

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JOÃO VITOR GALDINO SOUTO ALVARES

DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UMA MICRO-PCI IOT DE
BAIXO CONSUMO ENERGÉTICO E MULTICONECTIVIDADE PARA
REDES HETEROGÊNEAS

CURITIBA
2025

JOÃO VITOR GALDINO SOUTO ALVARES

DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UMA MICRO-PCI IOT DE
BAIXO CONSUMO ENERGÉTICO E MULTICONECTIVIDADE PARA
REDES HETEROGÊNEAS

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica em Engenharia Elétrica do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: André Augusto Mariano, Ph.D.

Coorientador: Bernardo Rego Barros de Almeida Leite, Ph.D.

CURITIBA
2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Alvares, João Vitor Galdino Souto

Desenvolvimento e análise de uma micro-PCI IoT de baixo consumo energético e multiconectividade para redes heterogêneas / João Vitor Galdino Souto Alvares. – Curitiba, 2024.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Dissertação) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: André Augusto Mariano

Coorientador: Bernardo Rego Barros de Almeida Leite

1. Conectividade (Computadores). 2. Antenas (Eletrônica). 3. Sistemas WiFi. 4. Internet das Coisas. 5. Circuitos eletrônicos. 6. Tecnologia bluetooth. 7. Sistemas de comunicação. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Mariano, André Augusto. IV. Leite, Bernardo Rego Barros de Almeida. V. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **JOÃO VITOR GALDINO SOUTO ALVARES** intitulada: **DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UMA MICRO-PCI IOT DE BAIXO CONSUMO ENERGÉTICO E MULTICONECTIVIDADE PARA REDES HETEROGÊNEAS**, sob orientação do Prof. Dr. ANDRÉ AUGUSTO MARIANO, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 19 de Dezembro de 2024.

Assinatura Eletrônica

23/12/2024 07:57:55.0

ANDRÉ AUGUSTO MARIANO

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

20/12/2024 17:37:44.0

LUIS SCHUARTZ

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

20/12/2024 16:38:11.0

GLAUBER GOMES DE OLIVEIRA BRANTE

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)

RESUMO

Esta dissertação apresenta o desenvolvimento e análise de uma solução inovadora para transceptores IoT de baixo consumo energético com foco na multiconectividade, materializada no projeto de uma micro-PCI compacta de 30 mm x 20 mm, que integra o microcontrolador ESP32-D0WD e o transceptor LoRa SX1276, juntamente com antenas otimizadas para operação em WiFi (2,4 GHz), *Bluetooth Low Energy* (BLE) e LoRa (915 MHz). O dispositivo foi projetado para atender à crescente demanda por eficiência energética, conectividade diversificada e integração simplificada, alcançando um consumo médio de apenas 0,5 W em modo ativo e sendo ideal para aplicações IoT que exigem baixo custo e alto desempenho. O processo de desenvolvimento envolveu o uso de ferramentas avançadas como o *OrCAD* e o *Sigrity Aurora* para simulação e análise de integridade de sinal, destacando-se os estudos de acoplamento eletromagnético, que identificaram coeficientes de até 28,4% entre trilhas paralelas. Para mitigar interferências e preservar a integridade dos sinais, foram propostas soluções baseadas em espaçamentos mínimos de 1 mm e a inclusão de vias de blindagem, garantindo robustez contra ruídos em ambientes adversos.

Palavras-chave: IoT; Multiconectividade; Baixo Consumo; Antena Integrada; Micro-PCI; WiFi; BLE; LoRa.

ABSTRACT

This dissertation presents the development and analysis of an innovative solution for low-power IoT transceivers with a focus on multiconnectivity, materialized in the design of a compact 30 mm x 20 mm micro-PCB, which integrates the ESP32-D0WD microcontroller and the LoRa SX1276 transceiver, along with antennas optimized for operation in WiFi (2.4 GHz), Bluetooth Low Energy (BLE), and LoRa (915 MHz). The device was designed to meet the growing demand for energy efficiency, diversified connectivity, and simplified integration, achieving an average consumption of only 0.5 W in active mode and being ideal for IoT applications that require low cost and high performance. The development process involved the use of advanced tools such as OrCAD and Sigriy Aurora for simulation and signal integrity analysis, highlighting the electromagnetic coupling studies, which identified coefficients of up to 28.4% between parallel tracks. To mitigate interference and preserve signal integrity, solutions were proposed based on minimum spacings of 1 mm and the inclusion of shielding paths, ensuring robustness against noise in adverse environments.

Keywords: IoT; Multiconnectivity; Low Consumption; Integrated Antenna; Micro-PCI; WiFi; BLE; LoRa.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparação entre tecnologias sem fio, destacando a relação entre a largura de banda necessária para transmissão e o alcance alcançado (Grupo de Teleinformática e Automação - GTA/UFRJ, 2018).	15
Figura 2 – Arquitetura da rede LoRaWAN (CUNHA; AL., 2020).	24
Figura 3 – A camada física LoRa com modulação de espectro espalhado (TARANOVICH, 2016).	25
Figura 4 – Rede de casamento entre uma carga e uma linha de transmissão (SILVA, 2020).	31
Figura 5 – Casamento de impedância de uma fonte para uma carga (SILVA, 2020).	33
Figura 6 – Tipos de filtro para casamento de impedância (SHIRVANI; WOOLEY, 2003).	35
Figura 7 – Etapas da metodologia do projeto de pesquisa (O Autor, 2024).	38
Figura 8 – Diagrama de blocos do projeto da micro-PCI IoT (O Autor, 2024).	40
Figura 9 – Esquemático do transceptor LoRa SX1276.	44
Figura 10 – Esquemático do transceptor LoRa SX1276 para alta frequência (O Autor, 2024).	45
Figura 11 – Seleção dos quatro estágios principais para a transmissão (O Autor, 2024).	45
Figura 12 – Esquemático ESP32-D0WD. Fonte: Adaptado de (CORPORATION, 2023)	48
Figura 13 – Esquemático ESP32-D0WD.	50
Figura 14 – Calculador de impedância online (Electronics Tutorials, 2024)	51
Figura 15 – Resultado do calculador de impedância online com os componentes passivos (Electronics Tutorials, 2024)	51
Figura 16 – Gráfico das componentes real e imaginária da impedância em função da frequência (em GHz) (Electronics Tutorials, 2024)	52
Figura 17 – Gráfico da magnitude da impedância em função da frequência (em GHz) (Electronics Tutorials, 2024)	53

Figura 18 – Gráfico da fase da impedância em função da frequência (em GHz) (Electronics Tutorials, 2024)	54
Figura 19 – Definição da carta de <i>Smith</i> (O Autor, 2024)	55
Figura 20 – Circuito do filtro π com os valores definidos (O Autor, 2024)	56
Figura 21 – Resultado final do casamento de impedância (O Autor, 2024)	56
Figura 22 – <i>Top layer</i> da micro-PCI (O Autor, 2024)	57
Figura 23 – <i>Inner 1</i> da micro-PCI (O Autor, 2024)	58
Figura 24 – <i>Inner 2</i> da micro-PCI (O Autor, 2024)	59
Figura 25 – <i>Bottom layer</i> da micro-PCI (O Autor, 2024)	60
Figura 26 – Placa de teste <i>Top layer</i> (O Autor, 2024)	61
Figura 27 – Placa de teste <i>Bottom layer</i> (O Autor, 2024)	62
Figura 28 – Módulo final desenvolvido, destacando o microcontrolador e a antena integrada (O Autor, 2024)	63
Figura 29 – Módulo integrado à placa base, exibindo conectores, botões de controle e interface USB-C (O Autor, 2024)	64
Figura 30 – Camada <i>top</i> da micro-PCI, com destaque para regiões críticas de acoplamento (O Autor, 2024)	66
Figura 31 – Primeira camada interna da micro-PCI, evidenciando proximidade entre trilhas de sinal e alimentação (O Autor, 2024)	67
Figura 32 – Segunda camada interna da micro-PCI, mostrando coeficientes de acoplamento moderados (O Autor, 2024)	69
Figura 33 – Camada <i>bottom</i> da micro-PCI, dedicada ao plano de terra (O Autor, 2024)	70
Figura 34 – Configuração experimental com a micro-PCI e a placa de testes em câmara anecóica (O Autor, 2024).	71
Figura 35 – (a) Antena PiFA integrada para WiFi e BLE; (b) Antena externa conectada ao rádio LoRa SX1276 (O Autor, 2024).	72
Figura 36 – Diagrama de radiação no plano horizontal para o protocolo BLE (2,402 GHz) (O Autor, 2024).	72
Figura 37 – Diagrama de radiação no plano vertical para o protocolo BLE (2,402 GHz) (O Autor, 2024).	73
Figura 38 – Diagrama de radiação no plano horizontal para o protocolo WiFi (2,412 GHz) (O Autor, 2024).	73

Figura 39 – Diagrama de radiação no plano vertical para o protocolo WiFi (2,412 GHz) (O Autor, 2024).	74
Figura 40 – Diagrama de radiação no plano horizontal para o protocolo LoRa (915,2 MHz) (O Autor, 2024).	74
Figura 41 – Diagrama de radiação no plano vertical para o protocolo LoRa (915,2 MHz) (O Autor, 2024).	75
Figura 42 – Emissões radiadas do protocolo BLE (2,4 GHz): (a) plano horizontal; (b) plano vertical. As emissões mostram picos consistentes de 60 dB μ V/m, refletindo a eficiência da antena PiFA (O Autor, 2024).	77
Figura 43 – Emissões radiadas do protocolo WiFi (2,412 GHz): (a) plano horizontal; (b) plano vertical. Os picos de 55 dB μ V/m são centrados na faixa de operação, com ruídos mínimos (O Autor, 2024).	77
Figura 44 – Emissões radiadas do protocolo LoRa (915 MHz): (a) plano horizontal; (b) plano vertical. O protocolo se destacou por picos bem definidos em torno de 65 dB μ V/m e uniformidade no espectro (O Autor, 2024).	77
Figura 45 – Analisador de consumo de energia <i>Power Profiler Kit II</i> (ELECTRONICS, 2024).	79

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	12
1.1 Contexto	12
1.2 Tecnologias de IoT	13
1.2.1 LoRa	14
1.2.2 WiFi	15
1.2.3 Bluetooth	15
1.2.4 BLE	16
1.3 Multiconectividade na Internet das Coisas	16
1.4 Objetivo do Trabalho	19
1.5 Estrutura do Trabalho	20
2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1 <i>Wireless Fidelity</i> - WiFi	22
2.2 Long Range - LoRa	23
2.3 <i>Bluetooth Low Energy</i> - BLE	26
2.4 Antena para PCI	27
2.5 Comutador de rádio frequência	29
2.6 Casamento de Impedância em rádio frequência	31
2.6.1 <i>Microstrip</i>	31
2.6.2 <i>Stripline</i>	32
2.6.3 Coaxial	32
3 – METODOLOGIA	36
4 – PROJETO DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO	39
4.1 Desenvolvimento da micro-PCI IoT	39
4.1.1 Características Técnicas Relevantes	39
4.1.2 Diagrama de Blocos	39
4.1.3 Aplicações Potenciais	40
4.2 Escolha do transceptor LoRa	42

4.3	Escolha do transceptor Bluetooth/WiFi	42
4.4	Encapsulamento dos transceptores sem fio	43
4.5	Esquemático do SX1276	43
4.5.1	Projeto de filtro para o SX1276	44
4.5.2	Projeto adaptação de impedância para o SX1276	46
4.5.3	Cristal para o SX1276	47
4.6	Esquemático do ESP32-D0WD	47
4.7	Leiaute da micro-PCI	56
4.8	Placa de desenvolvimento	60
5	– SIMULAÇÕES DE ACOPLAMENTO	65
6	– MEDIDAS	71
6.1	Diagrama de radiação	72
6.2	Emissões radiadas	76
6.3	Consumo de energia	78
7	– CONCLUSÕES	83
	Referências	85

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto

A comunicação sem fio revolucionou a maneira como nos conectamos e interagimos com o mundo ao nosso redor. Nas redes com fio tradicionais, a comunicação sem fio utiliza ondas de rádio, micro-ondas e outras formas de radiação eletromagnética para transmitir dados entre dispositivos sem a necessidade de cabos físicos. Essa tecnologia tem suas raízes nos experimentos de rádio de Nikola Tesla e Guglielmo Marconi no final do século XIX, mas se desenvolveu significativamente com o advento das redes celulares e da internet sem fio.

A evolução da comunicação sem fio tem sido impulsionada pela crescente demanda por mobilidade e conectividade contínua. As redes celulares transformaram radicalmente as telecomunicações, tornando os dispositivos móveis onipresentes e essenciais para a vida cotidiana. Com o advento das redes 4G e, mais recentemente, das redes 5G, houve um salto significativo na velocidade e na capacidade de transmissão de dados. Esse avanço tem viabilizado aplicações inovadoras, como a Internet das Coisas (IoT), veículos autônomos e infraestruturas inteligentes para cidades conectadas (ZHANG et al., 2021). Em suma, a comunicação sem fio não é apenas uma conveniência moderna, mas uma tecnologia fundamental que continua a evoluir e a moldar o futuro das comunicações. Suas aplicações abrangem uma vasta gama de setores, oferecendo novas oportunidades e apresentando desafios que requerem inovação contínua para serem superados (GILLIS, 2023).

O IoT representa uma das evoluções tecnológicas mais impactantes da atualidade, promovendo uma transformação abrangente em setores como indústria, saúde, agricultura, cidades inteligentes e automação residencial. O conceito de IoT envolve a interconexão de dispositivos físicos, veículos, edificações e uma ampla gama de equipamentos que incorporam sensores, software e conectividade, permitindo a coleta, o processamento e a troca de dados em tempo real. Atualmente, estima-se que existam mais de 15 bilhões de dispositivos conectados globalmente, com previsões indicando que esse número pode ultrapassar 29 bilhões até 2030 (DEPARTMENT, 2023). Essa

expansão é impulsionada pelo avanço das redes sem fio, que oferecem maior cobertura, eficiência energética e capacidade de transmissão de dados.

No setor de saúde, a Internet das Coisas continua a demonstrar um grande potencial para melhorar a qualidade do atendimento e a eficiência operacional. Dispositivos conectados podem monitorar sinais vitais dos pacientes, permitindo diagnósticos rápidos e intervenções imediatas (CHATAUT; PHOUMMALAYVANE; AKL, 2023). A aplicação em cidades inteligentes está crescendo, com sensores distribuídos em infraestruturas urbanas para otimizar o uso de recursos, melhorar a segurança pública e aumentar a qualidade de vida dos cidadãos (HASSEBO; TEALAB, 2023; KUYORO S.; AKINSOWON, 2023; GARCIA; KIM, 2023). Na indústria, a viabilização a manufatura inteligente (Indústria 4.0), permitindo o monitoramento remoto de máquinas, a manutenção preditiva e a otimização de processos produtivos, resultando em redução de custos operacionais (LEE; KAO; YANG, 2023).

O crescimento exponencial da IoT também traz desafios, como segurança cibernética, interoperabilidade e privacidade dos dados, exigindo o desenvolvimento de padrões robustos e soluções avançadas de criptografia. No entanto, seu impacto positivo é inegável, moldando um futuro mais eficiente, conectado e inteligente.

1.2 Tecnologias de IoT

A Internet das Coisas depende de uma ampla gama de tecnologias de comunicação para conectar dispositivos e sistemas de maneira eficiente e segura. Entre essas tecnologias estão as redes celulares (como 4G e 5G), que oferecem cobertura ampla e alta velocidade de transmissão de dados, essenciais para aplicações que requerem grande largura de banda e baixa latência (ZHANG; WANG; ZHANG, 2018). Tecnologias como RFID (*Radio Frequency Identification*) e NFC (*Near Field Communication*) são utilizadas para comunicação de curto alcance, sendo amplamente empregadas em sistemas de identificação e pagamento (GUPTA; JAIN; BHATNAGAR, 2017).

Além disso, as redes de comunicação de baixa potência e longo alcance, como LoRa (*Long Range*), são cruciais para aplicações em áreas remotas ou de difícil acesso, permitindo a comunicação eficiente entre dispositivos com baixo consumo de energia (KUYORO S.; AKINSOWON, 2023). O WiFi, por sua vez, é amplamente utilizado em

ambientes internos para conectar dispositivos domésticos inteligentes, oferecendo alta velocidade de transmissão em distâncias moderadas (CHATAUT; PHOUMMALAYVANE; AKL, 2023).

A tecnologia Bluetooth é uma solução sem fio de curto alcance amplamente utilizada para conectar dispositivos como smartphones, acessórios de áudio e dispositivos IoT. Operando na faixa de 2,4 GHz com técnica de salto de frequência, oferece comunicação segura e minimiza interferências. Outra tecnologia fundamental é o *Bluetooth Low Energy* (BLE), que permite a comunicação entre dispositivos com baixo consumo de energia, sendo ideal para *wearables* e dispositivos médicos que exigem conectividade constante e eficiência energética (HASSEBO; TEALAB, 2023).

Tecnologias como Zigbee e Z-Wave, também desempenham um papel importante ao fornecer soluções para redes de sensores em casas inteligentes e automação residencial (KUYORO S.; AKINSOWON, 2023). Zigbee, com seu protocolo baseado no padrão IEEE 802.15.4, é conhecido por sua eficiência energética e robustez em ambientes de alta interferência. Z-Wave, por outro lado, oferece simplicidade de configuração e é amplamente adotado para aplicações de automação residencial devido à sua interoperabilidade com uma ampla gama de dispositivos.

A figura 1 apresenta um comparativo entre as tecnologias sem fio analisadas, evidenciando a relação entre largura de banda e alcance.

1.2.1 LoRa

LoRa é uma tecnologia de comunicação sem fio que utiliza modulação de espalhamento espectral para alcançar longas distâncias com baixo consumo de energia. Esta tecnologia é conhecida por sua capacidade de fornecer cobertura ampla, operando eficientemente em áreas onde outras tecnologias podem ser limitadas. De acordo com (SORNIN et al., 2015), LoRa opera em frequências não licenciadas, o que contribui para uma infraestrutura de baixo custo, tornando-a uma escolha viável para diversas implementações IoT.

