com seus respectivos diagramas teóricos.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Utilizando o software Rhinoceros 8 (versão de avaliação), um projeto 3D foi desenvolvido para o invólucro do sistema, conforme ilustra a Figura 40. O modelo foi fundamental para a otimização do espaço interno, permitindo o posicionamento estratégico e adequado dos componentes eletrônicos, além de atuar como guia de montagem.

Figura 40 – Projeto 3D modelado do sistema



Fonte: Autor.

O processo de montagem final do sistema didático desenvolvido está exposto nas Figuras 41, 42 e 43, seguindo o projeto da Figura 40.

Figura 41 – Vista frontal do sistema didático



Fonte: Autor.

Figura 42 – Vista interna do sistema didático



Fonte: Autor.

Figura 43 – Vista Geral do sistema didático



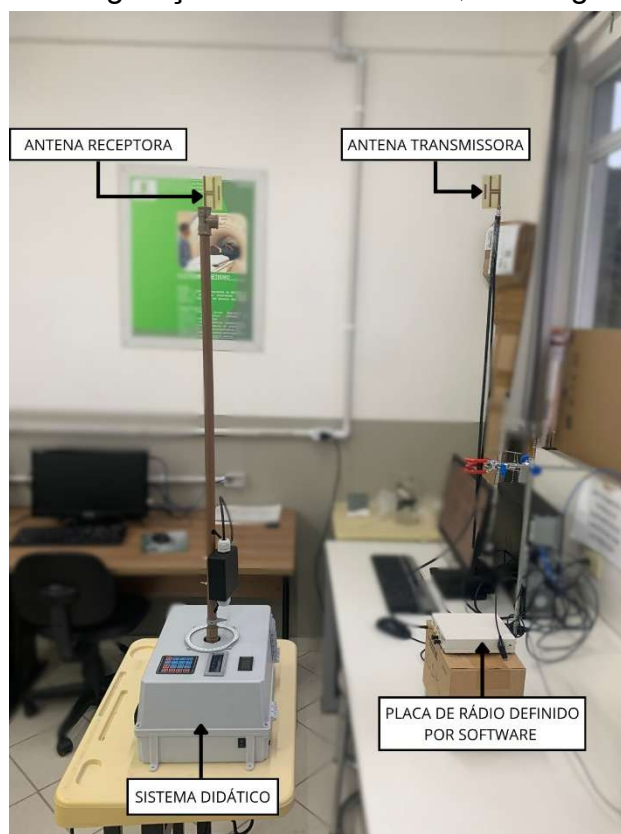
Fonte: Autor.

Todos os componentes desenhados em 3D, juntamente com o layout de montagem de todo o invólucro, estão disponíveis no repositório. Na sequência, apresentam-se os ensaios, executados conforme as configurações descritas na tabela do Apêndice I. Além disso, a tabela detalhada de itens e valores de todos os equipamentos que compõem o sistema pode ser consultada no Apêndice J.

4.1 Comparação dos Tipos de Antenas

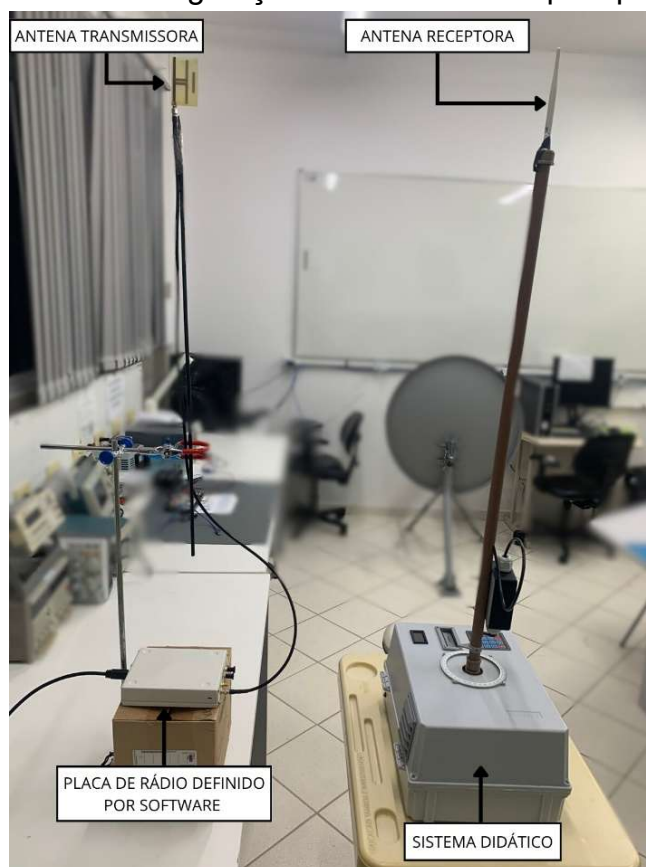
O primeiro teste, foi realizado a medição de duas antenas com diagramas distintos, a primeira, uma antena do tipo *Quasi-Yagi Uda*, e a segunda, uma antena dipolo. O intuito foi averiguar a capacidade do sistema em identificar diferentes padrões de radiação de diferentes configurações de antenas. As Figuras 44 e 45 ilustram a configuração experimental de ambas as antenas e sua posição inicial para a varredura. As antenas sob teste foram alinhadas no mesmo eixo que a antena transmissora, caracterizando o plano H de transmissão. A antena dipolo foi posicionada com seus polos no eixo vertical, como é possível ver na Figura 45.

Figura 44 – Configuração ensaio antena *Quasi-Yagi Uda* plano H



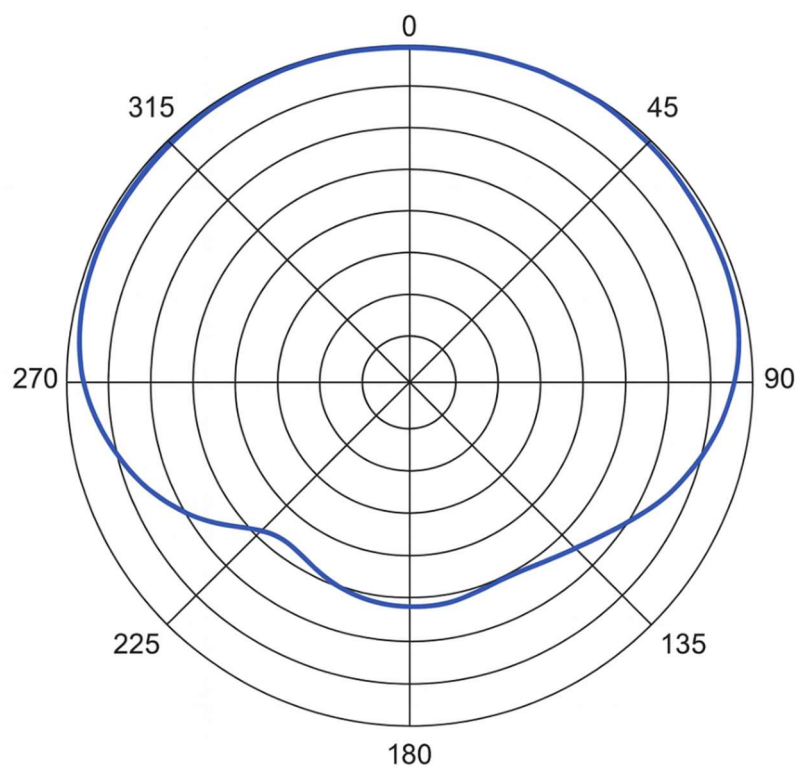
Fonte: Autor.

Figura 45 – Configuração ensaio antena dipolo plano H

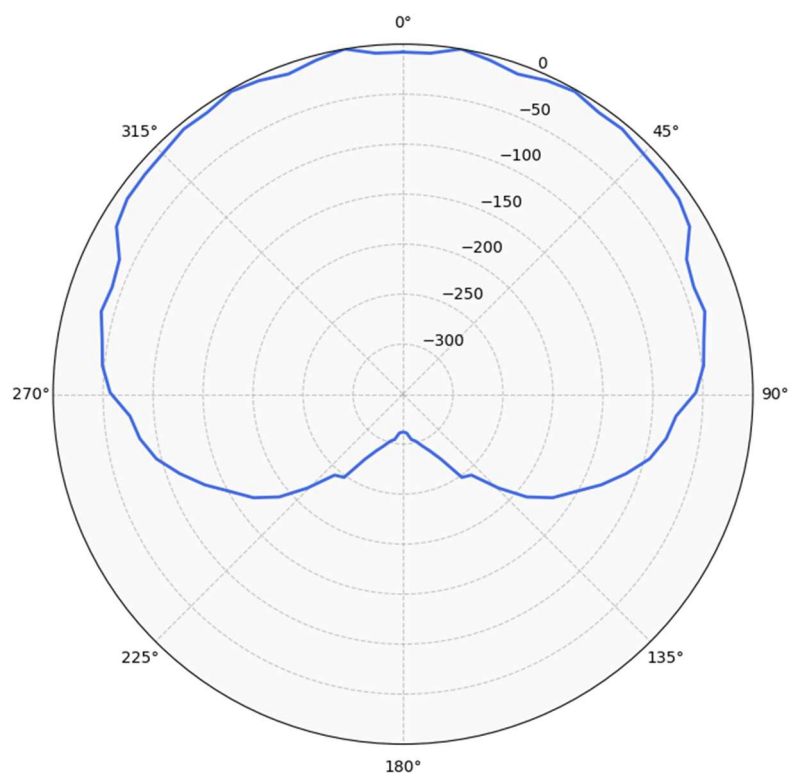


Fonte: Autor.

Para a comparação do diagrama de radiação da antena do tipo *Quasi-Yagi Uda*, foi considerado o diagrama obtido por Bezerra (2017), apresentado na Figura 46. O autor fabricou e testou a antena na mesma faixa de frequência utilizada nos testes deste trabalho, mas com algumas características construtivas diferentes comparadas com a usada no sistema em questão. O diagrama obtido pelo sistema didático, exposto na Figura 47, foi gerado com base nos dados obtidos nos testes. O gráfico foi normalizado pelo valor de pico medido, correspondente a um valor digital de 1699. Além disso, o limite mínimo da escala foi ajustado para otimizar a visualização do padrão de radiação.

Figura 46 – Referência de diagrama de radiação antenna *Quasi-Yagi Uda*

Fonte: Bezerra (2017).