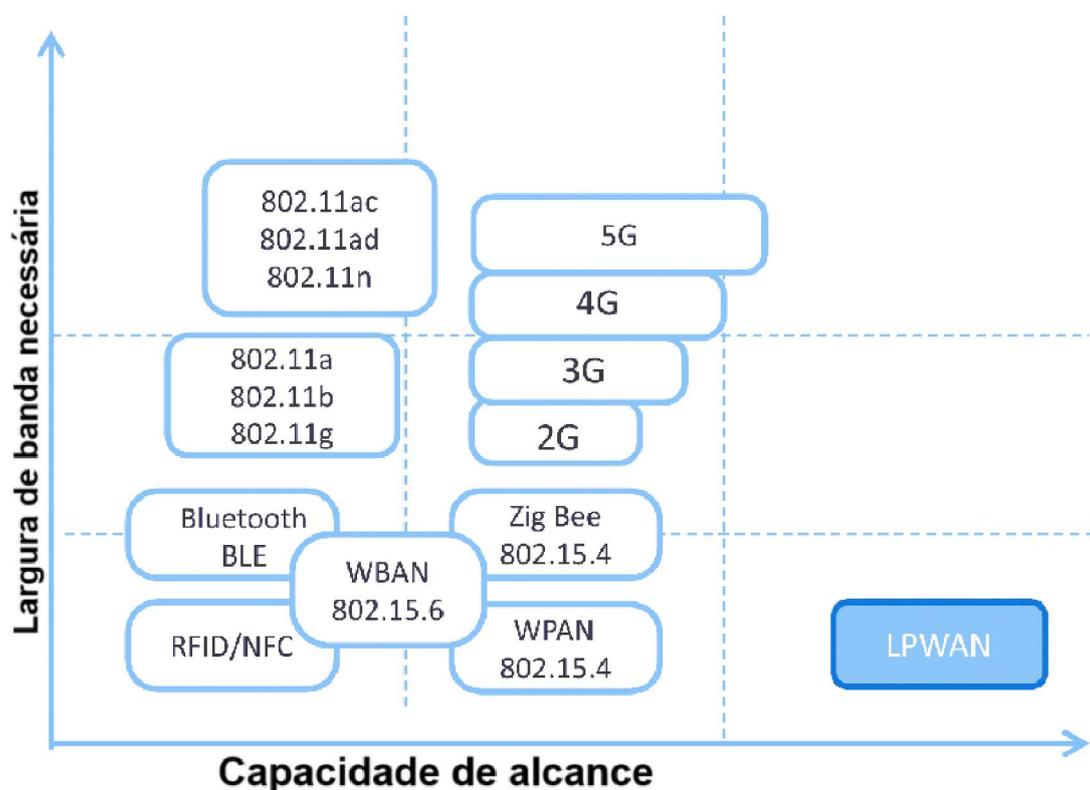


Figura 1 – Comparação entre tecnologias sem fio, destacando a relação entre a largura de banda necessária para transmissão e o alcance alcançado (Grupo de Teleinformática e Automação - GTA/UFRJ, 2018).

1.2.2 WiFi

O WiFi, baseado nos padrões IEEE 802.11, é uma das tecnologias de comunicação mais comuns e amplamente utilizadas na IoT. Ele oferece altas taxas de transmissão de dados, tornando-o adequado para situações que requerem grande largura de banda. (YANG et al., 2018) destacam que, embora o WiFi consuma mais energia em comparação com outras tecnologias IoT, suas melhorias contínuas em eficiência energética e segurança o tornam uma escolha viável para muitas implementações de IoT.

1.2.3 Bluetooth

Bluetooth clássico é uma tecnologia de comunicação sem fio projetada para curto alcance, caracterizada por sua capacidade de transmitir dados em alta velocidade e suportar perfis de áudio e outros tipos de dados. Esse protocolo tem sua habilidade de

conectar múltiplos dispositivos simultaneamente, oferecendo uma comunicação estável e eficiente. Conforme observado por (SMITH, 2023), o Bluetooth clássico permite a transferência de dados entre dispositivos de maneira eficaz, mas consome mais energia em comparação com BLE. No entanto, suas funcionalidades robustas e a capacidade de suportar uma variedade de dispositivos tornam-no uma escolha popular para muitas aplicações (JOHNSON, 2023).

1.2.4 BLE

O BLE é uma variação do padrão Bluetooth convencional projetada para comunicação de curto alcance com baixo consumo de energia. Este protocolo possui sua capacidade de manter a conectividade com consumo de energia muito reduzido. Como observado por (KAMATH; LINDH, 2012), BLE permite a comunicação eficiente entre dispositivos, proporcionando uma longa vida útil da bateria, essencial para dispositivos que operam em ambientes sem acesso fácil à recarga.

1.3 Multiconectividade na Internet das Coisas

A multiconectividade refere-se à capacidade dos dispositivos de utilizar múltiplas formas de comunicação sem fio simultaneamente ou alternadamente, melhorando a confiabilidade, eficiência e cobertura da rede (CHOWN, 2023).

No gerenciamento de rede, a seleção de tecnologia é fundamental. Algoritmos avançados escolhem a melhor tecnologia de comunicação disponível com base em critérios como intensidade de sinal, consumo de energia, custo e largura de banda. O balanceamento de carga distribui o tráfego de dados de maneira equilibrada entre diferentes tecnologias para evitar sobrecarga e maximizar a eficiência da rede (PARTICLE, 2022).

A multiconectividade na Internet das Coisas apresenta desafios técnicos significativos, principalmente na gestão e eficiência energética dos dispositivos. O consumo de energia torna-se um fator crítico, uma vez que a operação simultânea de múltiplos rádios exige estratégias avançadas de otimização para minimizar impactos na autonomia dos dispositivos. Além disso, o aumento da densidade de dispositivos no ambiente gera complexidade na alocação de recursos e no gerenciamento de interferências, deman-

dando protocolos robustos para coordenação eficiente. A variabilidade das tecnologias sem fio, com diferentes padrões de comunicação, frequências e requisitos operacionais, impõe desafios na interoperabilidade e coexistência dos sistemas. A integração dessas redes em ambientes comuns, como infraestruturas industriais, residenciais e urbanas, exige soluções escaláveis e adaptativas para garantir conectividade contínua, segurança e desempenho otimizado (ZHANG; WANG; ZHANG, 2018).

Uma solução compacta de IoT com multiconectividade oferece várias vantagens significativas. Primeiramente, dispositivos compactos e multiconectados podem alternar entre diferentes tecnologias de comunicação para otimizar o consumo de energia. Por exemplo, um dispositivo pode usar BLE para comunicação de curto alcance e WiFi para transferências de dados maiores, economizando energia quando não há necessidade de altas taxas de transferência (LORIOT, 2023; BHATTACHARJEE, 2023).

A capacidade de se conectar a várias redes permite que os dispositivos IoT operem eficientemente em diversos ambientes. Isso é particularmente útil em cenários onde a cobertura de rede pode variar, como em áreas rurais versus urbanas. Dispositivos que suportam LoRa podem se comunicar a longas distâncias em áreas rurais, enquanto o WiFi pode ser utilizado em ambientes urbanos densamente povoados (LORIOT, 2023).

A multiconectividade também proporciona redundância, aumentando a confiabilidade da rede. Se uma forma de comunicação falhar ou estiver indisponível, o dispositivo pode alternar para outra tecnologia disponível, garantindo a continuidade do serviço. Isso é crucial em aplicações críticas, como monitoramento de saúde e segurança pública (BHATTACHARJEE, 2023).

Soluções compactas tendem a ser mais econômicas em termos de produção e implantação. Dispositivos menores requerem menos material e podem ser mais baratos para fabricar. Além disso, a integração de múltiplas tecnologias em um único dispositivo pode reduzir os custos operacionais ao simplificar a infraestrutura de rede necessária (BHATTACHARJEE, 2023).

Os desafios técnicos incluem a miniaturização de *Hardware*, onde a principal limitação é acomodar todos os componentes necessários, como por exemplo sensores, microcontroladores, antenas e baterias, em um espaço físico limitado sem comprometer a funcionalidade. A dissipação de calor é outro desafio, pois dispositivos menores

tendem a ter menos espaço para dissipação, aumentando o risco de superaquecimento e reduzindo a eficiência e a vida útil do dispositivo (GILLIS, 2023).

A conectividade em dispositivos compactos enfrenta desafios como interferência de sinal, devido à proximidade de componentes eletrônicos, o que pode afetar a qualidade da comunicação sem fio. Além disso, a miniaturização pode comprometer o desempenho das antenas, afetando o alcance e a confiabilidade da conexão (BHATTACHARJEE, 2023).

O desempenho e a capacidade de processamento também são limitados. Dispositivos menores podem ter capacidades de processamento restritas, o que pode limitar a execução de algoritmos complexos ou o processamento de grandes volumes de dados localmente. A capacidade limitada de armazenamento pode ser um desafio para aplicações que dependem de acesso rápido a uma grande quantidade de dados históricos ou operam de forma autônoma (LORIOT, 2023).

Nos desafios operacionais, a produção e a escala são afetadas pela complexidade de fabricação. Produzir componentes em escalas menores pode aumentar a complexidade e o custo do processo de produção. Testar e garantir a qualidade de dispositivos menores e mais complexos pode ser mais desafiador e caro (BHATTACHARJEE, 2023).

A manutenção e a durabilidade são preocupações adicionais. Dispositivos menores são frequentemente mais difíceis de reparar ou atualizar devido ao seu *design* compacto e à integração de componentes. Garantir que esses dispositivos pequenos sejam robustos o suficiente para suportar condições operacionais adversas, como variações climáticas e impactos físicos, é essencial (CHOWN, 2023).

O custo de desenvolvimento e de componentes também é uma barreira. O desenvolvimento de soluções compactas pode exigir investimentos significativos em pesquisa e desenvolvimento para superar os desafios técnicos. Componentes miniaturizados especializados podem ser mais caros devido à tecnologia avançada necessária para sua produção (CHOWN, 2023).

A implementação de soluções compactas em IoT exige uma abordagem equilibrada entre tamanho, funcionalidade e desempenho, influenciando diretamente o consumo de energia. Dispositivos menores e mais integrados tendem a consumir menos energia, o que aumenta a eficiência energética e prolonga a vida útil da bateria. A

colaboração entre engenheiros, designers e especialistas em tecnologia é crucial para superar esses desafios e desenvolver dispositivos IoT que atendam às necessidades operacionais, ao mesmo tempo em que se integram de forma harmoniosa em ambientes cada vez mais conectados e inteligentes (LORIOT, 2023).

1.4 Objetivo do Trabalho

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento e a análise de uma micro-PCI (placa de circuito impresso) projetada para transceptores IoT, integrando múltiplas interfaces de comunicação sem fio, como WiFi, BLE e LoRa. A pesquisa utilizou ferramentas de mercado para o desenvolvimento e simulação, avaliando o impacto do *Hardware* na construção e no desempenho dessas tecnologias. A hipótese central é que, ao seguir rigorosamente as diretrizes de design de RF e utilizar técnicas avançadas de roteamento, é possível minimizar interferências e perdas de sinal, mesmo em um espaço reduzido. O diferencial desta abordagem está na otimização simultânea da integridade do sinal e da eficiência energética, permitindo a integração de múltiplos protocolos de comunicação sem comprometer o desempenho. Os testes realizados destacaram o comportamento de cada protocolo de comunicação quando integrado em uma única PCI, bem como os desafios e limitações na interoperabilidade, proporcionando uma visão abrangente sobre os fatores que influenciam o *design* de soluções IoT multiconectadas. Este estudo visa abordar os seguintes pontos:

- **Revisão da Topologia de Rádios**
 - Revisar as topologias de rádios mais comumente utilizadas em dispositivos IoT, com ênfase em soluções que são amplamente disponíveis e de fácil implementação.
- **Definição dos Transceptores de Rádio**
 - Discutir os critérios e o processo de seleção dos transceptores de rádio IoT, visando baixo custo e alta eficiência operacional de comunicação. Alta eficiência refere-se à capacidade de transmitir e receber dados de forma confiável, com baixo consumo de energia, garantindo longa vida útil da bateria e reduzindo a manutenção. A seleção deve considerar consumo de energia, alcance, robustez da conexão e compatibilidade com outros dispositivos do sistema IoT.

- **Projeto do esquema elétrico**
 - Apresentar o esquema elétrico desenvolvido destacando os componentes principais.
- **Projeto do leiaute**
 - Apresentar o leiaute desenvolvido destacando as regras utilizadas para o projeto da PCI .
- **Medições dos Parâmetros das Placas**
 - Aferir as medições dos parâmetros das placas fabricadas e montadas, com foco na avaliação do desempenho e na validação das escolhas de transceptores.

1.5 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado da seguinte forma:

No **Capítulo 1: Introdução**, apresenta-se o contexto e a importância da comunicação sem fio e da Internet das Coisas, destacando os principais objetivos e a motivação para a pesquisa.

No **Capítulo 2: Fundamentação Teórica**, são descritas as principais tecnologias de comunicação utilizadas em IoT, incluindo WiFi, *Bluetooth Low Energy*, LoRa, abordando suas características técnicas, vantagens, desvantagens e as áreas de aplicação mais comuns.

No **Capítulo 3: Metodologia**, são detalhados os métodos e procedimentos utilizados para a realização da pesquisa, incluindo a escolha das ferramentas, técnicas de análise e os critérios de seleção dos transceptores de rádio.

No **Capítulo 4: Projeto de Placa de Circuito Impresso** detalha o processo de projeto e desenvolvimento da PCI que integra múltiplos transceptores IoT, discutindo os critérios de seleção dos componentes, o leiaute da PCI e as técnicas utilizadas para garantir a eficiência e a funcionalidade do sistema.

No **Capítulo 5: Simulações de acoplamento**, são apresentados os resultados das simulações de acoplamento eletromagnético realizadas para avaliar o impacto da proximidade entre trilhas e componentes no desempenho das antenas e dos circuitos de rádio. Essas simulações foram conduzidas para permitir propor melhorias no espaçamento

e no *design* da PCI para mitigar interferências e preservar a integridade do sinal.

No **Capítulo 6: Medidas**, descrevem-se os resultados práticos obtidos com a micro-PCI construída, incluindo medições do desempenho das antenas, análise da eficiência energética e validação da operação independente dos transceptores. Os dados experimentais são comparados com os resultados das simulações, destacando as correlações e discrepâncias observadas.

Finalmente, o **Capítulo 7: Conclusões** apresenta as conclusões do projeto, resumindo os resultados alcançados, as contribuições para a área de IoT e as sugestões para trabalhos futuros, destacando as lições aprendidas e os desafios superados ao longo do desenvolvimento do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 *Wireless Fidelity* - WiFi

A tecnologia WiFi, também conhecida como IEEE 802.11, teve sua origem na década de 1990. Desde então, ela passou por várias atualizações e melhorias para atender à crescente demanda por redes sem fio de alta velocidade e confiabilidade. As principais versões do padrão IEEE 802.11 incluem 802.11b, 802.11a, 802.11g, 802.11n, 802.11ac, e mais recentemente, 802.11ax, também conhecido como WiFi 6 (IEEE Computer Society, 2020).

A arquitetura de rede WiFi é fundamental para a eficiência e desempenho das redes sem fio, baseada em dois componentes principais: o ponto de acesso (*Access Point* - AP) e o cliente (*Client*). O AP atua como um *hub* central que coordena a comunicação entre os dispositivos conectados, enquanto os clientes são dispositivos finais que se conectam ao AP. A comunicação entre APs e clientes ocorre através de frequências de rádio na faixa de 2,4 GHz ou 5 GHz, dependendo da versão do padrão 802.11 (Aruba Networks, 2019).

Existem várias configurações principais de arquiteturas de rede WiFi, cada uma com suas características e aplicações específicas. Na arquitetura de infraestrutura, dispositivos se conectam a um AP central, facilitando a gestão e segurança da rede. Essa configuração é comum em ambientes domésticos e empresariais, mas depende da funcionalidade contínua do AP (JOHNSON, 2023).

Em redes *ad hoc*, dispositivos se comunicam diretamente entre si, sem um AP central. Esta configuração é adequada para redes temporárias ou em áreas sem infraestrutura, embora possa enfrentar desafios de escalabilidade (SMITH, 2023). Redes *mesh* utilizam múltiplos APs interconectados, oferecendo ampla cobertura e resiliência a falhas. Essa arquitetura é adequada para grandes áreas e ambientes dinâmicos (LIU, 2023).

WiFi *Direct* permite conexões diretas entre dispositivos sem a necessidade de um AP. É útil para compartilhamento de arquivos e conexões *peer-to-peer* em situações

onde a infraestrutura é limitada (ZHANG, 2023). *Hotspot 2.0*, ou *Passpoint*, facilita a conexão automática e segura a redes WiFi, similar à autenticação em redes celulares, melhorando a experiência do usuário e a segurança (JOHNSON, 2023).

As técnicas de modulação utilizadas no WiFi evoluíram ao longo das diferentes versões do padrão IEEE 802.11. As primeiras versões, como 802.11b, utilizavam DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*), enquanto as versões posteriores, como 802.11a/g, passaram a utilizar OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). O WiFi 6 (802.11ax) introduziu a modulação OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), que melhora a eficiência espectral e reduz a latência (WANG; LIU; ZHANG, 2018).

A modulação DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) utilizada no 802.11b espalha o sinal em uma largura de banda mais ampla do que o necessário, permitindo maior resistência a interferências. Já a modulação OFDM utilizada nas versões 802.11a/g divide o canal em subportadoras ortogonais, aumentando a eficiência espectral.

Apesar dos avanços, a tecnologia WiFi ainda enfrenta desafios, como a gestão de interferências em ambientes densos e a necessidade de maior largura de banda para suportar aplicações de alta demanda. O desenvolvimento do WiFi 7 (802.11be), que promete velocidades superiores a 30 Gbps e melhorias em termos de latência e eficiência, é uma das tendências futuras que buscam abordar esses desafios (JONES; SMITH, 2022).

2.2 Long Range - LoRa

A tecnologia LoRa, desenvolvida pela Semtech Corporation, utiliza a modulação de espalhamento espectral Chirp (CSS) para proporcionar comunicação de longo alcance com baixo consumo de energia. Desde sua introdução, tem sido amplamente adotada em redes IoT para aplicações que exigem conectividade eficiente em grandes áreas. A LoRa Alliance, criada para padronizar e promover a interoperabilidade da tecnologia LoRaWAN, desempenha um papel fundamental na sua expansão e na garantia da compatibilidade entre dispositivos e redes (Semtech Corporation, 2024; LoRa Alliance, 2024).

A arquitetura de uma rede LoRa é composta por quatro componentes principais:

os nós finais (*End Nodes*), os gateways, o servidor de rede e o servidor de aplicação, como mostra a figura 2. A comunicação entre os nós finais e os *Gateways* ocorre em bandas ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), como 868 MHz na Europa e 915 MHz nas Américas. A estrutura básica pode ser descrita como:

1. **Nós Finais (End Nodes):** Dispositivos que coletam e transmitem dados.
2. **Gateways:** Pontos de acesso que retransmitem os dados dos nós finais para o servidor de rede.
3. **Servidor de Rede:** Gerencia a rede, executa o roteamento de pacotes e a deduplicação de mensagens.
4. **Servidor de Aplicação:** Processa os dados recebidos e executa as funções de aplicação específicas (AUGUSTIN et al., 2016).