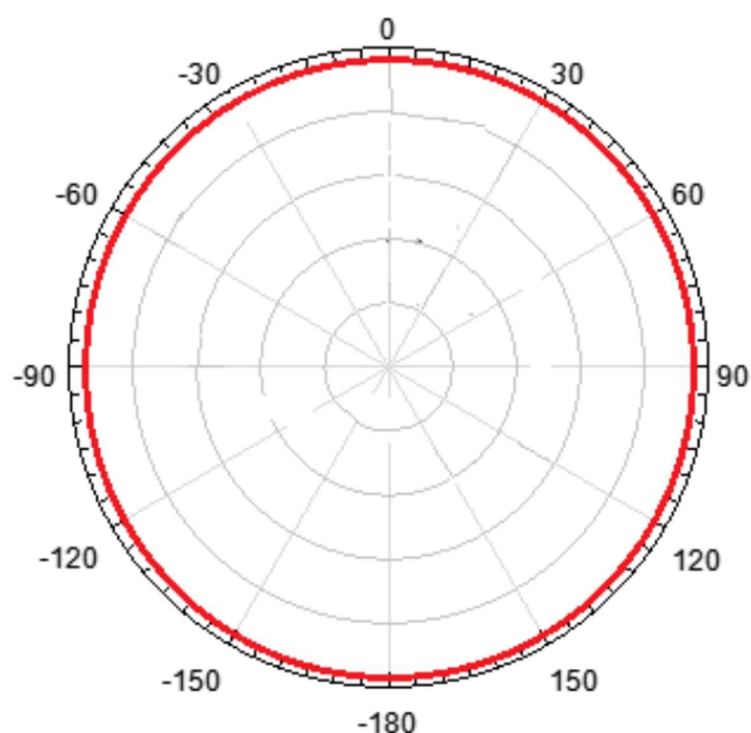
Figura 47 – Diagrama de radiação antenna *Quasi-Yagi Uda* configuração padrão

Fonte: Autor.

A análise comparativa entre o diagrama de referência, proposto por Bezerra (2017) (Figura 46), e o diagrama obtido experimentalmente (Figura 47) revela uma semelhança significativa no padrão de radiação do lóbulo principal. Em ambos os casos, observa-se uma diretividade acentuada, indicando a capacidade da antena de concentrar a maior parte da energia irradiada em uma direção específica. Contudo, ao analisar o lóbulo traseiro, é possível notar uma divergência entre os diagramas. Enquanto o diagrama de Bezerra (2017) apresenta um lóbulo secundário de pequena amplitude, no diagrama obtido nos testes, este é praticamente inexistente. Essa diferença é possivelmente causada pelas diferenças construtivas entre a antena de referência e o protótipo testado. Apesar dessa variação, os resultados experimentais puderam ser validados, pois o diagrama obtido manteve o padrão de radiação esperado, e a antena demonstrou a diretividade desejada no lóbulo principal, mesmo com um lóbulo traseiro inexistente.

Para a segunda antena sob teste, foi utilizado como referência o diagrama obtido por Trevisan (2021), exposto na Figura 48. Conforme a referência, a antena dipolo deve apresentar um padrão de radiação omnidirecional no Plano H. Esse padrão é caracterizado por uma distribuição uniforme de densidade de potência em 360° nesse plano.

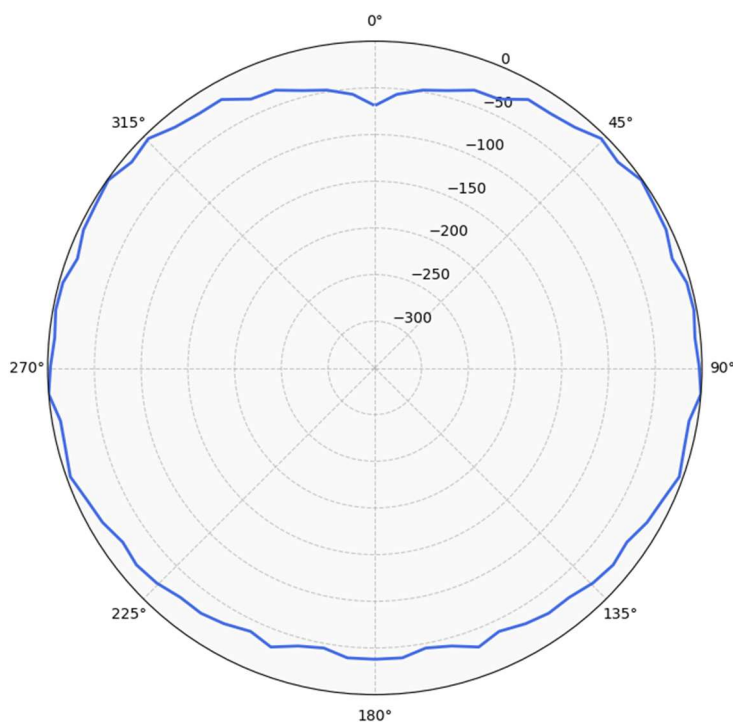
Figura 48 – Referência de diagrama de radiação antena dipolo plano H



Fonte: Trevisan (2021).

O diagrama de radiação da antena dipolo, apresentado na Figura 49, foi construído a partir dos dados experimentais listados no repositório. Os valores foram normalizados com base no valor máximo medido, correspondente a 1661 níveis digitais. Assim como na análise anterior, o gráfico foi ajustado para otimizar a visualização. Ao analisar o diagrama, nota-se uma pequena variação entre as medições, com uma amplitude máxima de 68 níveis digitais. Essa pequena variação é um indicador de um padrão de radiação similar ao omnidirecional, sendo semelhante aos resultados apresentados por Trevisan (2021).

Figura 49 – Diagrama de radiação antena dipolo plano H configuração padrão



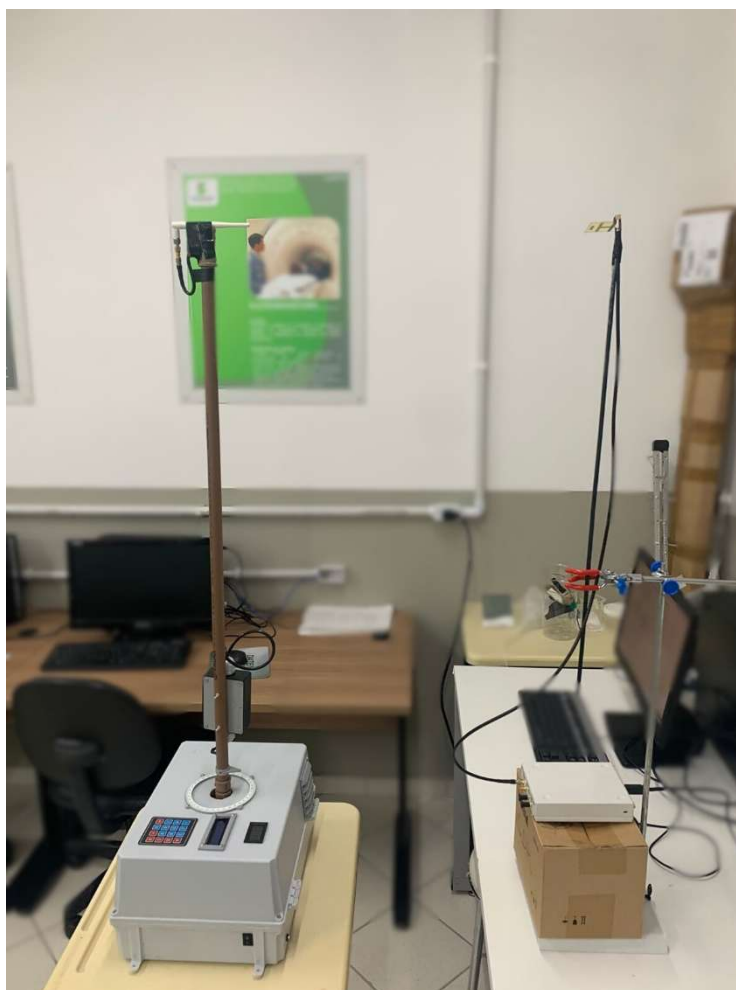
Fonte: Autor.

4.2 Comparação dos Planos de Medição

O segundo ensaio, seguindo a configuração listada no Apêndice I, teve como objetivo verificar o comportamento do sistema na medição de diferentes planos de uma mesma antena, utilizando a antena dipolo. O primeiro plano analisado foi executado no ensaio anterior, conforme a configuração prática exposta na Figura 45. O diagrama resultante, apresentado na Figura 49, confirmou o padrão omnidirecional esperado para o Plano H da antena dipolo. Para verificar o potencial do sistema em

diferenciar os planos de medição, a posição da antena receptora e transmissora foi alterada para formar o Plano E, como mostra a Figura 50. Nesta configuração, ambas as antenas foram posicionadas na horizontal, alinhando seus polos para obter a variação do plano desejado.

Figura 50 – Configuração ensaio antena dipolo plano E

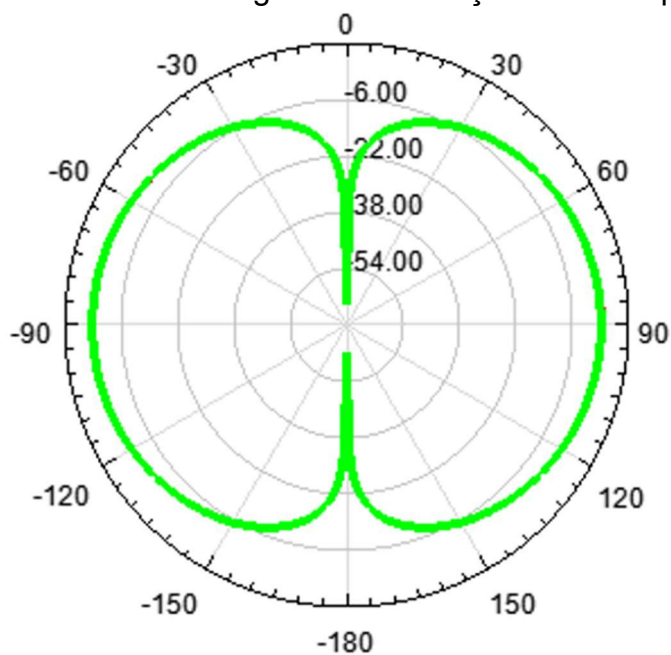


Fonte: Autor.