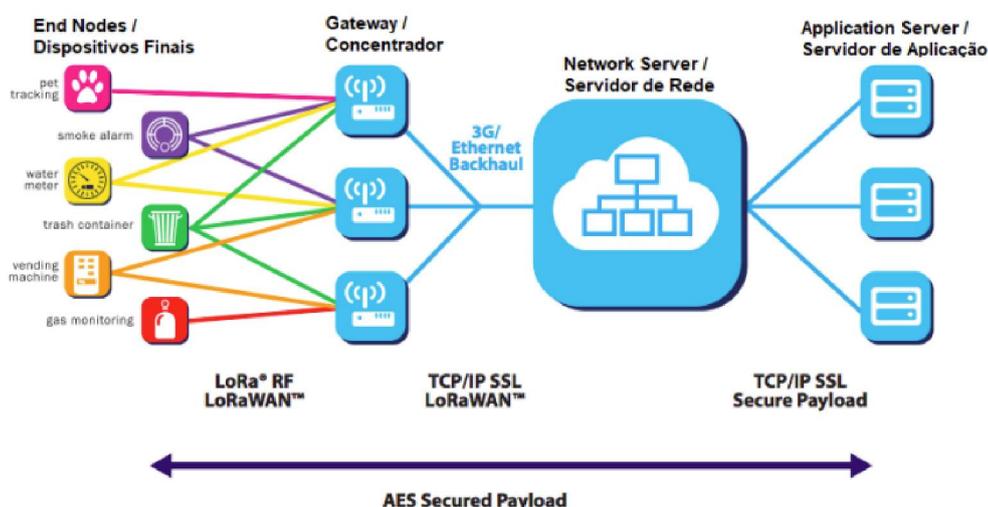


Figura 2 – Arquitetura da rede LoRaWAN (CUNHA; AL., 2020).

A Figura 3 ilustra o princípio da modulação por CSS utilizada na camada física do LoRa. Esse método codifica o sinal base por meio de uma sequência de código com frequência mais alta, ampliando deliberadamente sua largura de banda. Como resultado, a tecnologia reduz e melhora a robustez contra interferências eletromagnéticas, tornando-se ideal para comunicações de longo alcance e baixa taxa de dados em redes IoT (TARANOVICH, 2016).

A eficiência espectral e a robustez contra interferências são obtidas ajustando o fator de espalhamento (SF), que varia de 7 a 12. Um SF maior aumenta o alcance e

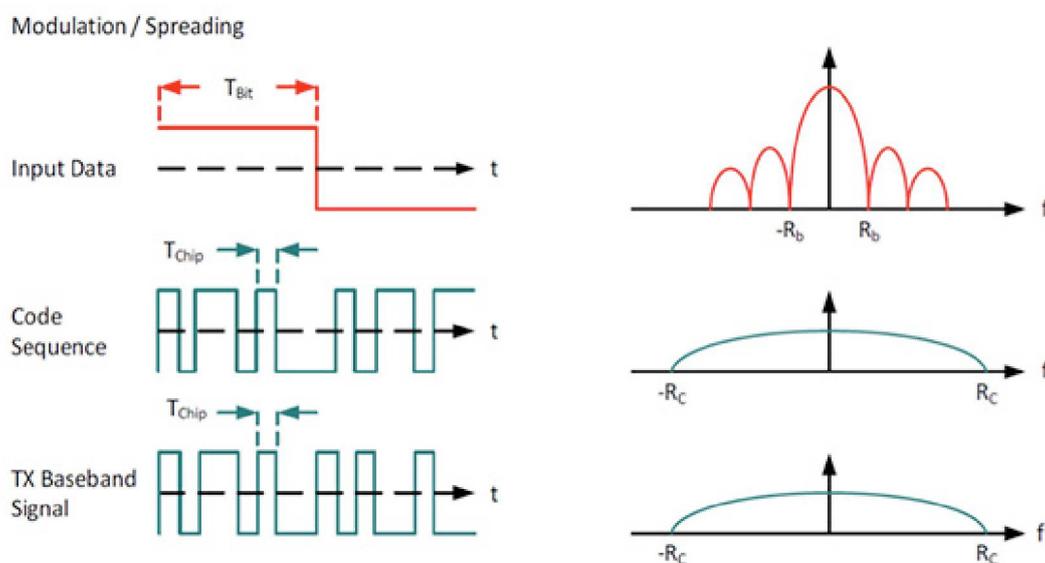


Figura 3 – A camada física LoRa com modulação de espectro espalhado (TARANOVICH, 2016).

a robustez, mas diminui a taxa de dados (MIKHAYLOV; PETÄJÄJÄRVI; HAAPOLA, 2017).

A segurança é um aspecto crucial em redes LoRaWAN. A arquitetura de segurança de LoRaWAN utiliza dois níveis de criptografia:

1. **Criptografia de Rede:** Para autenticar o dispositivo na rede.
2. **Criptografia de Aplicação:** Para proteger os dados do usuário.

As chaves de criptografia são derivadas utilizando métodos AES-128, que garantem um alto nível de segurança. O esquema de segurança é projetado para evitar ataques como *spoofing*, *replay*, *eavesdropping* e interferência maliciosa (LoRa Alliance, 2017).

O desempenho das redes LoRa é fortemente influenciado pela configuração dos parâmetros de transmissão, como o fator de espalhamento, a potência de transmissão e a largura de banda. A eficiência energética é um ponto forte do LoRa, com dispositivos sendo capazes de operar por anos com uma única bateria, dependendo do ciclo de trabalho (*duty cycle*) e da carga de comunicação. A equação (1) para a energia consumida (E) em um nó LoRa pode ser aproximada por:

$$E = V \times I \times T_{tx} \quad (1)$$

Onde:

- V é a tensão de operação,
- I é a corrente durante a transmissão,
- T_{tx} é o tempo de transmissão (ADELANTADO et al., 2017b).

Apesar de suas vantagens, a tecnologia LoRa enfrenta desafios significativos, como a limitação de capacidade em redes densas e as regulamentações rigorosas associadas ao uso das bandas ISM. Estudos recentes sugerem que o futuro do LoRa está direcionado ao aprimoramento dos protocolos de rede para aumentar a escalabilidade e a eficiência em ambientes densos, além de possibilitar uma integração mais robusta com outras tecnologias IoT para soluções híbridas. Entre as tendências emergentes, destaca-se o desenvolvimento do LoRa 2.0, que promete avanços na eficiência espectral, na redução do consumo de energia e na gestão dinâmica de redes (SMITH; JOHNSON; LEE, 2024).

2.3 Bluetooth Low Energy - BLE

A tecnologia BLE foi introduzida como parte do padrão Bluetooth 4.0 pela *Bluetooth Special Interest Group* (SIG) em 2010. BLE foi projetada para fornecer comunicação sem fio de baixa energia e foi desenvolvida especificamente para suportar aplicações que requerem baixo consumo de energia e comunicação esporádica de dados, em contraste com o Bluetooth clássico, que é otimizado para a transferência contínua de dados (Bluetooth Special Interest Group, 2010).

A arquitetura do BLE é composta por duas camadas principais: a camada de controlador e a camada de *host*. O controlador inclui a camada física (PHY) e a camada de controle de acesso ao meio (MAC), enquanto a camada de *host* lida com os protocolos de comunicação e perfis de aplicação. A estrutura básica pode ser descrita da seguinte forma:

1. **Camada Física (PHY):** Responsável pela modulação e demodulação de sinais de rádiofrequência (RF), definindo como os dados são transmitidos e recebidos

no meio físico.

2. **Camada de Controle de Acesso ao Meio (MAC):** Gerencia o acesso ao canal de comunicação, controlando o uso eficiente do espectro e evitando colisões entre transmissões.
3. **Camada de Controle e Adaptação:** Reúne protocolos que suportam a transmissão de dados, organização de conexões, gerenciamento de atributos e controle de acesso, garantindo a interoperabilidade e funcionalidade entre dispositivos (COLLINS, 2012).

A eficiência espectral e a robustez contra interferências são alcançadas através do uso de canais de 2 MHz e a técnica de salto de frequência (*Frequency Hopping Spread Spectrum* - FHSS), que minimiza os efeitos de interferência em canais específicos (GOMEZ; OLLER; PARADELLS, 2012).

O desempenho das redes BLE é influenciado pela configuração dos parâmetros de transmissão, como a potência de transmissão e o intervalo de conexão. A eficiência energética do BLE é uma característica chave, com dispositivos capazes de operar por longos períodos com uma única bateria.

Apesar das vantagens, o BLE enfrenta desafios como a limitação de alcance e a gestão de interferências em ambientes densos. Tendências futuras incluem o desenvolvimento de BLE 5.0, que visa aprimorar a largura de banda, a capacidade de rede e a gestão de energia. O BLE 5.0 introduz melhorias significativas, como aumento na taxa de dados para até 2 Mbps e maior alcance de comunicação (Bluetooth Special Interest Group, 2016).

2.4 Antena para PCI

As antenas para micro-PCI têm evoluído significativamente desde suas primeiras implementações. Originalmente, essas antenas eram simples traços condutores na PCB, mas com o avanço das tecnologias de comunicação sem fio e a miniaturização dos dispositivos eletrônicos, houve uma necessidade crescente de *designs* mais complexos e eficientes. As antenas de micro-PCI são agora essenciais em diversas tecnologias de comunicação, incluindo WiFi, BLE e LoRa (BALANIS, 2016; POZAR, 2012).

Existem vários tipos de antenas utilizadas em micro-PCI, cada uma com suas

características e aplicações específicas:

1. **Antena de Traço:** Consiste em um traço de cobre na PCI que atua como uma antena. É uma solução de baixo custo e fácil implementação, mas apresenta ganho e eficiência limitados, sendo mais adequada para aplicações onde o desempenho não é crítico (BALANIS, 2016).
2. **Antena de Chip (Chip Antenna):** Um componente discreto soldável na PCI que oferece desempenho superior ao da antena de traço. Sua compactidade a torna ideal para dispositivos com restrições de espaço, embora tenha um custo maior e requeira cuidado no *design* do circuito de correspondência de impedância (SMITH, 2023).
3. **Antena de Microstrip (Microstrip Antenna):** Composta por um condutor sobre um substrato dielétrico com um plano de terra na parte inferior, é amplamente utilizada em aplicações que exigem frequências mais altas, como 2,4 GHz e além. Essa antena combina bom desempenho, flexibilidade de design e aplicabilidade em sistemas modernos de comunicação (BALANIS, 2016; WATERHOUSE, 2003).
4. **Antena PIFA (Planar Inverted-F Antenna):** Comumente encontrada em dispositivos móveis, a antena PIFA combina tamanho compacto e eficiência razoável, sendo uma escolha popular para *designs* modernos. Sua evolução contínua garante sua relevância em tecnologias emergentes (SMITH, 2023).

O *design* de antenas para micro-PCI envolve técnicas para otimizar o desempenho, incluindo a escolha do substrato, o tamanho e forma da antena, e a integração com outros componentes da PCI. A impedância da antena deve ser bem casada com a do circuito transmissor/receptor para minimizar perdas de retorno.

O *design* de antenas para micro-PCI apresenta vários desafios, como a necessidade de miniaturização sem comprometer o desempenho, a gestão de interferências eletromagnéticas (EMI), e a integração com múltiplos componentes na PCI. A escolha do material do substrato também é crucial, pois afeta diretamente a eficiência e a frequência ressonante da antena (POZAR, 2012; BALANIS, 2016).

As tendências futuras no *design* de antenas para micro-PCI incluem o uso de materiais avançados, como metamateriais, e a integração de antenas com outras funcionalidades eletrônicas. A pesquisa contínua em antenas reconfiguráveis e multifuncionais

também está em destaque, visando atender às demandas de comunicações avançadas e dispositivos IoT (ZHANG, 2023; LIU, 2023).

2.5 Comutador de rádio frequência

As chaves de radiofrequência são componentes críticos em sistemas de comunicação sem fio, usados para alternar sinais RF entre diferentes caminhos. Historicamente, esses *switches* evoluíram de relés mecânicos para dispositivos de estado sólido, como diodos PIN e FETs (*Field-Effect Transistors*), proporcionando maior velocidade, menor tamanho e maior confiabilidade. Com o avanço das tecnologias de semicondutores, os RF *switches* modernos oferecem desempenho superior em termos de isolamento, perda de inserção e linearidade (POZAR, 2012; CLARK, 2013).

Existem vários tipos de comutador utilizados em micro-PCI, cada um com suas próprias vantagens e desvantagens:

1. **Diodos PIN:** Utilizados para *switches* em bandas de alta frequência devido à sua alta velocidade de comutação e boa linearidade. A equação (2) para a resistência de série (R_s) de um diodo PIN é:

$$R_s = \frac{1}{q \cdot N \cdot A \cdot \mu} \quad (2)$$

Onde:

- q é a carga do elétron,
 - N é a densidade de dopagem,
 - A é a área da junção,
 - μ é a mobilidade dos portadores (POZAR, 2012).
2. **Transistores FET:** Oferecem baixa perda de inserção e alta isolação, sendo adequados para aplicações de baixa e média potência. A resistência de canal (R_{on}) de um FET pode ser expressa como a equação (3):

$$R_{on} = \frac{1}{k(V_{gs} - V_t)} \quad (3)$$

Onde:

- k é o parâmetro do transistor,
- V_{gs} é a tensão entre a porta e a fonte,

- V_t é a tensão de limiar (GONZALEZ, 2014).

3. **MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems)**: Oferecem excelente desempenho em termos de linearidade e isolamento, mas podem ser mais caros e complexos de fabricar.

O projeto de comutadores para micro-PCI envolve várias considerações para otimizar o desempenho, incluindo o leiaute e o casamento de impedância. A equação (4) para a perda de inserção (IL) de um *switch* RF é:

$$IL = 10 \log \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right) \quad (4)$$

Onde:

- P_{in} é a potência de entrada,
- P_{out} é a potência de saída (CLARK, 2013).

A isolação (ISO) entre as portas de entrada e saída do comutador é outra métrica crucial e pode ser expressa como equação (5):

$$ISO = 10 \log \left(\frac{P_{off}}{P_{in}} \right) \quad (5)$$

Onde:

- P_{off} é a potência medida na porta isolado quando o *switch* está desligado (POZAR, 2012).

Ainda no projeto temos desafios como a necessidade de miniaturização, a gestão de interferências eletromagnéticas e a otimização do desempenho em termos de perda de inserção e isolamento. A seleção adequada de materiais e técnicas de fabricação também é essencial para garantir a eficiência e a confiabilidade (GONZALEZ, 2014; CLARK, 2013).

A eficiência de radiação da antena pode ser afetada pela proximidade de outros componentes e pelo leiaute da PCI. Manter áreas de vazio ao redor da antena ajuda a minimizar interferências.

As tendências futuras nos apontam para o uso de novas tecnologias, como comutadores baseados em materiais avançados, incluindo grafeno e nanotubos de carbono,

que oferecem desempenho aprimorado em velocidade, eficiência e miniaturização. Além disso, a pesquisa em dispositivos MEMS e *switches* reconfiguráveis continua a ganhar destaque, visando atender às crescentes demandas de redes de comunicação avançadas e dispositivos IoT em evolução (LIU, 2023; XU; WANG; ZHANG, 2022).

2.6 Casamento de Impedância em rádio frequência

Linhas de transmissão e casamento de impedância são essenciais em sistemas de comunicação. Para otimizar a transferência de potência, é fundamental alinhar a impedância da antena, da linha de transmissão e do transceptor. (BALANIS, 2016).

As linhas de transmissão são utilizadas para transportar sinais de radiofrequência entre diferentes componentes, como entre um transceptor e uma antena. Em sistemas de comunicação, linhas de transmissão comuns incluem *microstrip*, *stripline*, coaxial e cabo de par trançado. A figura 4 ilustra o princípio básico do casamento de impedância, que é crucial para transportar os sinais eficientemente do componente até a antena. Algumas dessas características nas linhas de transmissão.

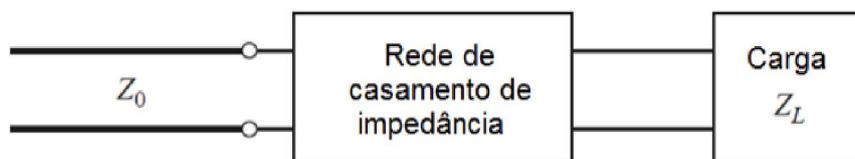


Figura 4 – Rede de casamento entre uma carga e uma linha de transmissão (SILVA, 2020).

2.6.1 *Microstrip*

- **Estrutura:** Consiste em um traço condutor em uma superfície dielétrica com um plano de terra na parte inferior (POZAR, 2012).
- **Impedância Característica (Z_0):**

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1.41}} \log \left(\frac{5.98h}{0.8w + t} \right) \quad (6)$$

Onde:

- ϵ_r é a constante dielétrica do substrato.
- h é a altura do substrato.
- w é a largura do traço.
- t é a espessura do traço.

2.6.2 Stripline

- **Estrutura:** Um condutor embutido entre dois planos de terra, cercado por material dielétrico (POZAR, 2012).
- **Impedância Característica (Z_0):**

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \log \left(\frac{4h}{0.67\pi(0.8 + w/t)} \right) \quad (7)$$

2.6.3 Coaxial

- **Estrutura:** Consiste em um condutor central rodeado por um dielétrico e uma blindagem condutora externa (POZAR, 2012).
- **Impedância Característica (Z_0):**

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \log \left(\frac{D}{d} \right) \quad (8)$$

Onde:

- D é o diâmetro interno da blindagem externa.
- d é o diâmetro do condutor central.

De acordo com (POZAR, 2012), quando a impedância característica de uma linha de transmissão é alterada em algum ponto ao longo de sua extensão, essa descontinuidade de impedâncias causa reflexões. Isso pode ocorrer devido a bifurcações, cargas no final da linha, mudanças no substrato ou na largura da linha, entre outros fatores.

Reflexões ocorrem porque a impedância de uma linha de transmissão determina a relação entre a tensão e a corrente do sinal que a percorre. Quando uma linha com impedância característica Z_0 termina em uma carga Z_L , a relação entre tensão e corrente deve se ajustar à nova impedância ao atingir a carga. Isso implica que, se

uma onda incidente possui amplitude V_0^+ , uma onda refletida com amplitude V_0^- será gerada para atender à nova condição. Assim, o coeficiente de reflexão Γ é definido como a razão entre a amplitude da tensão refletida e a amplitude da tensão incidente:

$$\Gamma = \frac{V_0^-}{V_0^+} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (9)$$

A Figura 5 apresenta o funcionamento do sistema com carga.