Assim como no ensaio anterior da antena dipolo, utiliza-se como referência de diagrama de radiação o gráfico obtido por Trevisan (2021), que está exposto na Figura 51. Ao analisar o gráfico de Trevisan (2021), é possível notar que no Plano E, o dipolo possui dois lóbulos principais espelhados. Para gerar o gráfico do Plano E da antena sob teste, foram utilizados os dados obtidos e expostos no repositório. Como nos testes anteriores, os dados foram normalizados pelo maior valor obtido no ensaio, que foi o valor digital de 1577. Analisando o diagrama obtido (Figura 52), nota-se um padrão similar ao obtido por Trevisan (2021), seguindo a divisão do sinal em dois lóbulos principais espelhados.

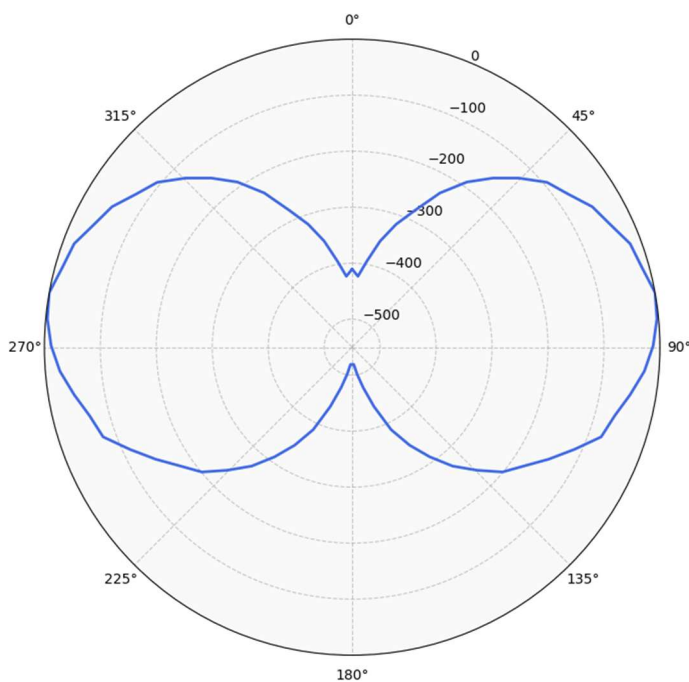
Ao comparar o gráfico obtido para os dois planos (Figura 49 e Figura 52), verifica-se a capacidade do sistema em detectar diferentes padrões da mesma antena, sendo possível adquirir os dados característicos de cada plano apenas modificando a configuração física entre a antena transmissora e a receptora.

Figura 51 – Referência de diagrama de radiação antena dipolo plano E



Fonte: Trevisan (2021).

Figura 52 – Diagrama de radiação antena dipolo plano E configuração padrão



Fonte: Autor.

4.3 Análise do Efeito da Distância

O terceiro ensaio, seguindo a configuração descrita no Apêndice I, teve como objetivo analisar o efeito da variação da distância no diagrama de radiação medido. Para este teste, foi utilizada a antena *Quasi-Yagi Uda* no Plano H. A primeira medição seguiu a configuração padrão, com 50cm de distância entre as antenas. O diagrama resultante é o mesmo obtido no Ensaio 1, já apresentado na Figura 47. Para a segunda medição, a distância foi aumentada para 100cm (Figura 53), mantendo todas as outras configurações do ensaio, como o passo angular e o número de amostras.

Figura 53 – Configuração ensaio antena *Quasi-Yagi Uda* distância de 100cm

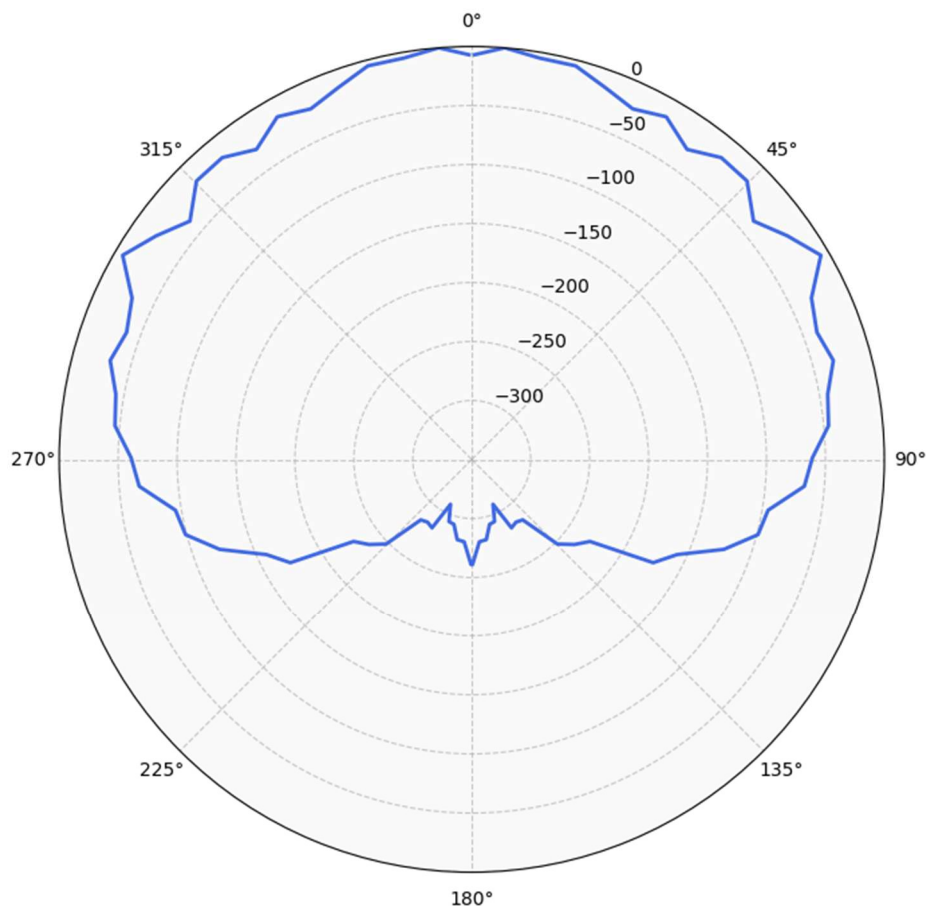


Fonte: Autor.

O diagrama de radiação para a distância de 100cm (Figura 54) foi gerado a partir dos dados coletados. Como nos ensaios anteriores, os dados foram normalizados pelo valor de pico medido, correspondente a 1432. Ao comparar os dois diagramas de radiação (Figura 47 e Figura 54), observa-se uma notável semelhança no padrão. Ambos os gráficos mantêm a característica direcional da antena, com um lóbulo principal acentuado e um lóbulo traseiro praticamente inexistente. A principal diferença, como esperado, foi na amplitude absoluta do sinal recebido, que foi menor no teste de 100cm devido à maior atenuação do espaço livre. Contudo, como os gráficos são normalizados para a análise do padrão, o resultado comprova a

capacidade do sistema em caracterizar a antena de forma consistente. Isso demonstra que, dentro da faixa de operação linear do detector, a variação da distância não distorceu o formato do diagrama medido.

Figura 54 – Diagrama de radiação antena *Quasi-Yagi Uda* distância de 100cm



Fonte: Autor.

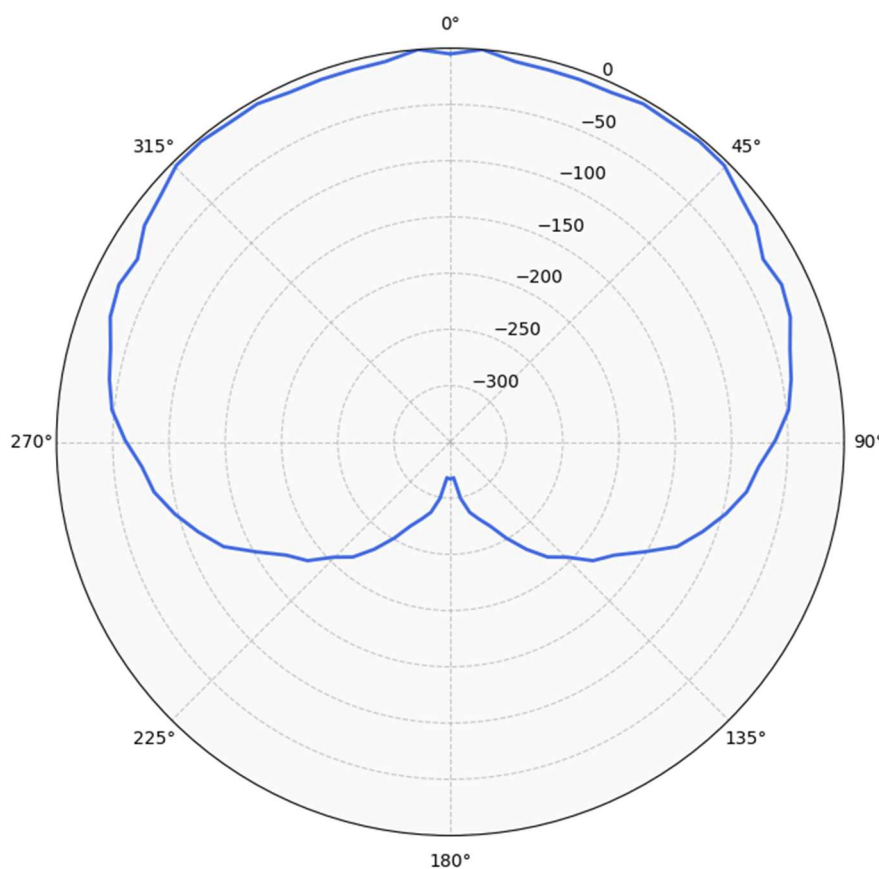
4.4 Análise do Efeito das Amostras

O quarto ensaio, conforme detalhado no Apêndice I, foi conduzido para analisar a influência do número de amostras por ângulo no diagrama de radiação final. O objetivo era verificar a estabilidade da medição. Para este teste, foi utilizada a antena *Quasi-Yagi-Uda* na configuração padrão. A primeira medição, usada como referência, é a do ensaio padrão com 30 amostras por ângulo, cujo resultado já foi apresentado na Figura 47. Na segunda medição deste ensaio, o número de amostras foi reduzido para 15, mantendo-se todos os outros parâmetros. O diagrama de radiação resultante do teste (Figura 55), foi gerado a partir dos dados coletados. Seguindo a metodologia anterior, os dados foram normalizados pelo valor de pico medido, que correspondeu

a 1689.

Ao analisar os gráficos da Figura 47 com 30 amostras e Figura 55 com 15 amostras, nota-se que o padrão de radiação permanece similar entre eles. Mesmo reduzindo o número de amostras pela metade, o pico e amplitude do gráfico se mantiveram muito próximos da configuração padrão. Isso demonstra que o sistema não exige um número excessivo de amostras para caracterizar o diagrama, o que permite otimizar o tempo de varredura sem sacrificar a precisão da medição.

Figura 55 – Diagrama de radiação antena *Quasi-Yagi Uda* com 15 medições



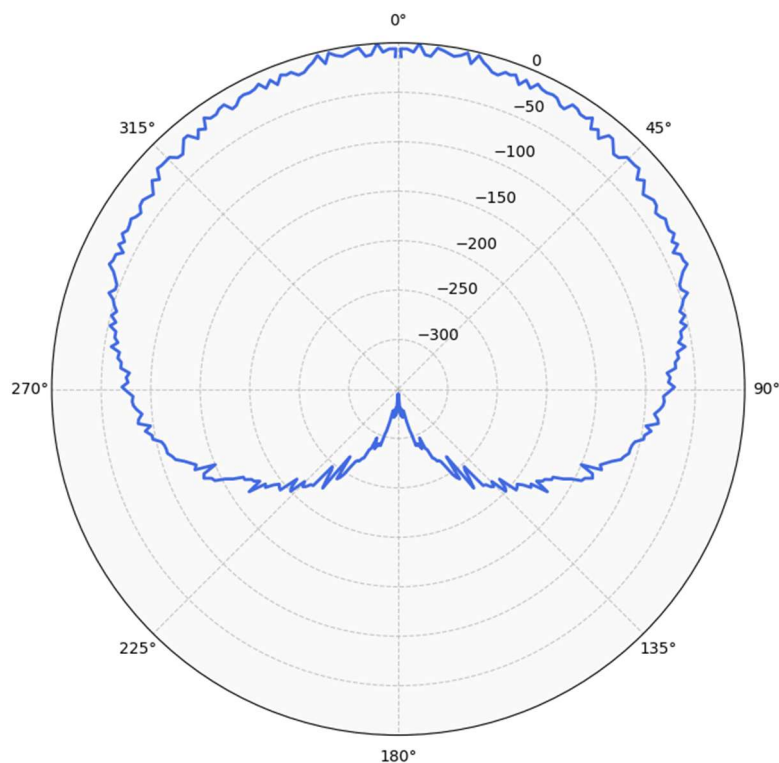
Fonte: Autor.

4.5 Análise do Efeito do Passo

O último ensaio, seguindo a configuração do Apêndice I, analisou o efeito da variação do passo angular na resolução do diagrama de radiação medido. Assim como nos ensaios anteriores, foi utilizada como referência os dados do ensaio padrão, realizada com um passo angular de 5°, cujo resultado já foi apresentado na Figura 47. Para a segunda medição, o passo angular foi reduzido para 1°, aumentando significativamente a quantidade de pontos de dados coletados na varredura de 180°.

O diagrama de radiação obtido no teste e ilustrado na Figura 56, foi gerado a partir dos dados listados no repositório. Os dados foram normalizados pelo valor de pico medido de 1704.

Figura 56 – Diagrama de radiação antena *Quasi-Yagi Uda* com 1° de passo



Fonte: Autor.

Comparando os dados obtidos nesse ensaio com os dados da configuração inicial, notou-se o padrão de radiação geral da antena permanece consistente, confirmando a forte diretividade no lóbulo principal. Contudo, o diagrama com passo de 1°, apresenta uma curva visivelmente mais detalhada, incluindo todas as pequenas flutuações e ruídos causados por reflexões no ambiente, instabilidades no sinal ou interferências. Uma consequência importante dessa alta resolução é que este gráfico tende a mostrar um maior valor de pico no lóbulo principal, pois a medição consegue capturar o ponto exato de máxima intensidade que poderia ser "perdido" ou atenuado em uma medição com passos maiores. Da mesma forma, ele apresenta uma maior amplitude entre o máximo e o mínimo medido, pois as pequenas flutuações e os nulos da radiação são realizados com maior precisão.

Isso demonstra a flexibilidade do sistema, pois enquanto um passo de 5° é suficiente para uma rápida identificação do padrão geral da antena, o passo de 1° oferece uma resolução superior, ideal para uma análise técnica ou acadêmica mais

apurada, validando a capacidade do sistema em ajustar a precisão da medição conforme a necessidade do usuário.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um sistema didático, automatizado e portátil para a análise prática de antenas na faixa de UHF. O objetivo principal foi criar uma solução didática e de fácil acesso que superasse as barreiras financeiras e de complexidade impostas pelos equipamentos comerciais, facilitando o ensino prático e a experimentação em ambientes educacionais. O sistema foi projetado e construído utilizando componentes de fácil acesso e disponíveis no mercado, como o microcontrolador ESP32, o detector de potência AD8313 e o motor de passo Nema 17. Essa arquitetura não só viabilizou o baixo custo, mas também garante que o protótipo possa ser facilmente replicado para utilização em laboratórios de ensino técnico e superior, promovendo uma ferramenta acessível para o estudo de conceitos fundamentais de antenas.

Os resultados experimentais demonstraram que o protótipo foi capaz de obter diagramas de radiação coerentes com os modelos teóricos de referência para diferentes tipos de antenas analisadas. Mesmo com os testes sendo conduzidos em um ambiente não controlado, contendo diversos elementos potencialmente geradores de ruído e reflexões eletromagnéticas, os dados coletados apresentaram boa consistência e repetibilidade.

A automação do processo de aquisição de dados mostrou-se um fator relevante para a eficiência do sistema. A captação automática das medições, aliada ao armazenamento local e à visualização em tempo real por meio de serviços em nuvem, reduziu a necessidade de intervenções manuais, minimizando a ocorrência de erros operacionais e otimizando o tempo de execução dos ensaios.

Do ponto de vista econômico, o sistema desenvolvido apresentou um custo significativamente inferior quando comparado aos sistemas comerciais destinados à análise e caracterização de antenas. Conforme detalhado na Tabela de custos apresentada no Apêndice J, o valor total estimado do protótipo corresponde a aproximadamente US\$ 200,00, considerando a conversão para a moeda norte-americana. Em contraste, sistemas didáticos comerciais utilizados para fins educacionais apresentam valores típicos na faixa de US\$ 1.000,00 a US\$ 1.200,00. Apesar do valor substancialmente inferior, o sistema proposto incorpora um conjunto de funcionalidades e possibilidades de configuração que não estão presentes nos equipamentos comerciais de mesma finalidade, tais como a automação completa da

aquisição de dados, ajuste de parâmetros operacionais pelo usuário, armazenamento local, exportação e visualização de dados em tempo real via nuvem. Dessa forma, o protótipo desenvolvido evidencia não apenas uma redução expressiva de custo, mas também uma ampliação dos recursos disponíveis para o ensino prático de antenas.

A arquitetura modular adotada no projeto constitui outro aspecto relevante, pois facilita a manutenção, a substituição de componentes e a implementação de futuras melhorias. Além disso, o sistema demonstrou ser configurável, permitindo ao usuário ajustar parâmetros de operação, como passo angular, número de amostras e condições de varredura, ampliando sua flexibilidade para diferentes práticas laboratoriais.

Por fim, conclui-se que o sistema desenvolvido se encontra funcional e adequado para aplicação em ambientes acadêmicos, contribuindo para o ensino prático de antenas e sistemas de comunicações. A disponibilização de um repositório contendo os códigos, esquemas e documentação técnica possibilita a replicação do projeto por outras instituições e redes de ensino, favorecendo a disseminação de soluções didáticas de baixo custo e fortalecendo a integração entre teoria e prática no ensino de engenharia elétrica.

Como trabalhos futuros, sugere-se o aprimoramento do sistema mecânico de antitorção e o desenvolvimento de interfaces adicionais, como aplicações móveis, visando ampliar ainda mais a usabilidade do equipamento.

REFERÊNCIAS

ACHUTHAN, K.; MURALI, S. S. **A comparative study of educational laboratories from cost & learning effectiveness perspective**. In: ADVANCES IN INTELLIGENT SYSTEMS AND COMPUTING, 2015, Singapore. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Singapore: Springer, 2015. v. 349, p. 143-153.

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (ANATEL). **Resolução nº 772, de 27 de março de 2017**. Aprova o Regulamento de Avaliação da Conformidade e Homologação de Produtos para Telecomunicações. Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/component/content/article/170-resolucoes/2025/2001-resolucao-772>. Acesso em: 28 jun. 2025.

ALIBABA. **1.8 Degree 2 Phase NEMA17 Stepper Motor**. Disponível em: <https://portuguese.alibaba.com/product-detail/1-8-Degree-2-Phase-NEMA17-60303783793.html>. Acesso em: 19 jul. 2025.

ALIEXPRESS. **Módulo detector de potência rf ad8312, 1-800mhz, sensor de intensidade de sinal de rf, placa de medição para arduino**. Disponível em: <https://pt.aliexpress.com/item/1005006464350076.html>. Acesso em: 20 jul. 2025.

AMS. **AS5600 – 12-bit programmable contactless potentiometer**. Version 1.06. Disponível em: https://ams.com/documents/20143/36005/AS5600_DS000365_5-00.pdf. Acesso em: 20 jul. 2025.

ANALOG DEVICES. AD8313: Logarithmic Detector/Controller (0.1 GHz to 2.5 GHz). Disponível em: <https://www.analog.com/en/products/ad8313.html>. Acesso em: 15 out. 2025.

ANTENNA trainer kit. In: **Kitek Technologies**. Disponível em: <https://kitektechnologies.com/antenna-trainer-kit.php>. Acesso em: 27 jun. 2025.

ARAÚJO, Samuel Vinícius Medeiros de et al. **Sistema de Medição Automatizado das Características de Irradiação de Antenas**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS, 36., 2018, Campina Grande. Campina Grande, PB, 2018. p. 1-6.

ATTIA, John Okyere; HOBSON, Lisa D.; OBIOMON, Pamela Holland; TEMBELY, Mahamadou. **Engaging electrical and computer engineering freshman students with an electrical engineering practicum**. American Society for Engineering Education, 2017.

AUTOCOREROBÓTICA. **Módulo driver para motor de passo TMC2208**. Disponível em: <https://www.autocorerobotica.com.br/modulo-driver-para-motor-de-passo-tmc2208>. Acesso em: 20 jul. 2025.