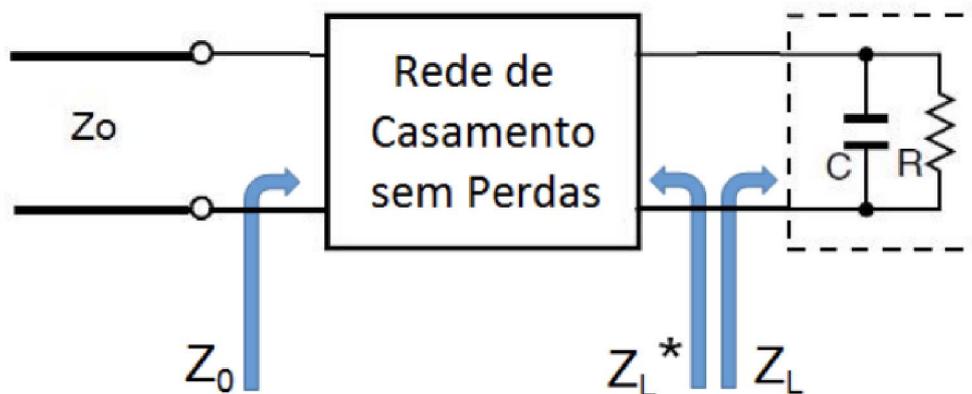


Figura 5 – Casamento de impedância de uma fonte para uma carga (SILVA, 2020).

A perda de retorno (*Return Loss*) é uma medida importante na análise de sistemas de RF, pois indica a quantidade de potência refletida de volta para a fonte devido a desadaptações de impedância. Uma boa adaptação de impedância minimiza as reflexões, resultando em uma maior perda de retorno, que é desejável. A perda de retorno é expressa em decibéis (dB) e é definida pela seguinte equação:

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

Onde:

- RL é a perda de retorno em dB.
- Γ é o coeficiente de reflexão, que representa a razão entre a onda refletida e a onda incidente.

A relação entre a perda de retorno e o coeficiente de reflexão é inversamente proporcional; quanto menor o valor de Γ , maior será o valor de RL , indicando uma melhor adaptação de impedância. Em termos práticos, uma perda de retorno alta (geralmente acima de 20 dB) indica que a maior parte da potência é transferida para a carga, com mínimas reflexões retornando à fonte.

A importância da perda de retorno se reflete na eficiência do sistema de comunicação, afetando diretamente o desempenho do sinal. Uma ruim adaptação de impedância pode resultar em perdas significativas de sinal, interferências e degradação geral da qualidade da transmissão. Essas interferências decorrem de reflexões de sinal causadas por desajustes de impedância, criando ondas estacionárias que não apenas diminuem a eficiência do sistema, mas também impactam outros dispositivos operando nas proximidades. Portanto, projetar circuitos de RF com uma perda de retorno adequada é crucial para minimizar as reflexões, reduzir interferências e garantir a eficiência e a confiabilidade do sistema.

Existem vários circuitos e componentes que podem formar uma rede de casamento de impedância em diversas configurações. A configuração mais simples é a rede em L com elementos concentrados, que segue o princípio da transformação série-paralelo de impedâncias. Nesse tipo de rede, as reatâncias X_P e X_S calculadas são implementadas com indutores e capacitores, sendo X_P a reatância paralela e X_S a reatância série. O fator de qualidade Q do circuito, definido pela relação entre a energia armazenada e a energia dissipada, é um parâmetro crucial que influencia a seletividade e a eficiência do sistema. Variantes da rede em L, como as redes em π e em T, são frequentemente encontradas em placas RF, pois oferecem maior flexibilidade no ajuste de Q e no desempenho geral do circuito. Exemplos de redes em L, π e T são mostrados na figura 6.

Garantir um bom casamento de impedância e o uso de linhas de transmissão adequadas é essencial para a eficiência dos sistemas de comunicação, permitindo comunicação eficaz com mínimo desperdício de energia e máxima performance (BALANIS, 2016).

A escolha do material do substrato, como FR4, influencia a constante dielétrica (ϵ_r) e, portanto, a impedância característica da linha de transmissão.

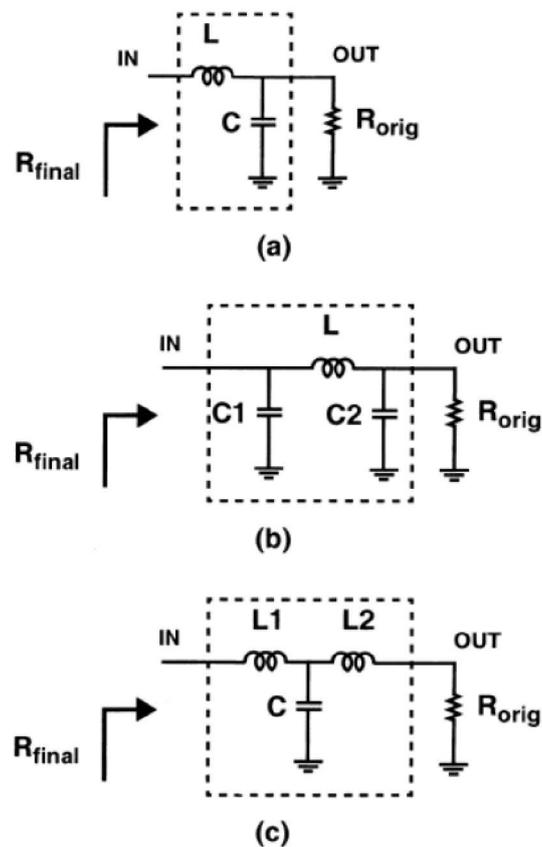


Figura 6 – Tipos de filtro para casamento de impedância (SHIRVANI; WOOLEY, 2003).

Ferramentas como analisadores de rede vetorial (VNAs) são utilizadas para medir a impedância e ajustar o casamento de impedância em circuitos de RF.

Projetar linhas de transmissão e garantir o casamento de impedância são passos críticos para otimizar o desempenho de sistemas RF que operam em várias frequências, minimizando perdas e maximizando a eficiência de transferência de sinal (WATERHOUSE, 2003).

3 METODOLOGIA

O projeto de pesquisa foi conduzido seguindo a metodologia ilustrada na figura 7. O primeiro passo consistiu na definição dos requisitos necessários para o desenvolvimento do sistema, incluindo a utilização de um microcontrolador de 32 *bits* com conectividade integrada no SoC, reduzindo a área ocupada na micro-PCI. Foi selecionado um microcontrolador amplamente disponível no mercado, com suporte aos protocolos de comunicação necessários e facilidade de aquisição.

Adicionalmente, integrou-se um rádio operando na frequência de 915 MHz, compatível com o microcontrolador, para garantir a eficiência na comunicação de longo alcance. Componentes energeticamente eficientes foram utilizados, com modos de baixo consumo e suporte para ativação via interrupções externas. O encapsulamento padrão de mercado da micro-PCI foi priorizado, facilitando a substituição por módulos comerciais e a integração em aplicações IoT.

Com base nesses requisitos, foi desenvolvido o esquema elétrico do transceptor WiFi/BLE integrado, utilizando o ESP32, e do rádio LoRa, detalhando interfaces de comunicação e o *front-end* de antena. O leiaute da micro-PCI foi projetado respeitando as especificações dos fabricantes e boas práticas de *design* de RF, como planos de terra contínuos, espaçamento adequado entre trilhas e uso de vias de blindagem para minimizar interferências. As trilhas foram roteadas para assegurar estabilidade e eficiência energética, e o projeto foi validado por simulações antes da fabricação.

Para o desenvolvimento, foram utilizadas ferramentas gratuitas como *EasyEDA* para o *design* elétrico e leiaute, e calculadoras online para o dimensionamento de trilhas e passivos. Após a fabricação da micro-PCI, medições práticas foram realizadas, incluindo:

- **Configuração Experimental:** A micro-PCI foi posicionada a 90 cm do solo e o receptor a 2,7 m, em uma câmara anecóica para minimizar interferências.
- **Protocolo BLE - Plano Horizontal:** Distribuição quase uniforme, intensidade máxima de 60 dB μ V/m.
- **Protocolo BLE - Plano Vertical:** Quedas de intensidade entre 240° e 270°

devido à proximidade com o plano de terra.

- **Protocolo WiFi - Plano Horizontal:** Padrão quase omnidirecional, intensidades entre 40 e 60 dB μ V/m.
- **Protocolo WiFi - Plano Vertical:** Quedas em ângulos específicos, mínimos de 20 dB μ V/m, devido ao *design* da antena.
- **Protocolo LoRa - Plano Horizontal:** Radiação uniforme, intensidade média de 80 dB μ V/m.
- **Protocolo LoRa - Plano Vertical:** Comportamento uniforme, pequenas variações de intensidade.
- **Emissões BLE:** Pico principal de 60 dB μ V/m, consistência em ambas as orientações.
- **Emissões WiFi:** Pico de 55 dB μ V/m, ruído levemente elevado no plano vertical.
- **Emissões LoRa:** Pico de 65 dB μ V/m, uniformidade em todas as direções.

Além dessas medições de RF, testes específicos foram conduzidos, incluindo:

- **Testes de Firmware:** A funcionalidade do código embarcado no ESP32 foi verificada, assim como sua interação com os módulos de comunicação.
- **Testes de Transmissão WiFi:** O desempenho do ESP32 em redes WiFi foi avaliado, com medições de estabilidade e taxa de transferência de dados.
- **Testes de Transmissão BLE:** Foram realizados testes de comunicação BLE, analisando latência e consumo de energia durante a operação.
- **Testes de Transmissão LoRa:** O alcance e a estabilidade do sinal LoRa foram medidos, juntamente com a eficiência energética em longas distâncias.

Por fim, uma análise quantitativa foi conduzida para avaliar se o desenvolvimento da micro-PCI utilizando ferramentas gratuitas e acessíveis era suficiente para obter resultados tecnicamente satisfatórios em desempenho, comparados com as análises feitas por ferramentas profissionais de simulações e equipamentos de medições.

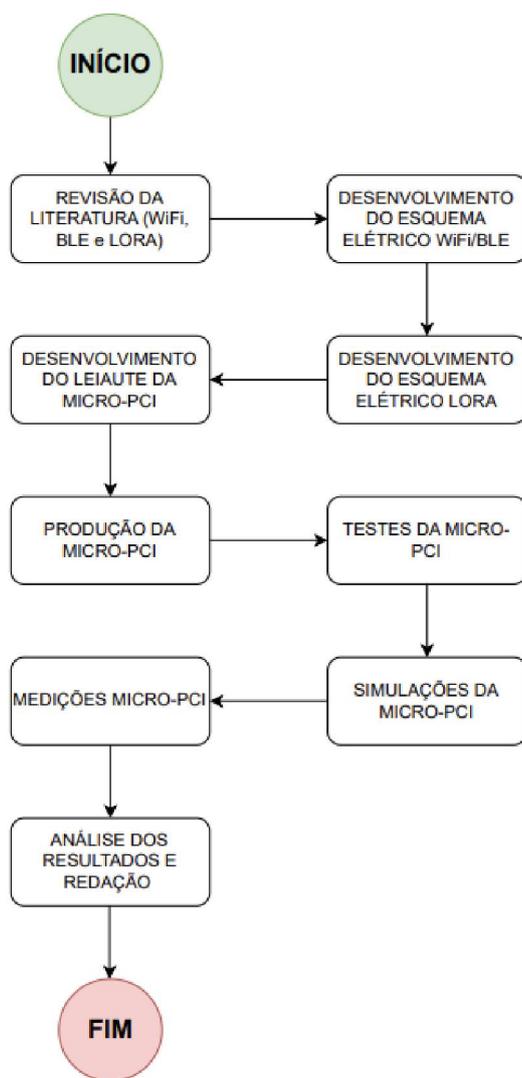


Figura 7 – Etapas da metodologia do projeto de pesquisa (O Autor, 2024).

4 PROJETO DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

4.1 Desenvolvimento da micro-PCI IoT

Neste capítulo, são descritos os procedimentos e estratégias utilizados para o desenvolvimento de uma micro-PCI com multiconectividade, baixo consumo e antena integrada, projetada para aplicações em IoT. O processo abrange desde a seleção do controlador principal até a integração das diferentes formas de comunicação.

4.1.1 Características Técnicas Relevantes

As principais características técnicas da placa desenvolvida destacam seu potencial com ênfase em desempenho, eficiência energética e flexibilidade de integração:

- **Microcontrolador:** Unidade central de alta performance, com suporte a múltiplos protocolos de comunicação, como UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*), SPI (*Serial Peripheral Interface*) e I2C (*Inter-Integrated Circuit*).
- **Antena RF Integrada:** Projeto otimizado para transmissão e recepção em frequências específicas, ajustado para máxima eficiência e baixa perda de sinal.
- **Interface USB-C:** Comunicação confiável e moderna, utilizada tanto para transferência de dados quanto para alimentação do sistema.
- **Regulador de Tensão:** Fornecimento de energia estável, essencial para garantir operação confiável mesmo em condições adversas.
- **Design Compacto:** Dimensões reduzidas que favorecem a integração em dispositivos IoT, sem comprometer a densidade funcional.

4.1.2 Diagrama de Blocos

A estrutura geral do projeto é apresentada no diagrama de blocos ilustrado na Figura 8. Este diagrama destaca a interação entre os principais componentes, como o microcontrolador, os transceptores BLE e WiFi, o transceptor LoRa conectado via interface SPI e os elementos passivos, incluindo cristais e capacitores de filtro. A antena PiFA, projetada para BLE e WiFi direto na própria micro-PCI, e o conector SMA para

o transceptor LoRa também estão incluídos, reforçando a modularidade e eficiência do projeto.

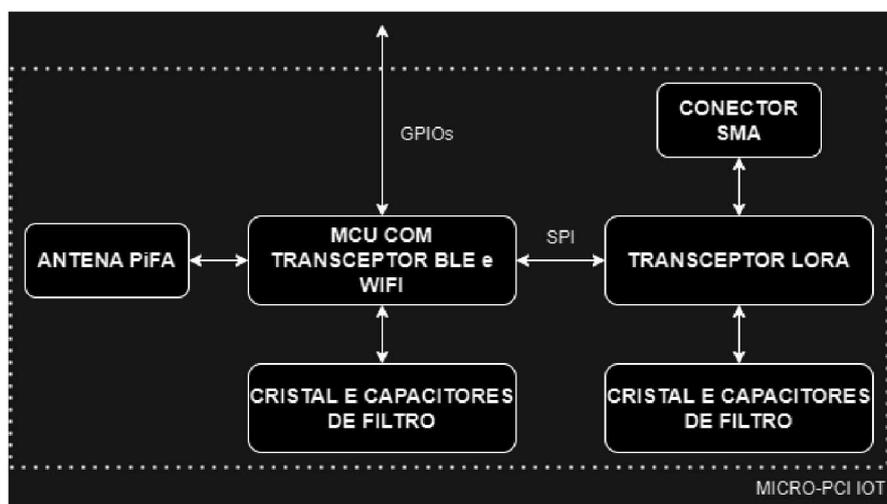


Figura 8 – Diagrama de blocos do projeto da micro-PCI IoT (O Autor, 2024).

4.1.3 Aplicações Potenciais

O módulo e sua placa base foram projetados para oferecer suporte a uma ampla gama de aplicações, adaptando-se a diferentes contextos:

- **Monitoramento Ambiental e Industrial:** Ideal para sensores remotos que necessitam de conectividade robusta e baixo consumo de energia.
- **Comunicação Sem Fio para Controle Remoto:** Compatível com BLE, WiFi e LoRa, abrangendo múltiplos cenários de uso.
- **Prototipagem de Hardware Embarcado:** Plataforma flexível para desenvolvedores explorarem soluções de hardware personalizadas.
- **Automação Residencial e Industrial:** Adequado para sistemas inteligentes, como controle de iluminação, segurança e dispositivos conectados.

O desenvolvimento da placa reflete um compromisso com a aplicação de práticas avançadas de engenharia de *Hardware*, priorizando detalhes no projeto para garantir desempenho, confiabilidade e facilidade de uso. Com sua flexibilidade, robustez e alta densidade funcional, a micro-PCI está bem posicionada para atender às demandas de um mercado.

A micro-PCI projetada integra um microcontrolador de 32 *bits*, que possui funcionalidades de BLE e WiFi incorporadas. Esse microcontrolador foi escolhido por sua versatilidade e capacidade de suportar múltiplas tecnologias de comunicação. Além disso, seu baixo consumo de energia o torna uma opção eficiente para dispositivos alimentados por bateria, como sensores remotos. A placa inclui ainda uma antena do tipo PiFA, que oferece alta eficiência em frequências de operação de 2,4 GHz, e um transceptor de rádio LoRa com conector mini U.FL, permitindo maior flexibilidade para o uso de antenas externas em cenários que demandam alcance estendido.

A eficiência energética foi priorizada ao longo do projeto, com a escolha de um encapsulamento padrão disponível no mercado. Essa abordagem não apenas reduz os custos de fabricação, mas também facilita a integração da micro-PCI. Além disso, o encapsulamento compacto promove uma maior proximidade entre os componentes, o que minimiza perdas parasitas e melhora a eficiência geral do sistema. Outro benefício importante é a simplicidade no processo de montagem e manutenção, permitindo a reutilização da placa em diferentes contextos.

Para atender aos requisitos de desempenho e miniaturização, a incorporação de todos os componentes passivos diretamente na PCI mostrou-se uma abordagem viável. Essa estratégia eliminou a necessidade de módulos externos, reduzindo custos e economizando espaço. A integração é especialmente vantajosa para sistemas IoT que operam em ambientes compactos ou demandam dispositivos menores, sem comprometer o desempenho. Além disso, a antena integrada contribuiu para a otimização do espaço físico, garantindo um projeto eficiente e funcional.

A escolha do SoC LoRa foi orientada por sua capacidade de operar em aplicações de longo alcance com baixo consumo de energia. O protocolo LoRaWAN, compatível com o SoC, oferece suporte para redes IoT escaláveis e robustas. Além disso, a capacidade de operar em modo *deep sleep* com um consumo inferior a 1 μA é um diferencial crucial. Essa característica assegura que possa ser utilizada em dispositivos alimentados por baterias, proporcionando longa vida útil e confiabilidade em campo.