BALANIS, Constantine A. **Teoria de antenas: análise e síntese**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

BANCADA Didática Antena para treinamento controlado por computador Edibon EANC. In: Datasonic. Disponível em: <https://datasonic.com.br/sistemas-e-bancadas-didaticas/bancadas-edibon/bancada-didatica-antena-treinamento-controlado-por-computador-edibon-eanc>. Acesso em: 4 jul. 2025.

BAÚ DA ELETRÔNICA. **Display LCD 16x2 Azul com Módulo Adaptador I2C.** Disponível em: <https://www.baudaeletronica.com.br/produto/display-lcd-16x2-azul-com-modulo-adaptador-i2c.html>. Acesso em: 20 jul. 2025.

BEZERRA, André Wilson Lopes. **Tutorial Redes Wi-Fi 3.** Teleco, 14 ago. 2017. Disponível em: <https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialredeswifi3/default.asp>. Acesso em: 7 nov. 2025.

BÓSIO, Daniel. **Técnicas de Medição de Antenas em Campo Próximo por Varredura Utilizando a Geometria Planar.** 2010. Projeto Final de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

CURTO-CIRCUITO. **Módulo expensor de I/O 8-bit I2C PCF8574.** Disponível em: <https://curtocircuito.com.br/modulo-expensor-de-i-o-8-bit-i2c-pcf8574.html>. Acesso em: 20 jul. 2025.

DONINI, Luimar. **Projeto de um Posicionador para Caracterização de Diagramas de Irradiação de Antenas.** 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Telecomunicações) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2016.

ELETROGATE. **Sensor de Temperatura Digital DS18B20.** Disponível em: <https://www.eletrogate.com/sensor-de-temperatura-digital-ds18b20>. Acesso em: 19 jul. 2025.

FRANCO, M. A. R. S. **Prática pedagógica e docência: um olhar a partir da epistemologia do conceito.** Revista Brasileira de Estudos Pedagógicos, v. 97, n. 247, 14 dez. 2016.

FYSETC. **TMC2208.** Disponível em: <https://wiki.fysetc.com/docs/TMC2208>. Acesso em: 20 jul. 2025.

GOLDSMITH, A. **Wireless communications.** Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

GRIFFITHS, David J. **Introduction to electrodynamics.** 4. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.

KRAUS, John D.; MARHEFKA, Ronald J. **Antennas and wave propagation.** 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2017.

LIMA, Felipe Antunes de. **TCC-FELIPE-LIMA.** Repositório TCC Felipe Lima. Disponível em: <https://github.com/felipeFSCITAJAI/TCC-FELIPE-LIMA>. Acesso em: 17 nov. 2025.

MAKERHERO. **Módulo Cartão Micro SD.** Disponível em: <https://www.makehero.com/produto/modulo-cartao-micro-sd/>. Acesso em: 20 jul. 2025.

MAKERHERO. **Regulador de Tensão MT3608 Step Up.** Disponível em: <https://www.makehero.com/produto/regulador-de-tensao-mt3608-step-up/>. Acesso em: 26 jul. 2025.

MERCADO LIVRE. **Bateria Li-ion 18650 7.4v 4400mah Sanyo C/ Bms Pcb.** Disponível em: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-3698712130-bateria-li-ion-18650-74v-4400mah-sanyo-c-bms-pcb-_JM. Acesso em: 26 jul. 2025.

MOREIRA, Gabriel dos Santos. **Melhoria de um kit didático de telecomunicações da BIT9 e desenvolvimento de roteiros para ensino experimental de sistemas de comunicação.** 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de Engenharia Elétrica, Tucuruí, 2023.

NETO, Orlando M. A. *et al.* **Plataforma para medição de diagrama de irradiação de antenas na faixa de microondas utilizando Arduino.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS – SBrT, 37., 2019, Petrópolis. Petrópolis: SBrT, 2019.

OJE, Olufunso; ADESOPE, Olusola O.; OJE, Adurangba Victor. **Work in progress: the effects of hands-on learning on STEM students' motivation and self-efficacy: a meta-analysis.** American Society for Engineering Education, 2021.

ORLANDO NETO, M. A.; MOTA, V. L. G.; MAGRI, V. P. R.; FERREIRA, T. N.; MATOS, L. J.; CASTELLANOS, P. V. G. **Plataforma para medição de diagrama de irradiação de antenas na faixa de micro-ondas utilizando Arduino.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS (SBrT), 37., 2019, Petrópolis. Petrópolis: SBrT, 2019.

PADRISA, Pol. **WiFi: Tipos de antena - Buenas prácticas - Capítulo 5.** Sysadmit, 23 jun. 2016. Disponível em: <https://www.sysadmit.com/2016/06/wifi-tipos-de-antena-buenas-practicas-capitulo-5.html>. Acesso em: 29 jun. 2025.

PINTO, F. B. F.; LEÃO, P. A. B.; S. JR., A. C. **Posicionador de Antenas Automatizado de Baixo Custo para Medições de Diagramas de Radiação.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS (SBrT), 41., 2023, São José dos Campos. São José dos Campos: SBrT, 2023.

PISCLED. **Módulo Conversor Tensão 5a XI4005 Step Down.** Disponível em: <https://www.piscled.com.br/modulo-conversor-tensao-5a-xl4005-step-down>. Acesso em: 26 jul. 2025.

PROESI. **Voltímetro Digital Vermelho 2 Fios com Leitura de 4,5 a 30 Vcc.** Disponível em: <https://www.proesi.com.br/voltmetro-digital-vermelho-3-fios-com-leitura-de-4-5-a-30-vcc>. Acesso em: 26 jul. 2025.

QUINTINO, L. F.; SANTOS, V. J. S.; COELHO JUNIOR, E. M.; ANDRADE, A. A. **Kit didático de baixo custo para práticas interdisciplinares em cursos de Engenharia Eletrônica**. Principia, n. 34, p. 124-131, 2017.

RAPPAPORT, Theodore S. **Wireless communications: principles and practice**. 2. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 2002.

ROBOCORE. **Teclado matricial de membrana 16 teclas**. Disponível em: <https://www.robocore.net/botao-chave/teclado-matricial-de-membrana-16-teclas>. Acesso em: 20 jul. 2025.

SARAVATI. **Sensor de ângulo magnético potenciômetro AS5600 alta precisão efeito Hall**. Disponível em: <https://www.saravati.com.br/sensor-de-angulo-magnetico-potenciometro-as5600-alta-precisao-efeito-hall.html>. Acesso em: 20 jul. 2025.

SKLAR, Bernard. **Digital communications: fundamentals and applications**. 2. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 2001.

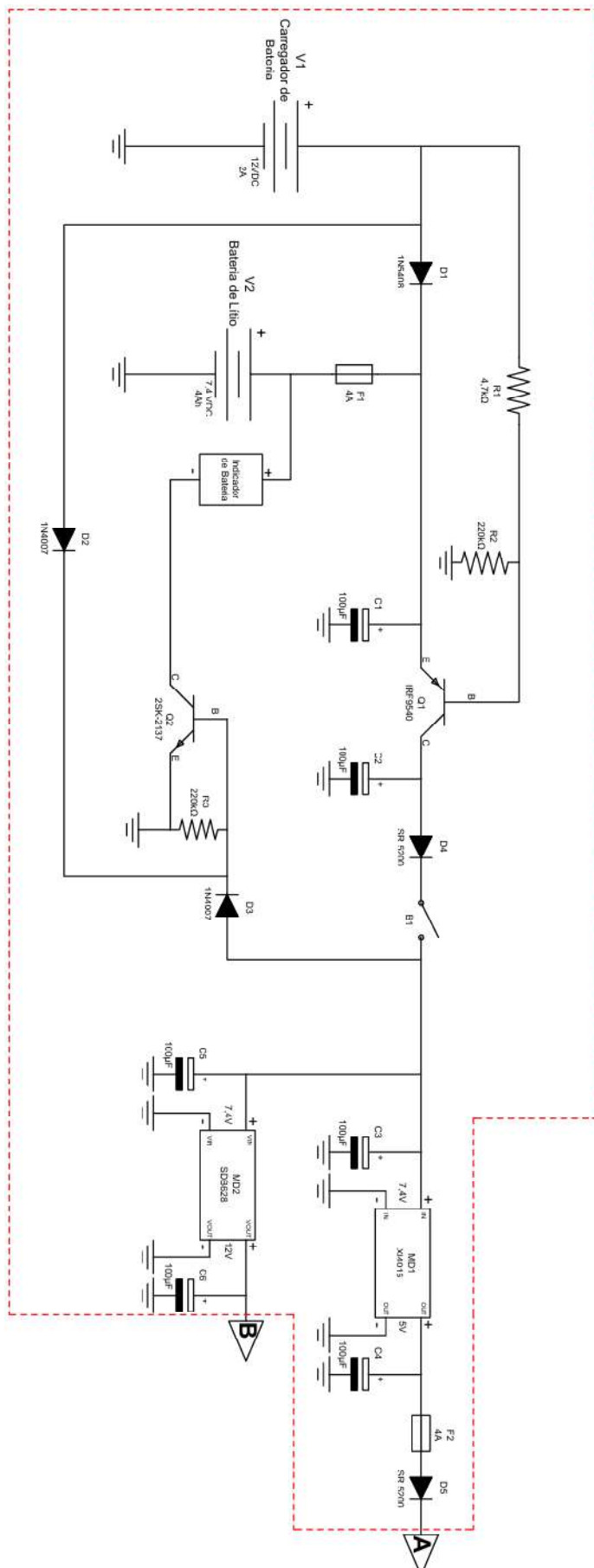
TAWK, Youssef; CONSTANTINE, Joseph; CHRISTODOULOU, Christos G. **Antenna design for cognitive radio**. Boston: Artech House, 2016.

TREVISAN, Gabriel André de Melo. **Antenas inteligentes**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações) – Campus Experimental de São João da Boa Vista, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", São João da Boa Vista, 2011. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/cd7236a4-8534-44c1-ad88-c38e9b58159e/content> . Acesso em: 7 nov. 2025.