4.2 Escolha do transceptor LoRa

A escolha do transceptor SX1276 para a PCI com multiconectividade para IoT foi fundamentada em ser um dos SoC da fabricante Semtech que apresenta a maior quantidade de recursos para poder entregar comunicações completas com rádio através de pinos digitais e interrupções, suportando de 137 MHz a 1020 MHz que podem ser utilizada para outros modos de operação em faixas de sub-GHz ([Semtech Corporation, 2024](#)). O SX1276 possui alta sensibilidade de recepção até -148 dBm e robustez contra interferências de radiofrequência. A interface SPI simplifica a integração com microcontroladores, e a ampla documentação e suporte técnico da Semtech agilizam o desenvolvimento. Essas características fazem do SX1276 uma escolha excelente para projetos IoT que demandam eficiência energética e desempenho confiável ([ADELANTADO et al., 2017a](#))([AL-FUQAHA et al., 2015](#)). Para este trabalho, foi definida a frequência de 915 MHz como principal devido à sua conformidade com as regulamentações brasileiras, que permitem operar nas faixas de 902 MHz a 907,5 MHz e de 915 MHz a 928 MHz.

4.3 Escolha do transceptor Bluetooth/WiFi

A escolha do transceptor ESP32-D0WD, da *Espressif Systems*, para o projeto com multiconectividade é justificada por várias razões técnicas e estratégicas. Primeiramente, o ESP32-D0WD oferece suporte integrado para WiFi, Bluetooth e BLE, proporcionando facilidade de uso devido à integração completa da parte de rádio dentro do SoC. Este *design* compacto requer apenas alguns componentes passivos externos, simplificando o circuito. Equipado com um microcontrolador *dual-core* de 32 bits, com *clock* de 240MHz, o ESP32-D0WD oferece alto desempenho para tarefas complexas em tempo real ([SYSTEMS, 2023](#)).

O ESP32-D0WD é eficiente em termos de energia, oferecendo modos de economia que consomem apenas algumas dezenas de μA . Possui uma ampla lista de interfaces de comunicação, como SPI, I2C e UART, além de diversos GPIOs, facilitando a conexão com sensores e periféricos ([SYSTEMS, 2023](#)).

Além disso, o ESP32-D0WD apresenta uma excelente relação custo-benefício, eliminando a necessidade de transceptores externos e reduzindo a quantidade de componentes adicionais no projeto. Sua compatibilidade com o ESP-IDF oferece uma

plataforma robusta para o desenvolvimento de *Firmware*, integrando conectividade, segurança e desempenho em um único dispositivo. Essas características tornam o ESP32-D0WD uma solução altamente eficiente para projetos IoT (FARAGHER; HARLE, 2015). Embora existam microcontroladores com consumo de energia ainda menor, a escolha deste modelo se justifica pelo fato de integrar os rádios diretamente no SoC, reduzindo a complexidade do projeto e otimizando a eficiência da solução.

4.4 Encapsulamento dos transceptores sem fio

O SX1276, um transceptor de rádio LoRa da Semtech, usa o encapsulamento QFN (*Quad Flat No-lead*) de 28 pinos. Este encapsulamento é compacto, facilitando sua integração em que o espaço é crítico. O QFN oferece excelente dissipação térmica devido à grande área de contato com a PCI, ajudando a manter o transceptor dentro das especificações térmicas. Com baixa indutância, o QFN melhora o desempenho em frequências de rádio, adequando-se bem ao SX1276, que opera em frequências de até 1 GHz. Além disso, o QFN permite a montagem em superfície (SMD), o que simplifica a automação na fabricação e reduz os custos de produção.

O ESP32-D0WD apresenta encapsulado em QFN-48 (48 pinos). Embora maior que o QFN-28, o QFN-48 permanece compacto e oferece excelente dissipação térmica. Mantendo a baixa indutância, o QFN-48 minimiza efeitos parasíticos, beneficiando as operações de rádio do ESP32 e garantindo um desempenho estável.

4.5 Esquemático do SX1276

O SX1276 apresenta os seguintes componentes e conexões principais: os pinos de alimentação principal VDD, que são tipicamente conectados a uma fonte de 3,3V, e os pinos de aterramento GND, conectados ao plano de terra da PCI. Um cristal externo de 32 MHz é conectado aos pinos XTA e XTB para fornecer o *clock* de operação. Capacitores e indutores são utilizados para filtragem e ajuste da impedância de radiofrequência, enquanto capacitores de desacoplamento são posicionados próximos aos pinos de alimentação para estabilizar a tensão.

A antena é conectada ao pino RFIO para transmitir e receber sinais de RF, utilizando exclusivamente um conector U.FL para a conexão de antenas externas. A

interface de comunicação é composta pelos pinos de SPI (MOSI, MISO, SCK, NSS) para a comunicação com um microcontrolador externo, permitindo a configuração e controle do transceptor. O controle de reset e IRQ inclui o pino RESET para reinicializar o transceptor e os pinos DIOx, que são pinos de entrada/saída digital usados para funções como interrupções (IRQ), indicando eventos como a recepção de um pacote. A figura 9 abaixo apresenta o esquemático.

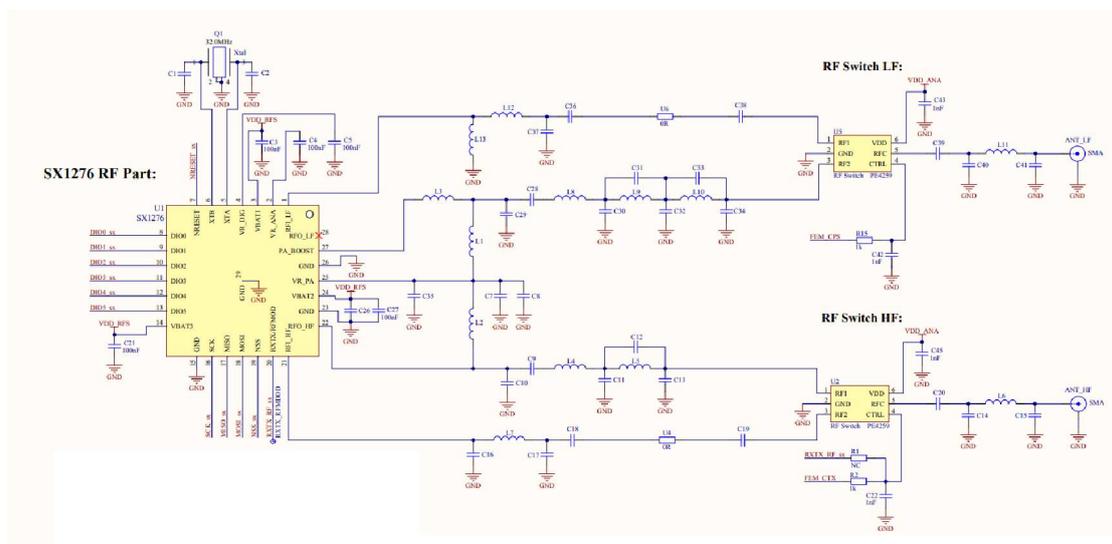


Figura 9 – Esquemático do transceptor LoRa SX1276. (Semtech Corporation, 2024)

4.5.1 Projeto de filtro para o SX1276

O esquemático padrão do SX1276 inclui filtros de entrada e saída RF para uma ampla faixa de frequências, variando de 137 MHz a 433 MHz para baixa frequência e até 1020 MHz para alta frequência. No entanto, como o objetivo é utilizar apenas a faixa de alta frequência permitida pelos padrões brasileiros, conforme mostrado na Figura 10.

O objetivo principal do casamento de impedâncias e da filtragem harmônica é alcançar a máxima transferência de energia da saída do PA (Power Amplifier) para a antena. O filtro foi projetado seguindo as recomendações do fabricante, garantindo um desempenho otimizado e conformidade com os requisitos de RF. A figura 11 apresenta o ajuste de impedância do transmissor, que pode ser dividido em quatro partes.

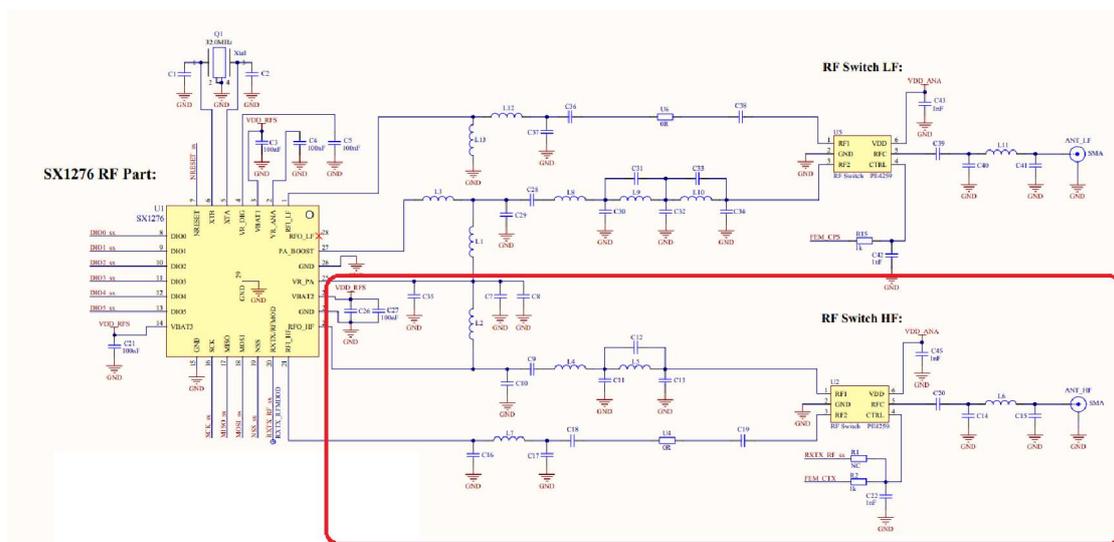


Figura 10 – Esquemático do transceptor LoRa SX1276 para alta frequência (O Autor, 2024).

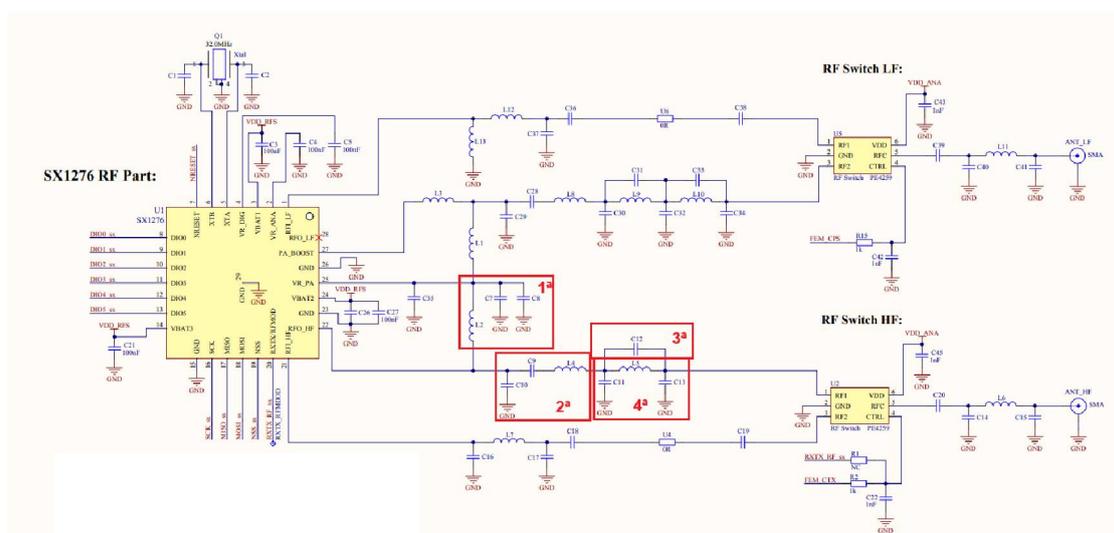


Figura 11 – Seleção dos quatro estágios principais para a transmissão (O Autor, 2024).

O estágio 1 tem como objetivo definir a potência de saída do PA. O estágio 2 visa casar a impedância da saída de RF com os filtros. O estágio 3 é responsável pela filtragem da segunda harmônica do sinal. Finalmente, o estágio 4 é um filtro de alta ordem para harmônicas, reduzindo a reflexão na transmissão e evitando espúrios no sinal.

4.5.2 Projeto adaptação de impedância para o SX1276

Os componentes de ajuste de impedância e filtragem incluem:

- Indutor (L1): 10 nH
- Capacitor (C1): 1 pF
- Indutor (L2): 5,6 nH
- Capacitor (C2): 1,2 pF

Esses componentes são posicionados próximos ao pino RFIO do SX1276 para ajustar a impedância e otimizar a resposta da antena.

Para permitir o uso de uma antena externa, um conector U.FL é utilizado:

- Conector U.FL: Hirose U.FL-R-SMT(10)
- Indutor de Choque RF (L3): 10 nH para isolamento de DC

O leiaute da PCB deve garantir que a área ao redor da antena esteja livre de planos de terra e outros componentes para minimizar interferências. Simulações de acoplamento do sinal de RF e testes práticos do rádio são recomendados para ajustar e validar o desempenho da antena.

No casamento de impedância, considerando que a saída do transceptor LoRa é $50\ \Omega$, o filtro foi projetado de acordo com as recomendações do fabricante para manter essa impedância característica. Na saída do RF *switch*, a impedância também permanece em $50\ \Omega$, garantindo uniformidade em todo o sistema até a antena. Para o cálculo dos parâmetros do filtro e da linha de transmissão, foi utilizada a ferramenta *online* descrita em (Electronics Tutorials, 2024), que permite projetar redes de casamento de impedância, como topologias π -*pad*, de forma precisa. Essa calculadora simplifica o *design* dos componentes passivos (capacitores e indutores), assegurando uma correspondência de impedância eficaz e minimizando reflexões ao longo do sistema de radiofrequência.

Para o projeto, foi considerada uma linha de transmissão ideal de $50\ \Omega$ com comprimento de 4 mm. Durante as simulações realizadas, verificou-se que não era necessário utilizar um filtro π , como apresentado na figura 11. Essa decisão baseou-se no fato de que os valores calculados para os componentes passivos do filtro eram extremamente baixos, tornando sua implementação irrelevante no projeto. Além disso, como a impedância na saída do comutador de RF é de $50\ \Omega$, e o conector U.FL

possui $50\ \Omega$ de impedância característica, a proximidade entre o conector e a saída do comutador permitiu simplificar o *design*. Foi utilizado um resistor de $0\ \Omega$ para possibilitar ajustes de impedância, caso necessário, garantindo a integridade do sinal sem a adição de componentes desnecessários.

4.5.3 Cristal para o SX1276

O cristal para o SX1276 é crucial para garantir um *clock* estável e preciso para o uso estável durante a transmissão e recepção do transceptor. A seguir, detalha-se os componentes do circuito com os valores necessários.

A conexão é realizada nos pinos XTA e XTB do SX1276. De acordo com as especificações fornecidas pelo (Semtech Corporation, 2024), os valores típicos dos componentes necessários para manter precisa e estável no funcionamento são:

- Cristal de 32 MHz: ECS-320-8-36-JTN-TR
- Capacitores de carga (C1 e C2): 10 pF cada
- Resistor de série (R1): $1\ M\Omega$

A configuração típica é a seguinte:

- O cristal é conectado entre os pinos XTA e XTB.
- Os capacitores de carga (C1 e C2) são conectados entre cada pino do cristal (XTA e XTB) e o terra (GND).
- Um resistor de série (R1) é colocado entre os pinos XTA e XTB para estabilizar o oscilador.

4.6 Esquemático do ESP32-D0WD

O esquemático típico do ESP32-D0WD inclui os seguintes componentes e conexões principais: pinos de alimentação principal VDD, geralmente conectados a uma fonte de 3,3V, e pinos de aterramento GND, conectados ao plano de terra da PCI. A conexão de um cristal externo de 40 MHz aos pinos XTAL_IN e XTAL_OUT fornece o clock de operação. Capacitores de desacoplamento são posicionados próximos aos pinos de alimentação para estabilizar a tensão e reduzir ruídos, enquanto indutores e capacitores são utilizados para filtragem de sinais de RF. A conexão de uma memória *flash* externa é feita para armazenamento de *Firmware* e dados, tipicamente usando

uma interface SPI dedicada a isso. O circuito de *reset* e *boot* inclui o pino EN (*Enable*) para habilitar e desabilitar o SoC para selecionar o modo de inicialização (*boot mode*), como mostra na figura 12.

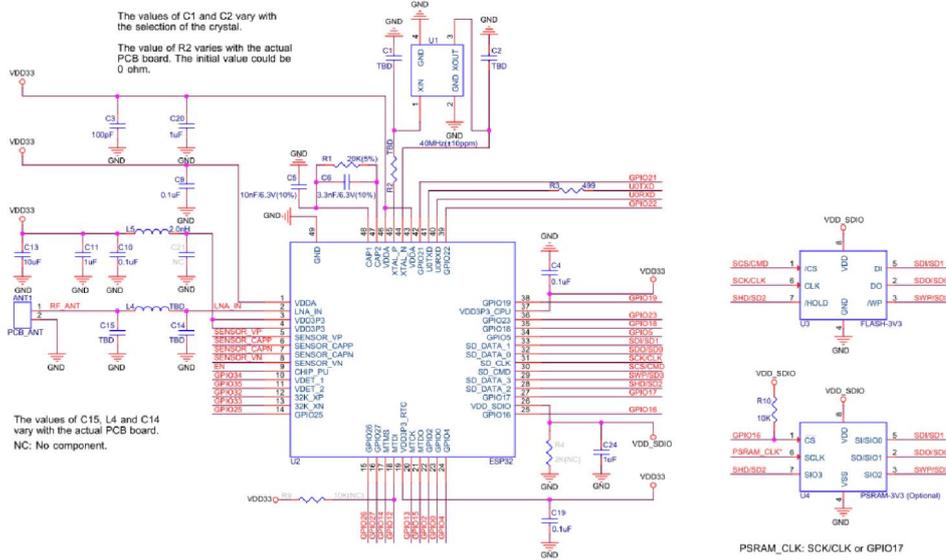


Figura 12 – Esquemático ESP32-D0WD. Fonte: Adaptado de (CORPORATION, 2023)

O projeto de antena para o ESP32-D0WD foi desenvolvido para garantir a melhor transmissão nas comunicações WiFi e BLE. A antena de traço na micro-PCI é projetada para ter uma impedância de 50Ω , com um comprimento de traço de aproximadamente 31 mm para a frequência de 2,4 GHz. Esse valor foi calculado utilizando a fórmula para o comprimento de onda (λ) em um substrato com constante dielétrica (ϵ_r), onde $\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}}$. Considerando a velocidade da luz (c) como 3×10^8 m/s, a frequência (f) de 2,4 GHz e a constante dielétrica (ϵ_r) do material FR4 (*Flame Retardant 4*) de aproximadamente 4,4, o comprimento do traço foi ajustado para 31 mm, como explicado por (TEXAS INSTRUMENTS, 2015)

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{2.4 \times 10^9 \sqrt{4.4}} \approx 31 \text{ mm} \quad (11)$$

Os componentes de ajuste de impedância e filtragem, de acordo com (SYSTEMS, 2023), recomendados para uma saída adaptada à antena incluem:

- Indutor (L1): 3,3 nH
- Capacitor (C1): 1 pF
- Indutor (L2): 1,8 nH
- Capacitor (C2): 1 pF

Esses componentes são posicionados próximos ao pino RFIO do ESP32-D0WD para ajustar a impedância e otimizar a resposta da antena.

Para permitir o uso de uma antena externa, foi utilizado um conector U.FL:

- Conector U.FL: Hirose U.FL-R-SMT(10)
- Indutor de Choque RF (L3): 10 nH para isolamento de DC

O leiaute da PCB foi projetado de modo que a área ao redor da antena esteja livre de planos de terra e outros componentes para minimizar interferências.

Além disso, o cristal para o ESP32-D0WD é essencial para garantir um clock estável e preciso para o microcontrolador. A seguir, são detalhados os valores e componentes necessários para utilizar um cristal de 40 MHz.

A conexão do cristal foi feita aos pinos XTAL_IN e XTAL_OUT do ESP32-D0WD. Os valores típicos dos componentes incluem:

- Cristal de 40 MHz: Abracon ABS07-32.768KHZ-T
- Capacitores de carga (C1 e C2): 10 pF cada
- Resistor de série (R1): 0 Ω (opcional, dependendo do cristal utilizado)

A configuração típica foi a seguinte:

- O cristal foi conectado entre os pinos XTAL_IN e XTAL_OUT.
- Os capacitores de carga (C1 e C2) foram conectados entre cada pino do cristal (XTAL_IN e XTAL_OUT) e o terra (GND).
- Um resistor de série (R1), se necessário, foi colocado em série com o cristal para ajustar a estabilidade do oscilador.

A figura 13 representa o esquemático desenvolvido.

No projeto de RF do ESP32-D0WD, conforme especificado pelo fabricante, a impedância de saída é de $35 + j10 \Omega$. Para garantir o casamento de impedância adequado com a antena, foi utilizado um filtro do tipo π . Este filtro foi escolhido por sua

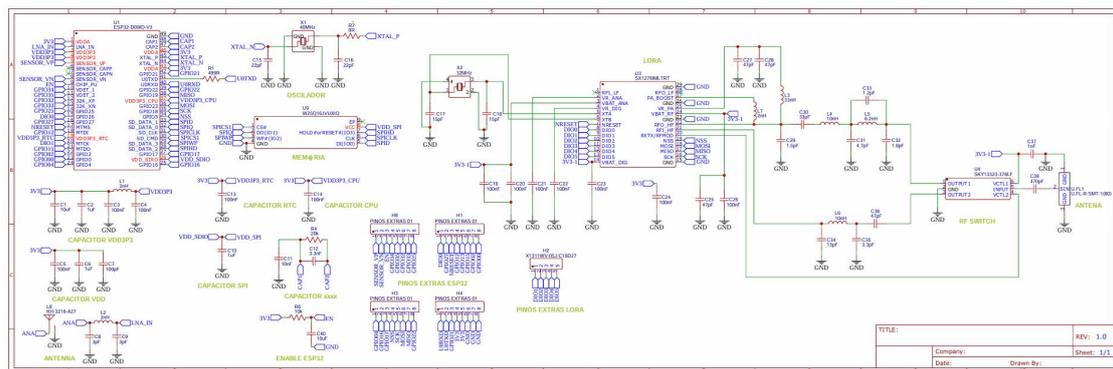


Figura 13 – Esquemático ESP32-D0WD.

simplicidade e eficiência em ajustes de impedância em frequências de RF, minimizando a perda de sinal e maximizando a eficiência de transmissão. Além disso, o filtro π é particularmente eficaz em atenuar reflexões indesejadas e ruídos, garantindo uma melhor integridade do sinal.

Para calcular os componentes do filtro π , foi utilizada a ferramenta online Pi Pad Impedance Calculator ([Electronics Tutorials, 2024](#)). Essa ferramenta permite definir os parâmetros necessários, incluindo a frequência de operação, a resistência e a reatância da fonte, bem como a resistência e a reatância da carga. Adicionalmente, o fator de qualidade Q foi configurado como 2, garantindo um equilíbrio entre a seletividade e a atenuação. Um Q igual a 2 é ideal porque proporciona uma banda passante suficiente para o sinal RF, simplifica o *design* dos componentes e minimiza perdas excessivas, assegurando eficiência energética e transmissão estável. A Figura 14 apresenta os resultados obtidos na ferramenta, incluindo os valores ideais para os componentes do filtro π , assegurando o casamento de impedância entre o ESP32-D0WD e a antena microstrip.

A vantagem do simulador *online*, é que ele apresenta os resultados esperados para os componentes passivos do filtro π , como apresentados na figura 15. Como os valores são pequenos, e buscando atingir o objetivo, foram implementados valores aproximados e de fácil aquisição no mercado para o capacitor da fonte 3 pF, capacitor da carga 3 pF e para o indutor 2 nF.

A Figura 16 apresenta um gráfico da impedância com as componentes real (em azul) e imaginária (em laranja) em função da frequência (em GHz). O eixo horizontal

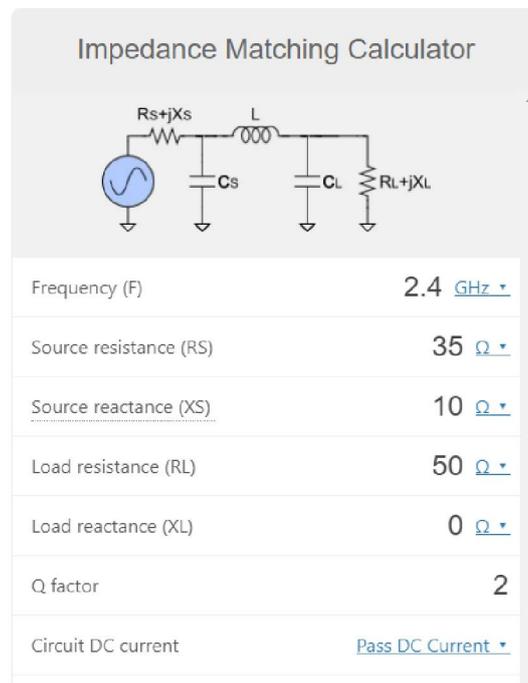


Figura 14 – Calculador de impedância online (Electronics Tutorials, 2024)

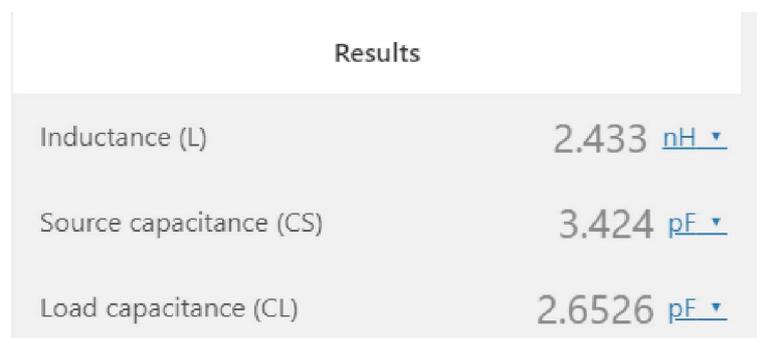


Figura 15 – Resultado do calculador de impedância online com os componentes passivos (Electronics Tutorials, 2024)

abrange frequências de aproximadamente 0,8 GHz a 7,6 GHz, enquanto o eixo vertical representa a impedância (Ω). A parte superior do gráfico exibe a componente real da impedância, que atinge um pico significativo em torno de 2,4 GHz, indicando alta resistência nesse ponto. Após o pico, a resistência diminui rapidamente e se estabiliza em valores baixos em frequências mais altas. A parte inferior do gráfico representa a componente imaginária da impedância, que cruza zero em 2,4 GHz, correspondendo

à frequência de ressonância do circuito. Antes desse ponto, a reatância é positiva, sugerindo comportamento indutivo, enquanto após a ressonância, torna-se negativa, indicando comportamento capacitivo.

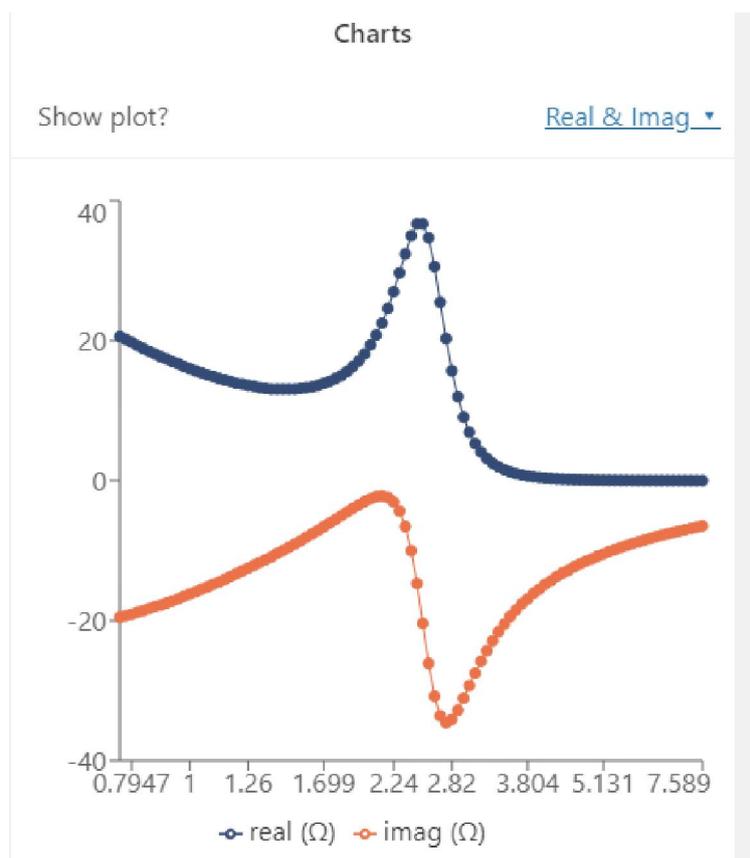


Figura 16 – Gráfico das componentes real e imaginária da impedância em função da frequência (em GHz) (Electronics Tutorials, 2024)

A Figura 17 mostra a magnitude da impedância ($|Z|$) em função da frequência. A curva apresenta um pico em torno de 2,4 GHz, onde a magnitude da impedância atinge seu valor máximo, destacando o ponto de ressonância. Antes do pico, a magnitude da impedância começa em torno de 30 Ω e diminui até atingir um valor mínimo. Após o pico, a magnitude também decresce, estabilizando-se em valores baixos para frequências mais altas. Esse comportamento é característico da transição entre comportamentos indutivo e capacitivo.

A Figura 18 ilustra a variação da fase da impedância em função da frequência

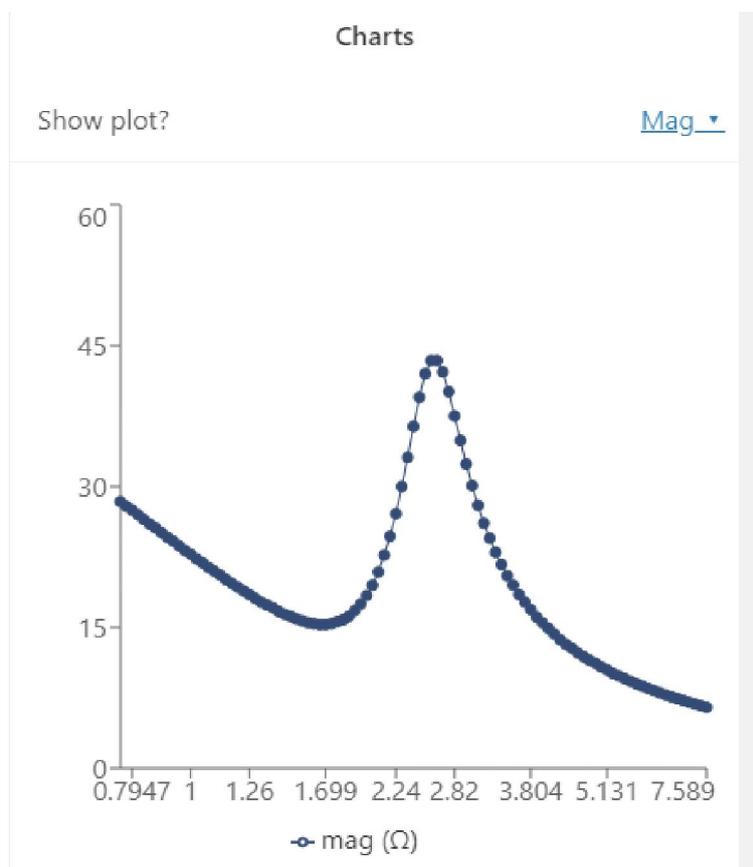


Figura 17 – Gráfico da magnitude da impedância em função da frequência (em GHz) (Electronics Tutorials, 2024)

(em GHz). A fase da impedância, representada em graus, começa em torno de -50° para frequências mais baixas e aumenta até atingir aproximadamente 0° em 2,4 GHz, indicando que a impedância é puramente resistiva nesta frequência. Após esse ponto, a fase diminui rapidamente, alcançando cerca de -90° em frequências mais altas, refletindo um comportamento capacitivo predominante. A transição da fase próxima a 2,4 GHz demonstra o comportamento ressonante do circuito.

A escolha da frequência de 2,4 GHz como ponto de ressonância é justificada por sua ampla aplicação em redes sem fio, como BLE e WiFi, devido à sua disponibilidade na banda ISM. A ressonância em 2,4 GHz maximiza a transferência de energia, reduzindo reflexões e perdas no sistema, fatores críticos para dispositivos IoT que dependem de eficiência energética e desempenho robusto em um espectro compartilhado.

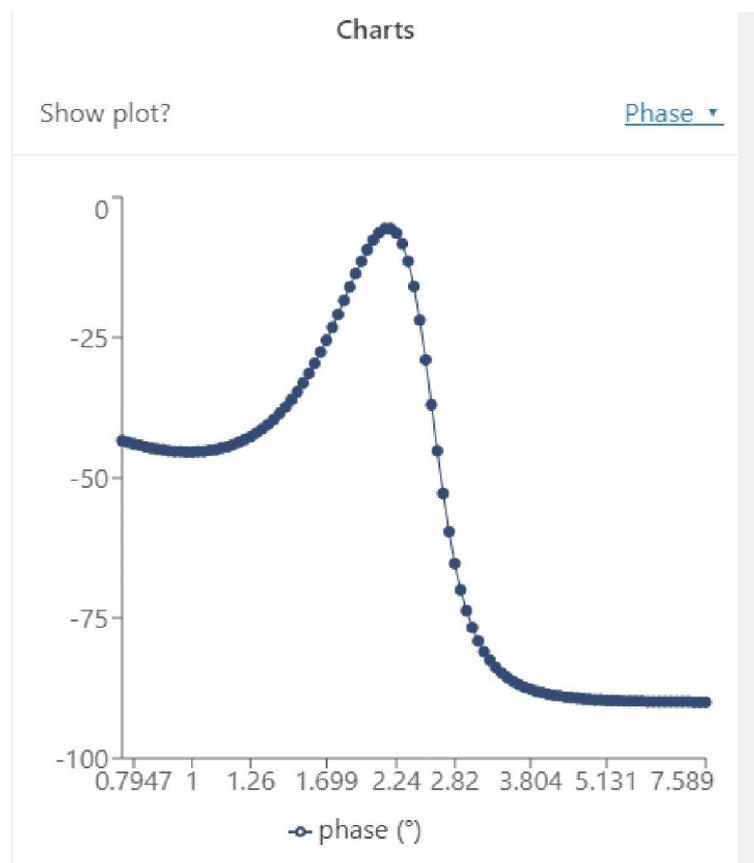


Figura 18 – Gráfico da fase da impedância em função da frequência (em GHz)
([Electronics Tutorials, 2024](#))

Na figura 19 fornecida mostra um gráfico de Smith, que é uma ferramenta essencial para a análise e design de circuitos de RF. O gráfico de Smith é utilizado para representar a impedância e a admitância complexas em um plano bidimensional, facilitando a visualização de como essas propriedades variam com a frequência. O eixo horizontal representa a resistência (parte real da impedância), enquanto o eixo vertical representa a reatância (parte imaginária da impedância). As curvas concêntricas representam valores constantes de resistência e os arcos representam valores constantes de reatância. Pontos específicos no gráfico, como DP1, DP2, DP3 e DP4, representam diferentes estados ou frequências do circuito.

No ponto DP1, a impedância é aproximadamente $30 + j20 \Omega$, indicando uma resistência de 30Ω e uma reatância indutiva de 20Ω . À medida que a frequência muda,

a impedância se move no gráfico, passando de uma impedância indutiva para uma capacitiva, resultando em DP2 com uma impedância de aproximadamente $10 - j25 \Omega$. A trajetória continua, mostrando variações na impedância com a frequência, chegando a DP3, onde a impedância é de aproximadamente $5 - j50 \Omega$. Finalmente, a trajetória ajusta a impedância para DP4, onde é puramente resistiva com 50Ω , ideal para casar com uma linha de transmissão de 50Ω .

A transição da impedância inicial de $30 + j20 \Omega$ para a impedância final de $50 + j0 \Omega$ mostra uma adaptação eficaz de impedância ao longo das frequências analisadas. As variações significativas na reatância ao longo das trajetórias indicam a necessidade de componentes reativos (indutâncias e capacitâncias) para ajustar a impedância em diferentes frequências. O ponto final de $50 + j0 \Omega$ indica um casamento de impedância ideal, crucial para maximizar a transferência de potência e minimizar reflexões em sistemas de RF.