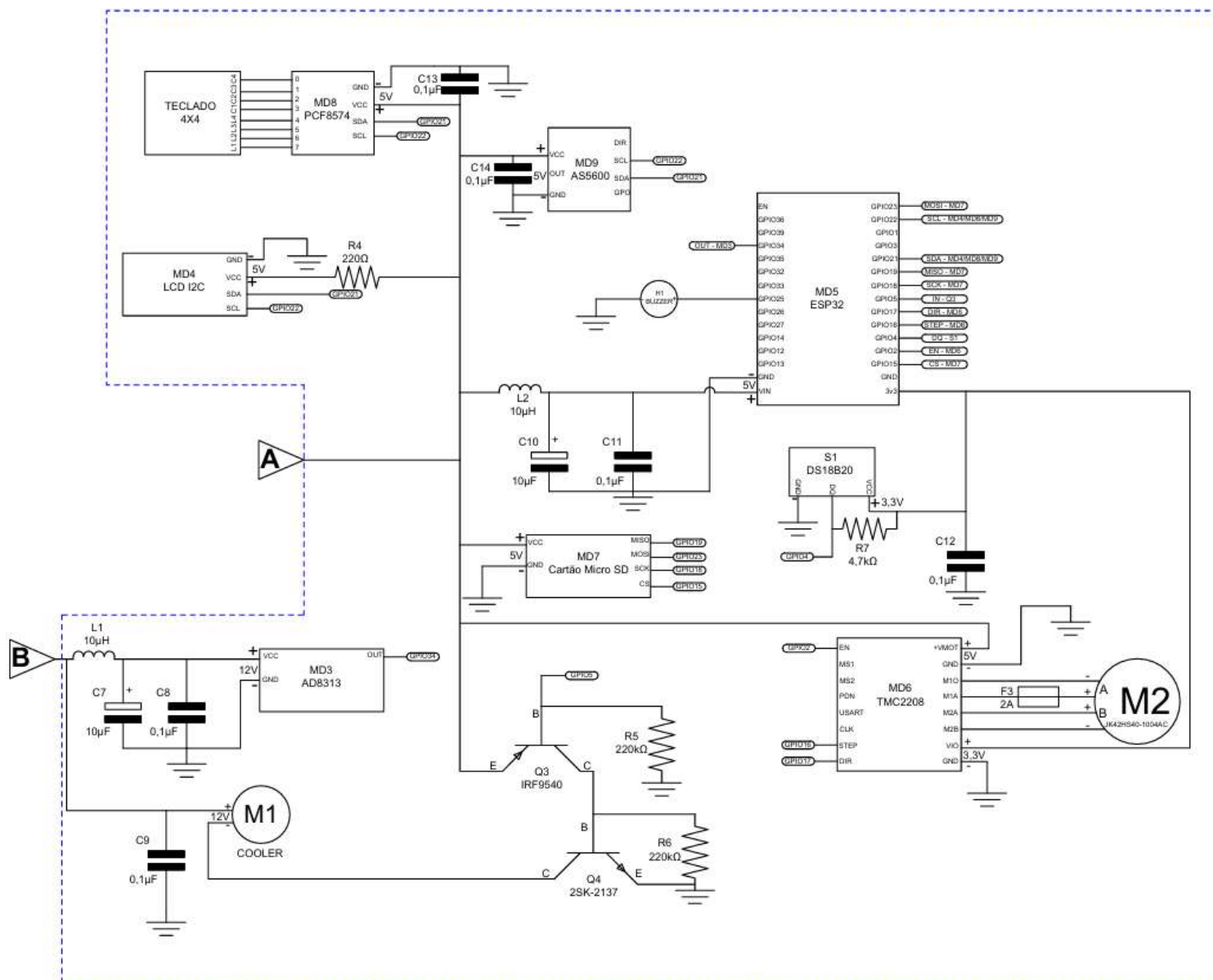
USINAINFO. **Buzzer ativo 3v bip contínuo pci 12mm**. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/buzzer/buzzer-ativo-3v-bip-continuo-pci-12mm-7103.html>. Acesso em: 25 jul. 2025.

WILSON, James. **Introduction to ESP32 – Pinout, Datasheet, Features & Applications**. The Engineering Projects, 10 dez. 2020. Disponível em: <https://www.theengineeringprojects.com/2020/12/esp32-pinout-datasheet-features-applications.html>. Acesso em: 26 jul. 2025.

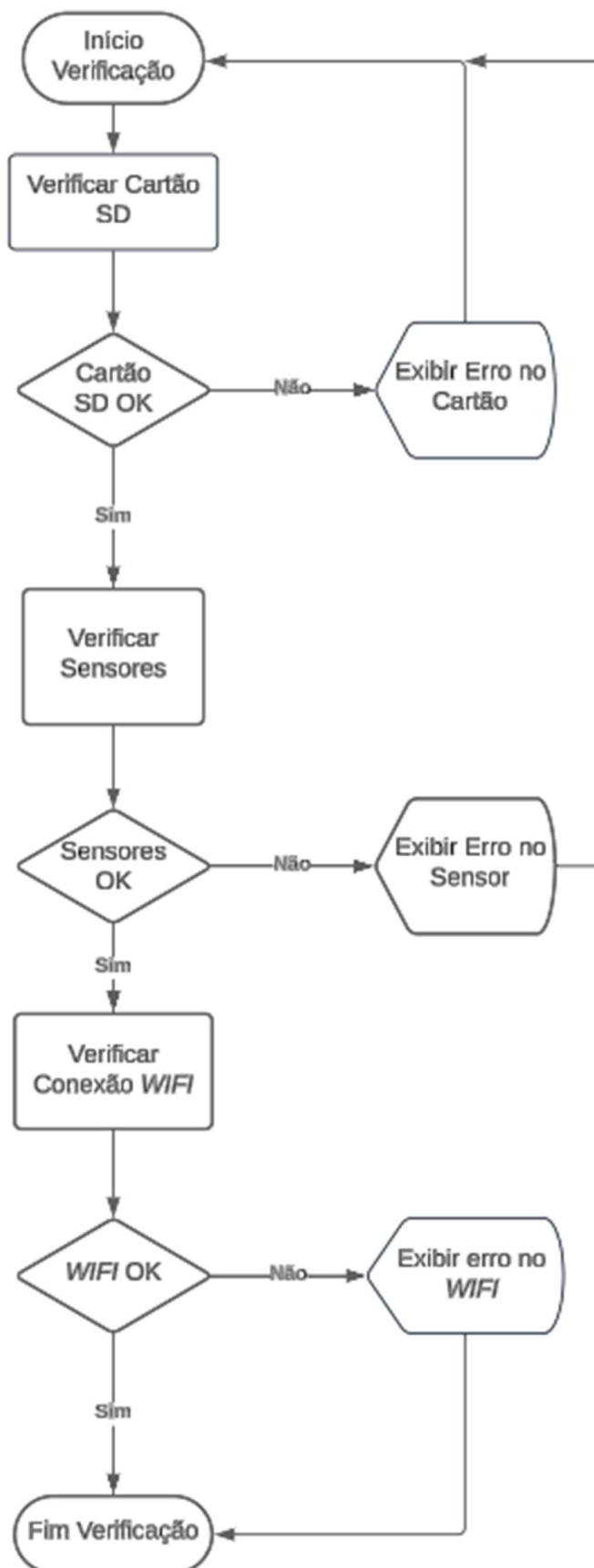
APÊNDICE A – Circuito de Alimentação Projetado



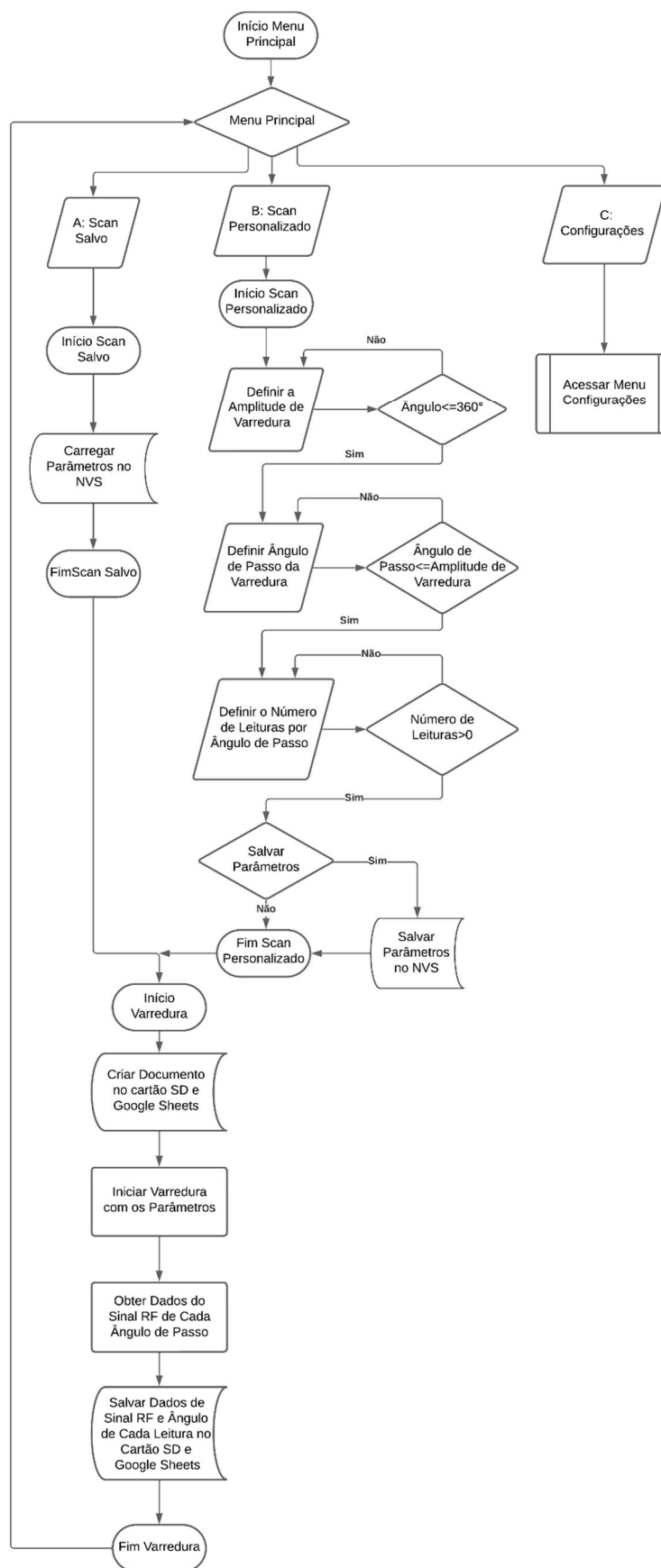
APÊNDICE B – Circuito de Controle Projetado