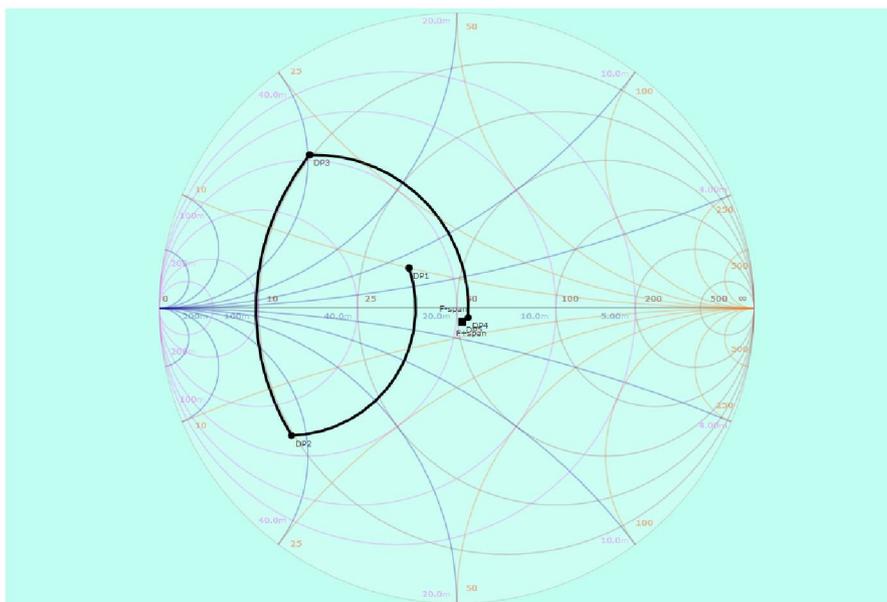


Figura 19 – Definição da carta de *Smith* (O Autor, 2024)

A figura 20 fornecida mostra um diagrama de um sistema de impedância com vários componentes, indicando suas respectivas impedâncias em diferentes pontos (DP1, DP2, DP3, DP4 e DP5) e os valores dos componentes. No ponto DP1, a impedância é $Z = 35 + 10j \Omega$, e um capacitor de 3 pF conectado ao terra resulta em uma impedância de $Z = 21.8j \Omega$ no ponto DP2. Um indutor de 2 nH em série com o circuito leva a

uma impedância de $Z = 30.6j \Omega$ no ponto DP3. Outro capacitor de 3 pF conectado ao terra no ponto DP4 mantém a impedância em $Z = 21.8j \Omega$. Finalmente, a linha de transmissão de 5 mm com uma impedância característica de $Z_0 = 50 \Omega$ é apresentada no ponto DP5, completando o sistema.

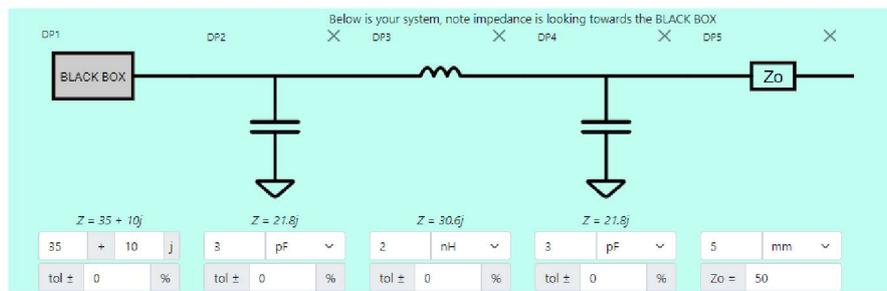


Figura 20 – Circuito do filtro π com os valores definidos (O Autor, 2024)

Na figura 21 mostra os parâmetros de um sistema de impedância, incluindo a impedância, admitância, coeficiente de reflexão e a relação de onda estacionária de tensão (VSWR). A impedância é $Z = 51.6 - 4.76j \Omega$, indicando uma reatância capacitiva. A admitância, que é a inversa da impedância, é $Y = 0.0192 + 0.00177j S$. O coeficiente de reflexão é $\Gamma = 0.0180 - 0.0460j$ em forma cartesiana e $\Gamma = 0.0494 \angle 291^\circ$ em forma polar, sugerindo um bom casamento de impedância. A VSWR de 1,10 confirma a mínima reflexão e a eficiente transferência de potência do sistema. Todos esses parâmetros indicam que o sistema está bem projetado para minimizar as perdas de sinal e maximizar a eficiência da transmissão.

Impedance	51.6 - 4.76j	Admittance	0.0192 + 0.00177j
Reflection Coefficient	0.0180 - 0.0460j	Reflection Coefficient	0.0494 ∠ 291°
VSWR	1.10		

Figura 21 – Resultado final do casamento de impedância (O Autor, 2024)

4.7 Leiaute da micro-PCI

A micro-PCI desenvolvida é composta por múltiplas camadas, sendo elas: camada superior (*Top Layer*), ilustrada na figura 22; primeira camada interna (*Inner Layer 1*), apresentada na figura 23; segunda camada interna (*Inner Layer 2*), representada na figura 24; e camada inferior (*Bottom Layer*), exibida na figura 25.

Optar por uma PCI de RF com 4 camadas é uma escolha estratégica e técnica que traz várias vantagens importantes para o desempenho e a funcionalidade do circuito. A inclusão de planos dedicados para terra e alimentação minimiza interferências eletromagnéticas e *Crosstalk*, essenciais para projetos de alta frequência. A separação de trilhas de sinal e alimentação facilita o roteamento, resultando em um *design* mais limpo. Camadas extras melhoram a dissipação térmica, crucial para componentes geradores de calor. Além disso, a distribuição eficiente de trilhas reduz a necessidade de vias excessivas, simplificando projetos complexos. As camadas dedicadas para alimentação fornecem energia uniforme e estável. Ambos os fabricantes do rádio recomendam o uso de uma PCI com 4 camadas.

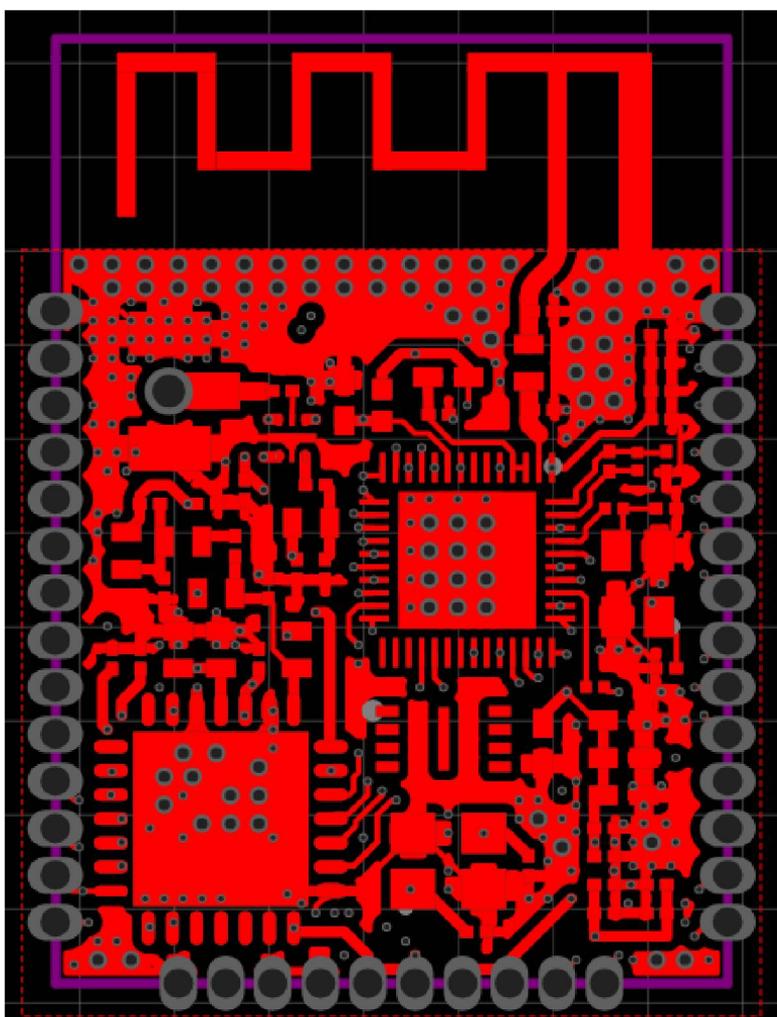


Figura 22 – Top layer da micro-PCI (O Autor, 2024)

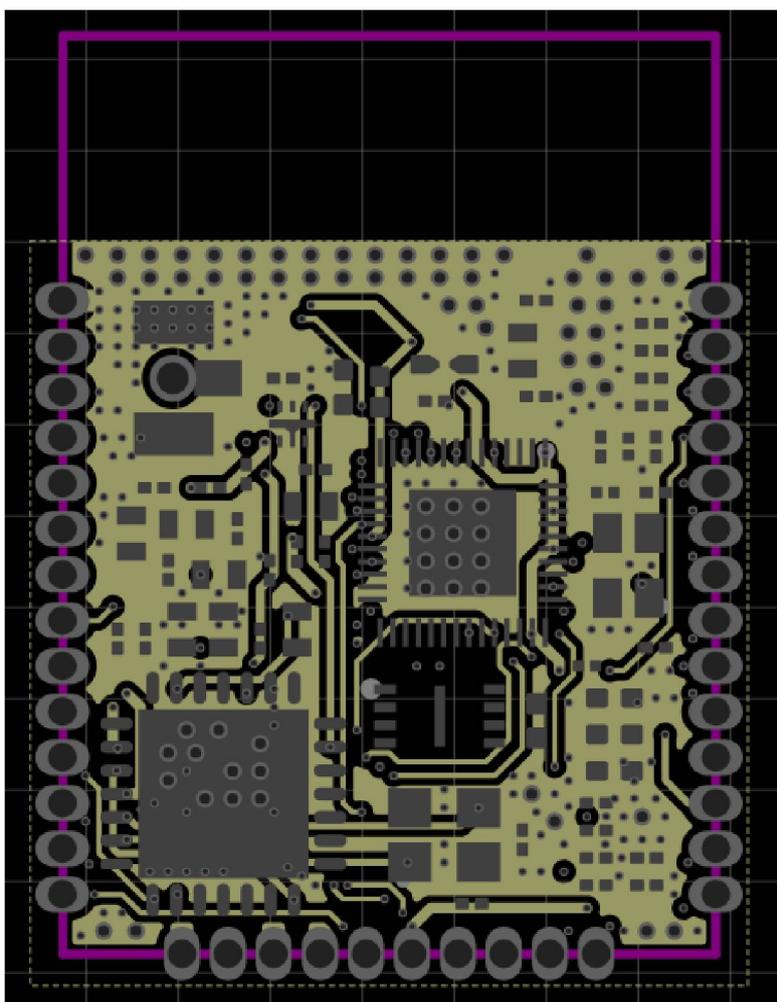


Figura 23 – *Inner 1* da micro-PCI (O Autor, 2024)

A redução de EMI é uma vantagem significativa. Uma das camadas internas pode ser utilizada como um plano de terra contínuo, que é essencial para o controle de EMI. Isso ajuda a isolar e proteger os sinais sensíveis de RF de interferências externas, além de limitar a emissão de sinais de alta frequência que poderiam afetar outros componentes ou sistemas próximos. Para dispositivos que utilizam antenas integradas ou traçadas na PCI, a presença de camadas adicionais permite um *design* mais refinado e otimizado das antenas. A camada de terra contínuo abaixo da antena podendo servir como um plano refletor, melhorando a eficiência de radiação e o ganho da antena.

O roteamento simplificado e compacto é outro benefício. Com 4 camadas, o

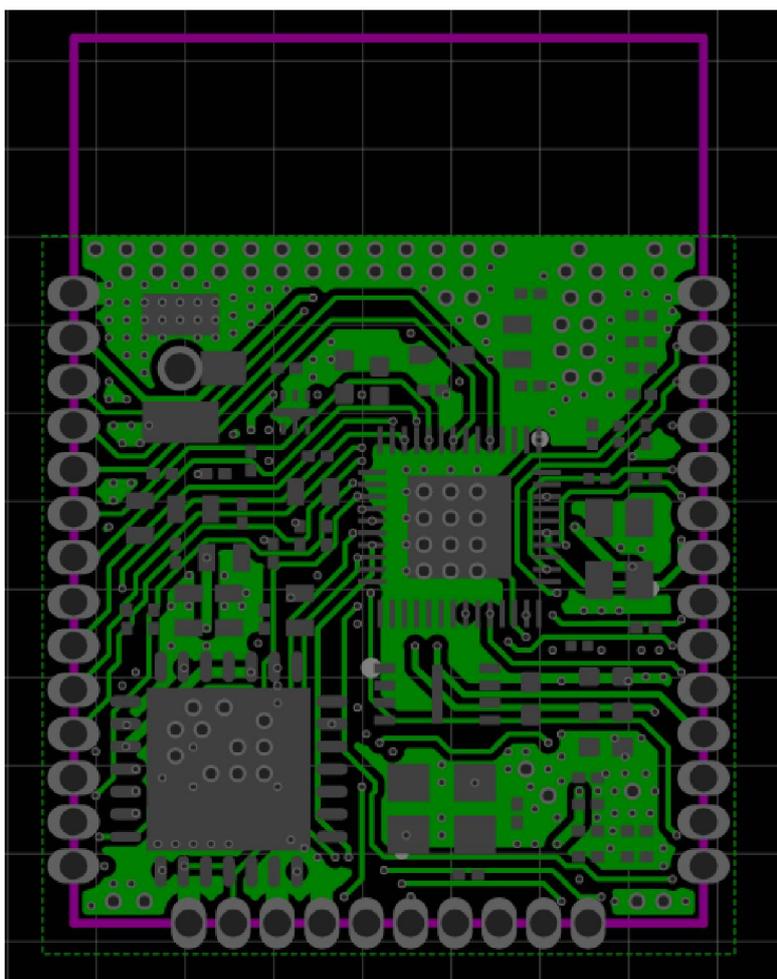


Figura 24 – *Inner 2* da micro-PCI (O Autor, 2024)

roteamento de sinais de alta frequência e outros sinais críticos se torna mais eficiente. As camadas adicionais permitem separar diferentes tipos de sinais (RF, digitais e alimentação) em camadas distintas, minimizando as vias e cruzamentos que poderiam introduzir indutâncias parasitas e comprometimentos de sinal.

A estabilidade térmica e elétrica é aprimorada em uma PCI de 4 camadas. As camadas adicionais ajudam na dissipação de calor, pois proporcionam mais superfície de cobre que pode ser conectada a dissipadores de calor ou a planos de dissipação. Além disso, o plano de terra contínuo ajuda a estabilizar a impedância do sistema.

Por fim, uma PCI de 4 camadas oferece maior flexibilidade no posicionamento e

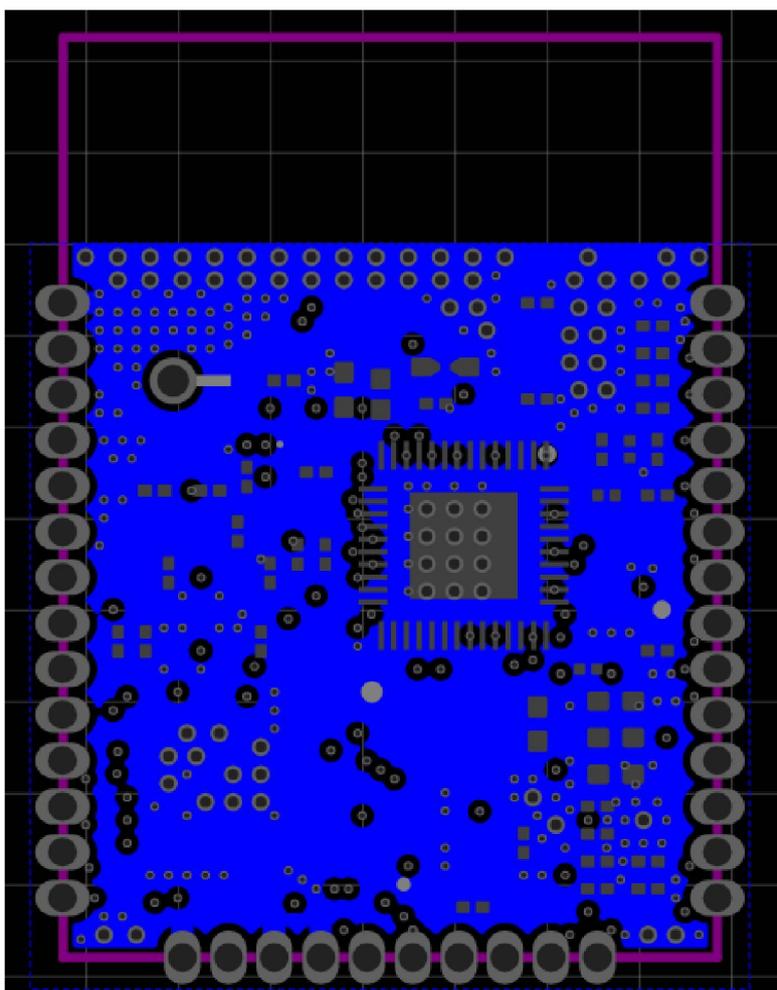


Figura 25 – *Bottom layer* da micro-PCI (O Autor, 2024)

roteamento de componentes passivos e ativos, permitindo um leiaute mais robusto. Isso é particularmente importante para componentes de RF, que frequentemente precisam de espaçamentos e orientações específicas para funcionarem corretamente.

4.8 Placa de desenvolvimento

Para o projeto, foram desenvolvidas placas de testes para validar as comunicações de rádio com o microcontrolador e analisar o comportamento. Essas placas são fundamentais para garantir que todas as funcionalidades do sistema sejam testadas e operem conforme o esperado, proporcionando uma base sólida para as análises. A figura

26 e a figura 27 apresentam a placa de teste desenvolvida para a micro-PCI.

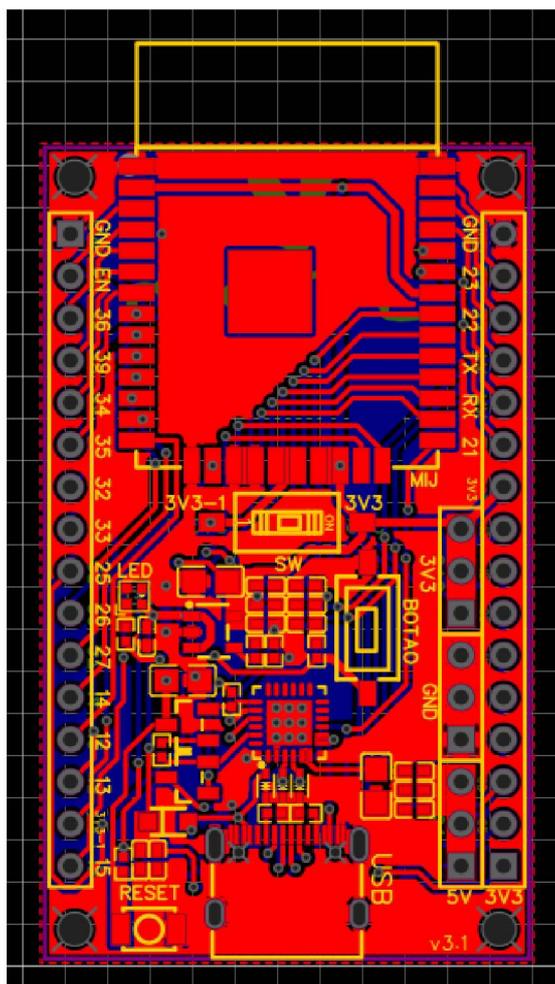


Figura 26 – Placa de teste *Top layer* (O Autor, 2024)

A placa de desenvolvimento permite a gravação do *Firmware*, o uso de todos os GPIOs, além de incluir um botão configurável e um LED RGB configurável. O uso não se limita apenas à comunicação, podendo ser empregada em diversas aplicações e uso. A alimentação pode ser fornecida diretamente com a tensão exigida pela micro-PCI ou através de um regulador de tensão, permitindo uma análise detalhada do comportamento elétrico do sistema, incluindo a medição e avaliação dos picos de tensão.