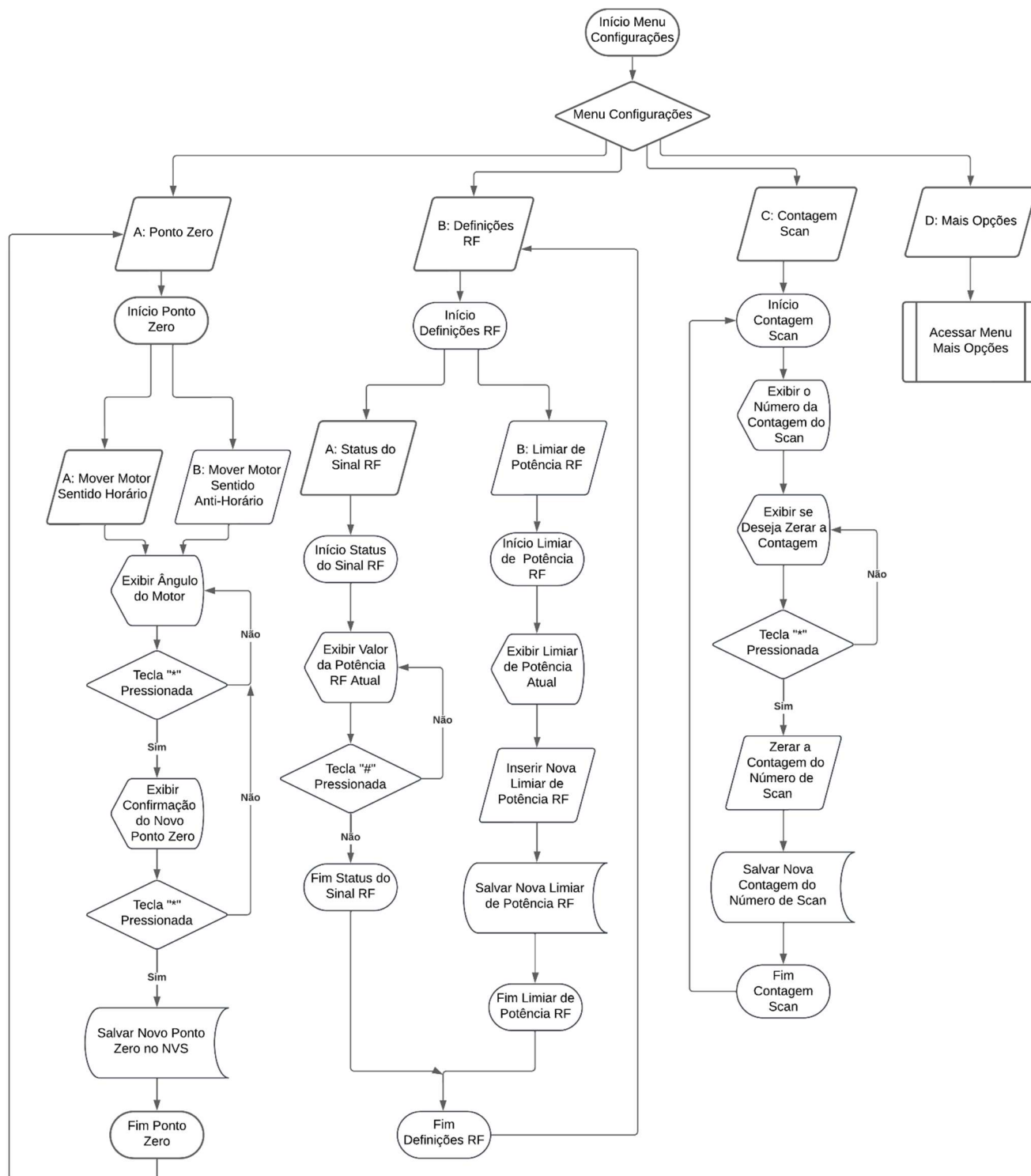
APÊNDICE C – Fluxograma Verificação Inicial



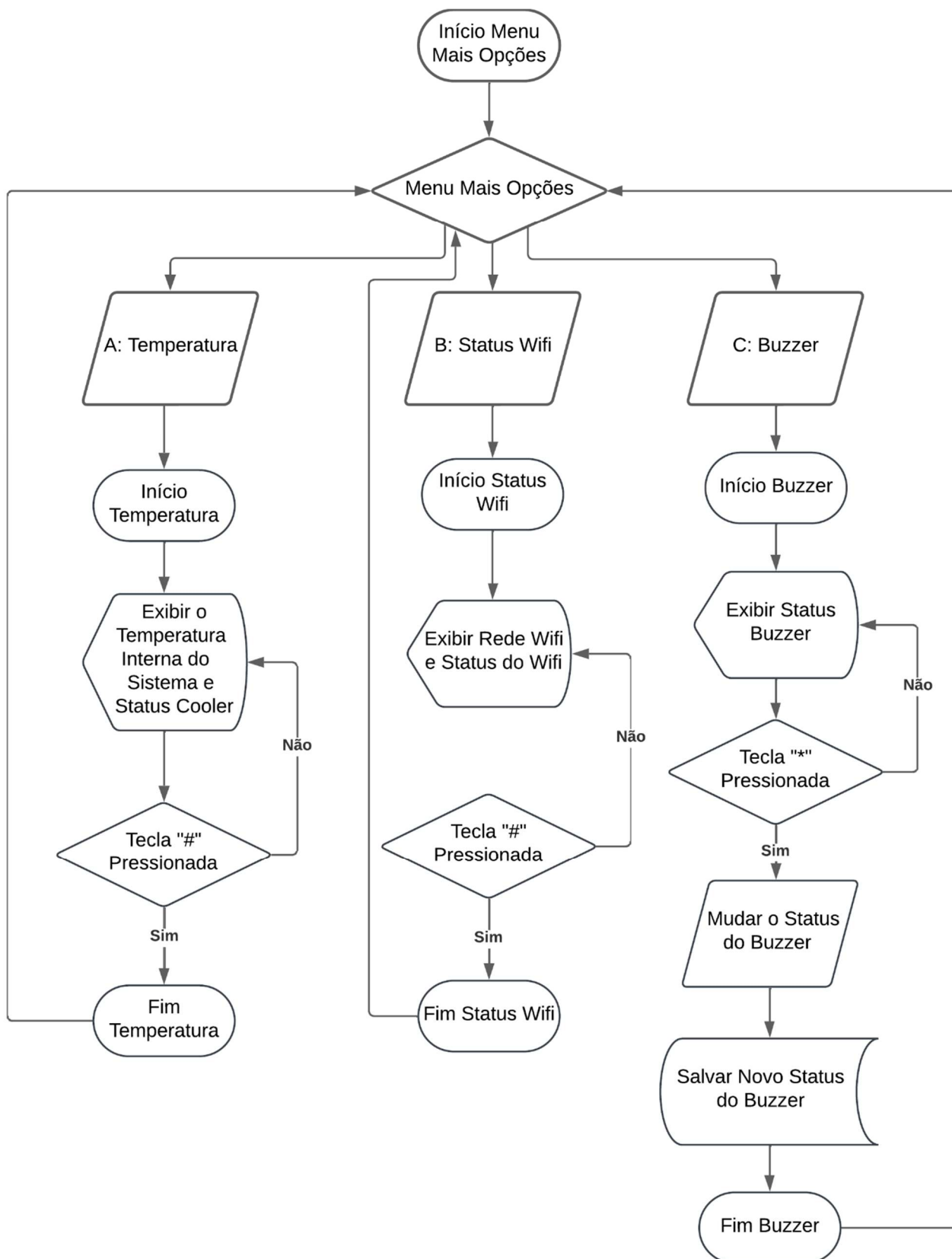
APÊNDICE D – Fluxograma Menu Inicial

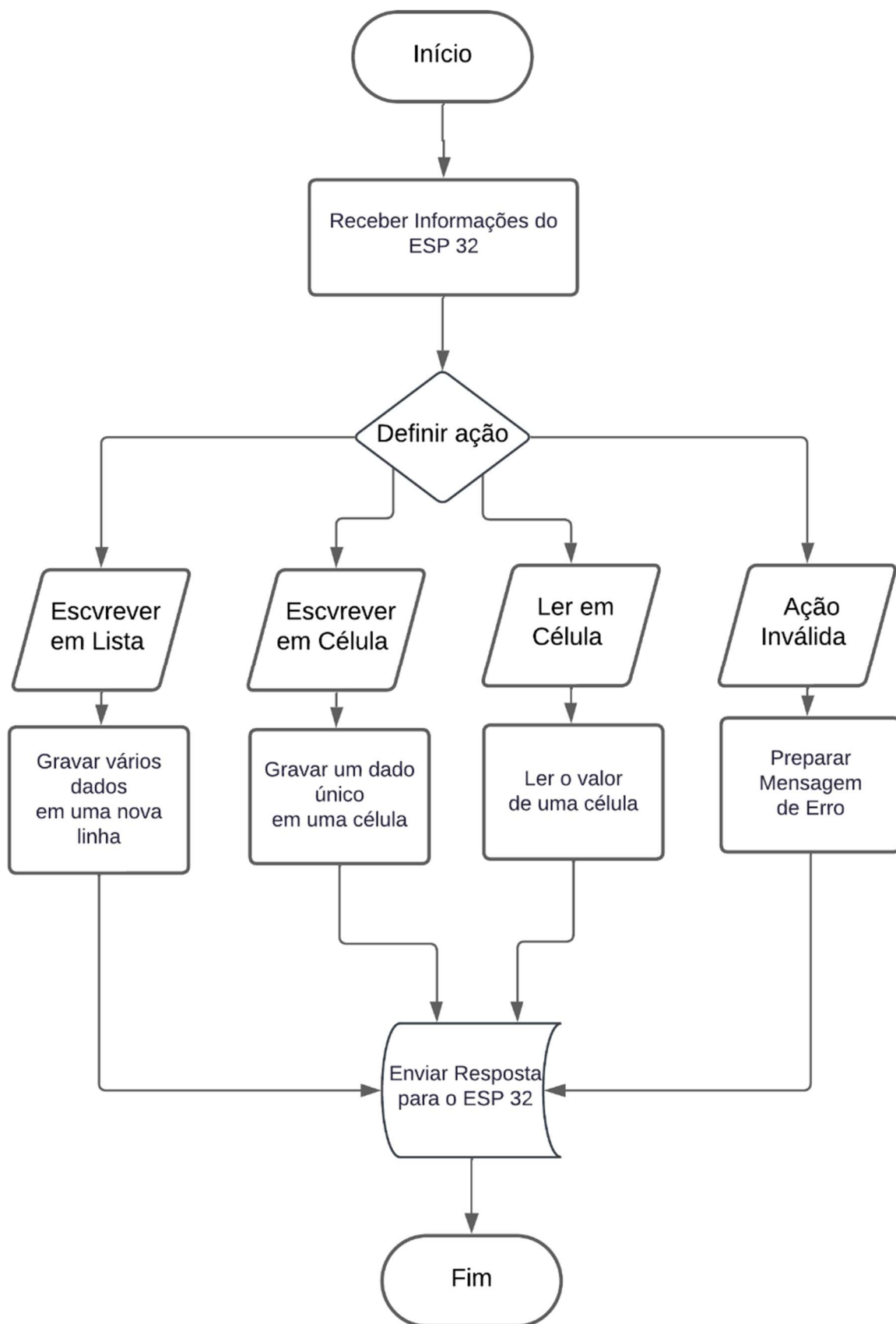


APÊNDICE E – Fluxograma Menu Configurações



APÊNDICE F – Fluxograma Menu Mais Configurações



APÊNDICE G – Fluxograma Código *Apps Script*

APÊNDICE H – Código Implementado no *Apps Script*

```
function doPost(e) { // Define a função principal 'doPost'.
  var sheet = SpreadsheetApp.getActiveSpreadsheet(); // Obtém uma referência à
  planilha ativa do Google Sheets onde o script está vinculado.
  var params = JSON.parse(e.postData.contents); // Analisa o conteúdo JSON do
  corpo da requisição POST (enviado pelo ESP32) e o converte em um objeto
  JavaScript.
  var action = params.action; // Extrai o valor da propriedade 'action' do objeto
  'params', que indica qual operação o ESP32 deseja realizar.

  if (action === "escreverEmLista") { // Verifica se a ação solicitada é
  "escreverEmLista".
    return escreverEmLista(sheet, params); // Se for, chama a função
  'escreverEmLista' para processar a requisição.
  } else if (action === "escreverEmCelula") { // Caso contrário, verifica se a ação é
  "escreverEmCelula".
    return escreverEmCelula(sheet, params); // Se for, chama a função
  'escreverEmCelula'.
  } else if (action === "lerCelula") { // Caso contrário, verifica se a ação é "lerCelula".
    return lerCelula(sheet, params); // Se for, chama a função 'lerCelula'.
  } else if (action === "lerLinha") { // Caso contrário, verifica se a ação é "lerLinha".
    return lerLinha(sheet, params); // Se for, chama a função 'lerLinha'.
  } else { // Se nenhuma das ações anteriores corresponder.
    return ContentService.createTextOutput("Ação não reconhecida"); // Retorna uma
  mensagem de erro indicando que a ação não foi reconhecida.
  }
}
```

```
function escreverEmLista(sheet, params) { // Define a função 'escreverEmLista',
  responsável por adicionar uma nova linha de dados à planilha.
  var identificacao = params.identificacao; // Extrai o nome da aba (identificação) do
  objeto 'params'.
  var dados = params.dados; // Extrai o array de dados a serem escritos (dados) do
```

objeto 'params'.

```

var aba = sheet.getSheetByName(identificacao) || sheet.insertSheet(identificacao);
// Tenta obter a aba pelo nome; se não existir, cria uma nova aba com esse nome.
var ultimaLinha = aba.getLastRow() + 1; // Calcula o número da próxima linha vazia
na aba para onde os dados serão escritos.

// O ESP32 enviará todos os itens de dados (Data, Hora, Angulo, Potencia RF)
// Então, simplesmente escrevemos os dados recebidos a partir da coluna 1.
for (var i = 0; i < dados.length; i++) { // Inicia um loop que itera sobre cada item no
array 'dados'.
    aba.getRange(ultimaLinha, i + 1).setValue(dados[i]); // Escreve o item de dado
atual na célula correspondente da 'ultimaLinha', começando da coluna 1.
}

return ContentService.createTextOutput("Dados salvos com sucesso"); // Retorna
uma mensagem de sucesso após a escrita dos dados.
}

```

```

function escreverEmCelula(sheet, params) { // Define a função 'escreverEmCelula',
que escreve um único dado em uma célula específica.
    var identificacao = params.identificacao; // Extrai o nome da aba (identificação) do
objeto 'params'.
    var celula = params.celula; // Extrai a referência da célula (ex: "A1") do objeto
'params'.
    var dado = params.dado; // Extrai o dado a ser escrito do objeto 'params'.
    var aba = sheet.getSheetByName(identificacao) || sheet.insertSheet(identificacao);
// Tenta obter a aba pelo nome; se não existir, cria uma nova aba.

    aba.getRange(celula).setValue(dado); // Obtém a referência da célula especificada
e define seu valor com o 'dado' fornecido.
    return ContentService.createTextOutput("Dado salvo na célula " + celula); //
Retorna uma mensagem de sucesso, confirmando a célula onde o dado foi salvo.
}

```

```
function lerCelula(sheet, params) { // Define a função 'lerCelula', que lê o valor de
uma célula específica.
    var identificacao = params.identificacao; // Extrai o nome da aba (identificação) do
objeto 'params'.
    var celula = params.celula; // Extrai a referência da célula a ser lida do objeto
'params'.
    var aba = sheet.getSheetByName(identificacao); // Tenta obter a aba pelo nome.

    if (!aba) { // Verifica se a aba foi encontrada.
        return ContentService.createTextOutput("Aba não encontrada"); // Se a aba não
existir, retorna uma mensagem de erro.
    }

    var valor = aba.getRange(celula).getValue(); // Obtém a referência da célula e lê
seu valor.
    return ContentService.createTextOutput(valor); // Retorna o valor lido da célula
como uma saída de texto.
}
```

APÊNDICE I – Configuração Ensaios Práticos

Ensaio	Objetivo	Antena Receptora	Plano	Distância (Padrão: 50cm)	Nº de Amostras (Padrão: 30)	Passo Angular (Padrão: 5°)
1	Comparação dos tipos de antenas	Quase-Yagi-Uda	H	Padrão	Padrão	Padrão
		Dipolo	H			
2	Comparação dos planos de medição	Dipolo	H	Padrão	Padrão	Padrão
		Dipolo	E			
3	Análise do efeito da distância	Quase-Yagi-Uda	H	Padrão	Padrão	Padrão
		Quase-Yagi-Uda	H	100 cm	Padrão	Padrão
4	Análise do efeito das amostras	Quase-Yagi-Uda	H	Padrão	Padrão	Padrão
		Quase-Yagi-Uda	H	Padrão	15	Padrão
5	Análise do efeito do passo	Quase-Yagi-Uda	H	Padrão	Padrão	Padrão
		Quase-Yagi-Uda	H	Padrão	Padrão	1°

APÊNDICE J – Tabela de Componentes e Custos

ITEM	QUANTIDADE	VALOR UNITÁRIO	TOTAL
Caixa Plástica Sistema Geral	1	R\$ 129,61	R\$ 129,61
Caixa Plástica Detector de Potência	1	R\$ 35,38	R\$ 35,38
Haste PVC	1	R\$ 12,50	R\$ 12,50
Luva de PVC	1	R\$ 2,50	R\$ 2,50
Teclado Matricial de Membrana 4x4	1	R\$ 19,76	R\$ 19,76
Módulo Expansor I2C PCF8574	1	R\$ 9,90	R\$ 9,90
Display LCD 16x2 com I2C	1	R\$ 35,80	R\$ 35,80
Voltímetro Digital	1	R\$ 20,97	R\$ 20,97
Cooler 12V	1	R\$ 23,50	R\$ 23,50
Fonte de Alimentação 12V	1	R\$ 10,80	R\$ 10,80
Interruptor ON/OFF	1	R\$ 2,92	R\$ 2,92
Bateria de Íon-Lítio 7,4V 4400mAh	1	R\$ 71,90	R\$ 71,90
Motor de Passo Nema 17	1	R\$ 69,90	R\$ 69,90
Sensor Angular AS5600	1	R\$ 25,20	R\$ 25,20
Módulo Cartão MicroSD	1	R\$ 19,00	R\$ 19,00
Microcontrolador ESP32	1	R\$ 35,00	R\$ 35,00
Módulo Detector de Potência de Radiofrequência AD8313	1	R\$ 71,00	R\$ 71,00
Módulo Regulador de Tensão <i>Step Down</i> XL4015	1	R\$ 12,00	R\$ 12,00
Módulo Regulador de Tensão <i>Step Up</i> MT3608	1	R\$ 3,40	R\$ 3,40
Sensor de Temperatura DS18B20	1	R\$ 3,40	R\$ 3,40
Driver Motor de Passo TMC2208	1	R\$ 39,90	R\$ 39,90
Placa de Circuito Impresso	2	R\$ 20,50	R\$ 41,00
Bornes de Conexão	25	R\$ 0,70	R\$ 17,50
Porta Fusível	2	R\$ 1,09	R\$ 2,18
Fusível de Vidro Com Areia Retardo 4A	2	R\$ 2,43	R\$ 4,86
Fusível Térmico Quadrado 130 graus 2A	1	R\$ 3,02	R\$ 3,02
Transistor Tipo P	2	R\$ 5,73	R\$ 11,46
Transistor Tipo N	2	R\$ 5,73	R\$ 11,46
Indutor Axial 100µH	2	R\$ 0,85	R\$ 1,70
Diodo SR 200	2	R\$ 3,08	R\$ 6,16
Diodo 1N4008	1	R\$ 1,05	R\$ 1,05
Diodo 1N4007	2	R\$ 0,24	R\$ 0,48
Capacitor Eletrolítico 100µF 16V	6	R\$ 0,39	R\$ 2,34
Capacitor Eletrolítico 10µF 100V	2	R\$ 0,51	R\$ 1,02
Capacitor Cerâmico 0,1µF 50V	6	R\$ 0,29	R\$ 1,74
Resistor 220Ω 1/4W	1	R\$ 0,09	R\$ 0,09
Resistor 4,7KΩ 1W	2	R\$ 0,34	R\$ 0,68
Resistor 220KΩ 1W	4	R\$ 0,29	R\$ 1,16
Cabos	1	R\$ 35,50	R\$ 35,50
TOTAL:			R\$ 794,72