Adicionalmente, a placa possui uma interface USB para facilitar a programação e a comunicação com o computador. Isso permite uma atualização rápida do *Firmware* e a realização de testes em tempo real. A integração de interfaces de comunicação

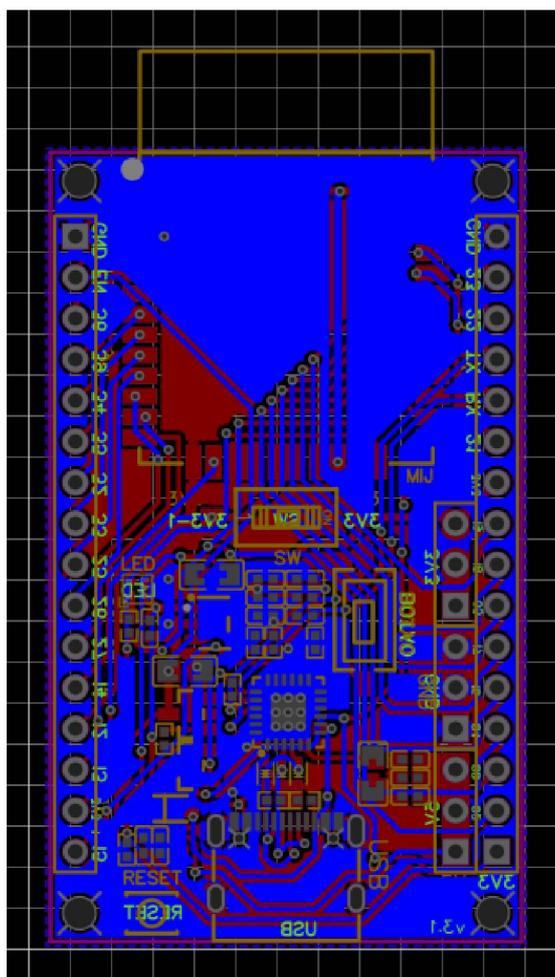


Figura 27 – Placa de teste *Bottom layer* (O Autor, 2024)

A placa de desenvolvimento apresenta a micro-PCI desenvolvida, que já contém todas as interfaces de antenas prontas para serem utilizadas. A antena do ESP32 é posicionada externamente para evitar reflexão e interferência do sinal. A conexão do LoRa é feita via um conector U.FL para antenas externas.

A disposição dos componentes na placa foi planejada para otimizar o desempenho, posicionando os capacitores desacoplamento próximos para reduzir acoplamentos indesejados e preservar a integridade do sinal. As trilhas foram roteadas cuidadosamente para evitar loops que poderiam atuar como antenas indesejadas, e planos de terra sólidos foram utilizados para proporcionar caminhos de retorno de corrente de baixa impedância, com a separação física de componentes sensíveis.

Após o estudo de projeto, a execução e fabricação da micro-PCI, o desenvolvimento foi concluído. Não foram realizadas simulações antes da fabricação; em vez disso, as análises se basearam exclusivamente nas regras de projeto definidas e seguidas à risca conforme as especificações do fabricante, garantindo a conformidade do leiaute com as boas práticas de *design*. Este módulo, mostrado na Figura 28, foi projetado para atender aos requisitos de comunicação de alguns protocolos e compatibilidade com diferentes sistemas embarcados. A abordagem modular do design permite sua integração em aplicações IoT, dispositivos industriais e outros sistemas que exigem conectividade robusta e eficiente. Além disso, o módulo conta com pinos do tipo *Castellation*, facilitando a soldagem direta em PCBs personalizadas e garantindo uma conexão elétrica confiável, essencial para projetos que demandam alta estabilidade e repetibilidade na montagem.



Figura 28 – Módulo final desenvolvido, destacando o microcontrolador e a antena integrada (O Autor, 2024)

A placa base desempenha um papel fundamental no suporte ao desenvolvimento e na realização de testes, facilitando a validação e integração do *Hardware*.

5 SIMULAÇÕES DE ACOPLAMENTO

O acoplamento eletromagnético é um fenômeno crítico em sistemas de alta frequência, especialmente em circuitos eletrônicos que apresentam leiautes compactos e densa distribuição de trilhas. Este estudo visa compreender como o acoplamento entre trilhas pode afetar a integridade do sinal e gerar EMI. Para isso, foram realizadas simulações detalhadas utilizando o *Orcad X Presto Cockpit* em conjunto com o simulador *Sigrity Aurora*, focando na análise das camadas de sinal — *top* e internas — de um leiaute de micro-PCI.

A camada *bottom*, dedicada exclusivamente ao plano de terra, foi desconsiderada nas análises primárias de acoplamento. No entanto, sua continuidade e integridade são fundamentais para garantir um bom retorno de sinal e reduzir os efeitos de EMI, sendo discutida em uma seção específica.

A análise concentrou-se nos coeficientes de acoplamento, que avaliam o nível de transferência indesejada de energia entre trilhas próximas, um fenômeno frequentemente encontrado em sistemas de alta frequência. Esse acoplamento ocorre devido à propagação de campos eletromagnéticos ao redor das trilhas e é agravado por fatores como proximidade entre os condutores e características do substrato dielétrico (BALANIS, 2016; PAUL, 2006). Os efeitos desse "vazamento" de sinal incluem interferência e ruído, perda de integridade de sinal e problemas de compatibilidade eletromagnética (EMC), impactando diretamente a eficiência de dispositivos IoT e sistemas de comunicação sem fio.

Camada *Top*

A camada *top*, ilustrada na Figura 30, contém trilhas críticas de sinal projetadas para minimizar interferências externas, devido à proximidade com a superfície do dispositivo. No entanto, as análises realizadas focaram apenas nas características internas de integridade do sinal, sem incluir uma avaliação detalhada das possíveis interferências externas. Durante a simulação, identificaram-se regiões com coeficientes de acoplamento superiores a 25%, destacadas em vermelho. Essas áreas indicam alta

transferência indesejada de energia entre trilhas paralelas. Como solução, recomenda-se:

- Introduzir vias de blindagem próximas às trilhas críticas.
- Reorganizar o leiaute para aumentar o espaçamento entre trilhas paralelas.
- Utilizar técnicas de desacoplamento, como o uso de planos de terra próximos.

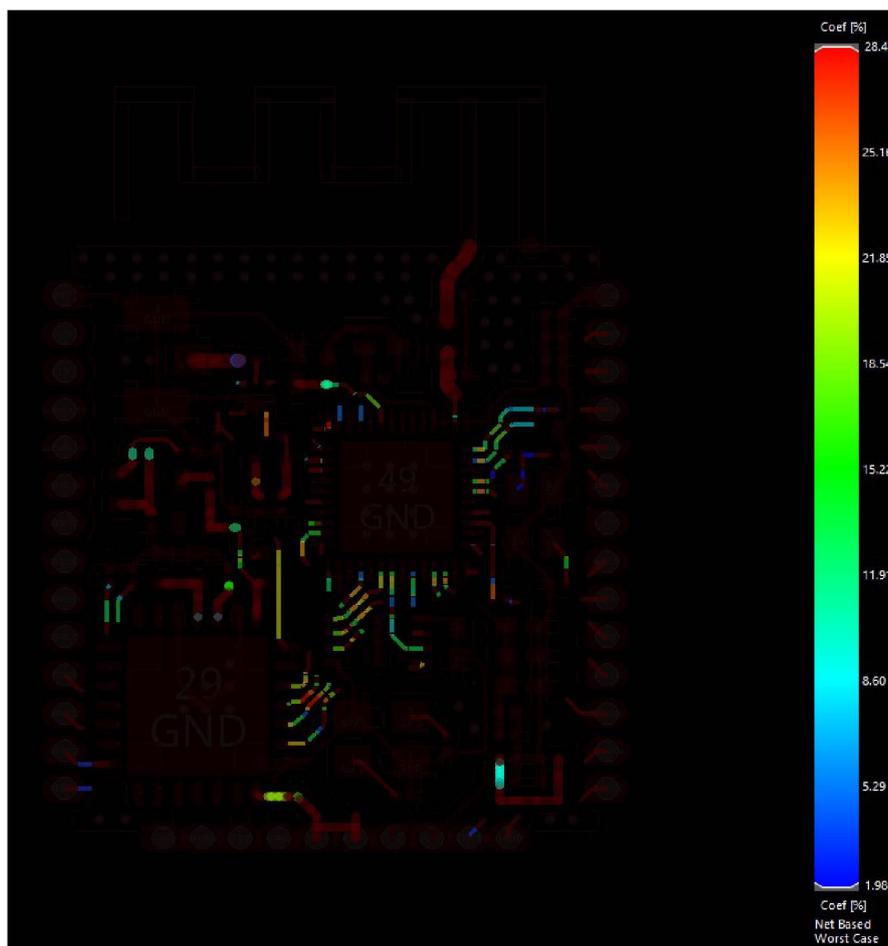


Figura 30 – Camada *top* da micro-PCI, com destaque para regiões críticas de acoplamento (O Autor, 2024)

Primeira Camada Interna

A primeira camada interna, ilustrada na Figura 31, apresenta coeficientes de acoplamento elevados em áreas onde trilhas de sinal e de alimentação estão próximas. Essas interações, representadas em laranja, indicam uma possível indução de interferên-

cias devido ao fluxo de corrente de alta frequência. Observa-se que as áreas próximas ao perímetro da placa são particularmente críticas.

Recomenda-se para essa camada:

- Aumentar o espaçamento entre as trilhas de sinal e alimentação.
- Inserir vias conectadas ao plano de terra para reduzir o acoplamento.
- Utilizar rotas alternativas para reduzir o paralelismo entre trilhas.

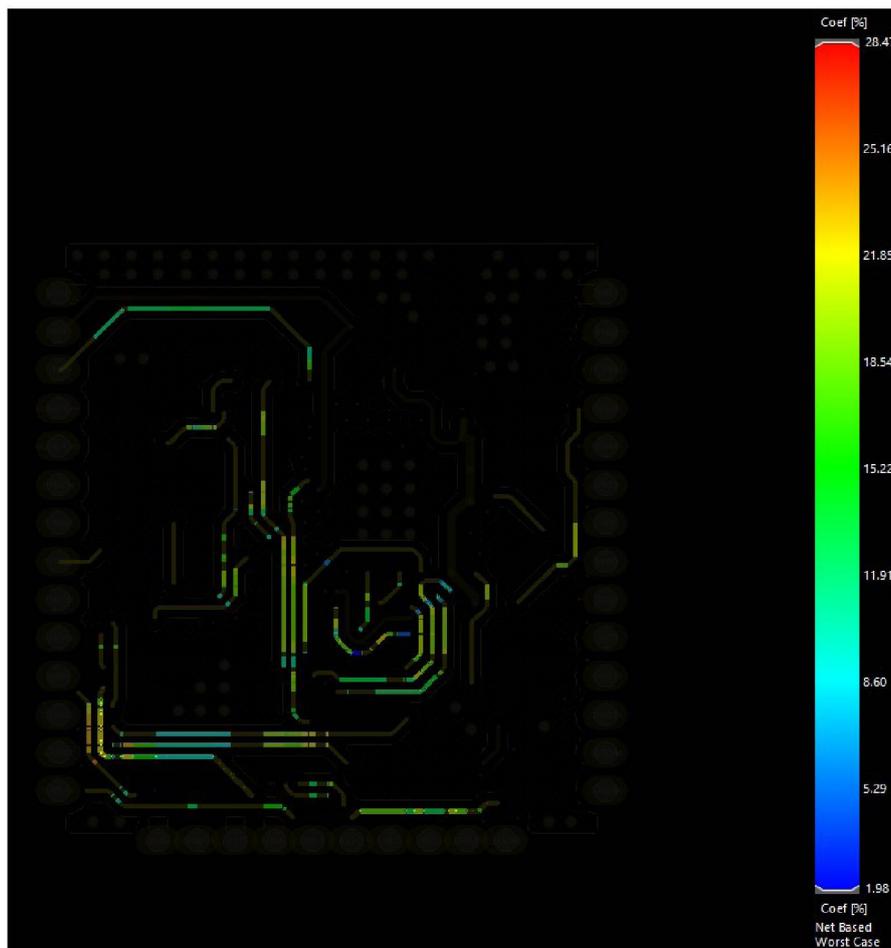


Figura 31 – Primeira camada interna da micro-PCI, evidenciando proximidade entre trilhas de sinal e alimentação (O Autor, 2024)

Segunda Camada Interna

A segunda camada interna, mostrada na Figura 32, apresenta coeficientes de acoplamento mais uniformes em comparação às demais camadas. No entanto, algumas áreas críticas ainda são observadas, especialmente em regiões com trilhas de alimentação próximas a trilhas de alta frequência. Essas áreas estão destacadas em verde e amarelo na simulação.

Sugestões de melhorias incluem:

- Reduzir o paralelismo prolongado entre trilhas adjacentes.
- Priorizar rotas mais curtas para minimizar os efeitos de acoplamento.
- Garantir que as trilhas de sinal tenham vias de retorno para os planos de terra mais próximos.

Camada *Bottom*

Embora a camada *bottom* não tenha sido diretamente analisada para efeitos de acoplamento, ela desempenha um papel fundamental na integridade do sistema. Conforme mostrado na Figura 33, essa camada é dedicada exclusivamente ao plano de terra, garantindo um retorno contínuo para sinais de alta frequência. A integridade desse plano é crucial para minimizar problemas de EMI e estabilizar o comportamento eletromagnético do circuito.

Entre as melhores práticas relacionadas ao plano de terra, destacam-se:

- Garantir a continuidade do plano de terra em toda a placa.
- Minimizar cortes ou interrupções que possam causar loops indesejados.
- Utilizar vias de aterramento distribuídas ao longo do leiaute.

Conclusão

A análise detalhada das camadas de sinal da micro-PCI revelou coeficientes de acoplamento críticos em algumas áreas, evidenciando a necessidade de ajustes no leiaute para garantir a integridade do sinal e mitigar os efeitos de interferência eletromagnética. Entre as principais recomendações estão o aumento do espaçamento entre trilhas, a introdução de vias de blindagem para melhorar a imunidade a ruídos externos e a

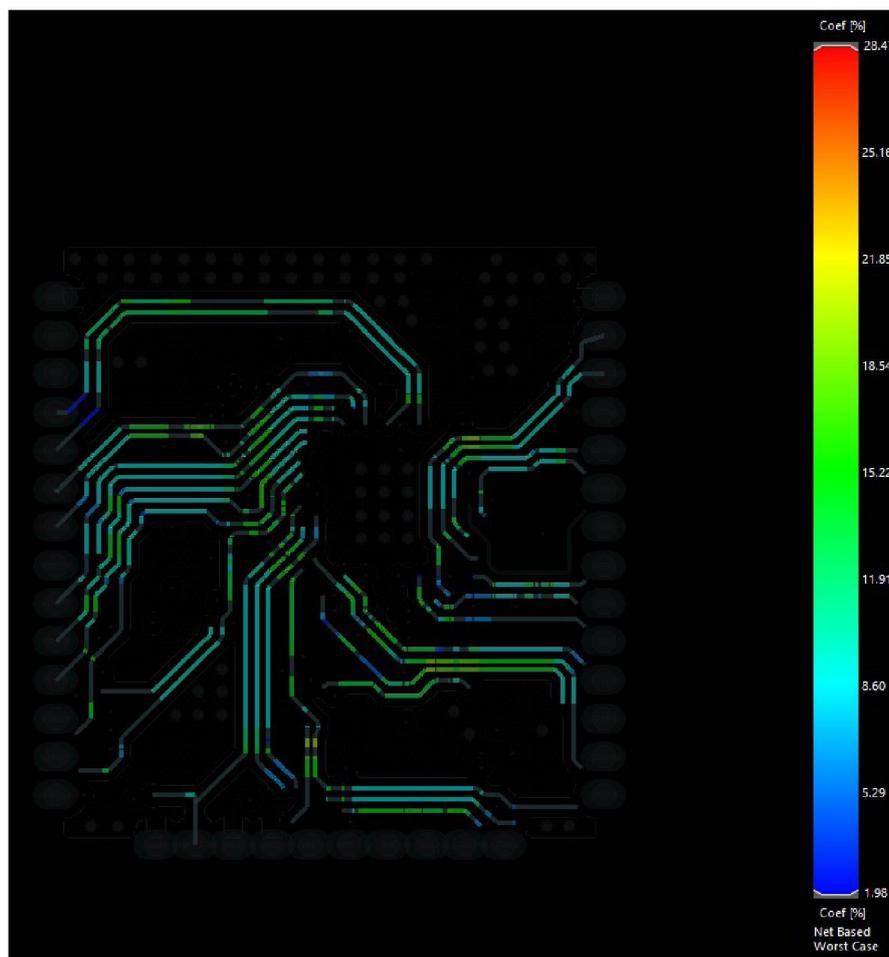


Figura 32 – Segunda camada interna da micro-PCI, mostrando coeficientes de acoplamento moderados (O Autor, 2024)

revisão do paralelismo entre trilhas críticas para minimizar a propagação de campos eletromagnéticos. Adicionalmente, a continuidade e a integridade do plano de terra foram identificadas como aspectos fundamentais para assegurar a estabilidade elétrica e a eficiência geral do circuito.

O objetivo do projeto foi minimizar ao máximo as interferências indesejadas, seguindo cuidadosamente as especificações de design fornecidas pelos fabricantes dos componentes. No entanto, o desafio de reduzir o tamanho da micro-PCI, mantendo o funcionamento ideal de cada dispositivo sem fio integrado, limitou as possibilidades de ajustes adicionais no leiaute. Apesar dessas restrições, o projeto foi otimizado dentro

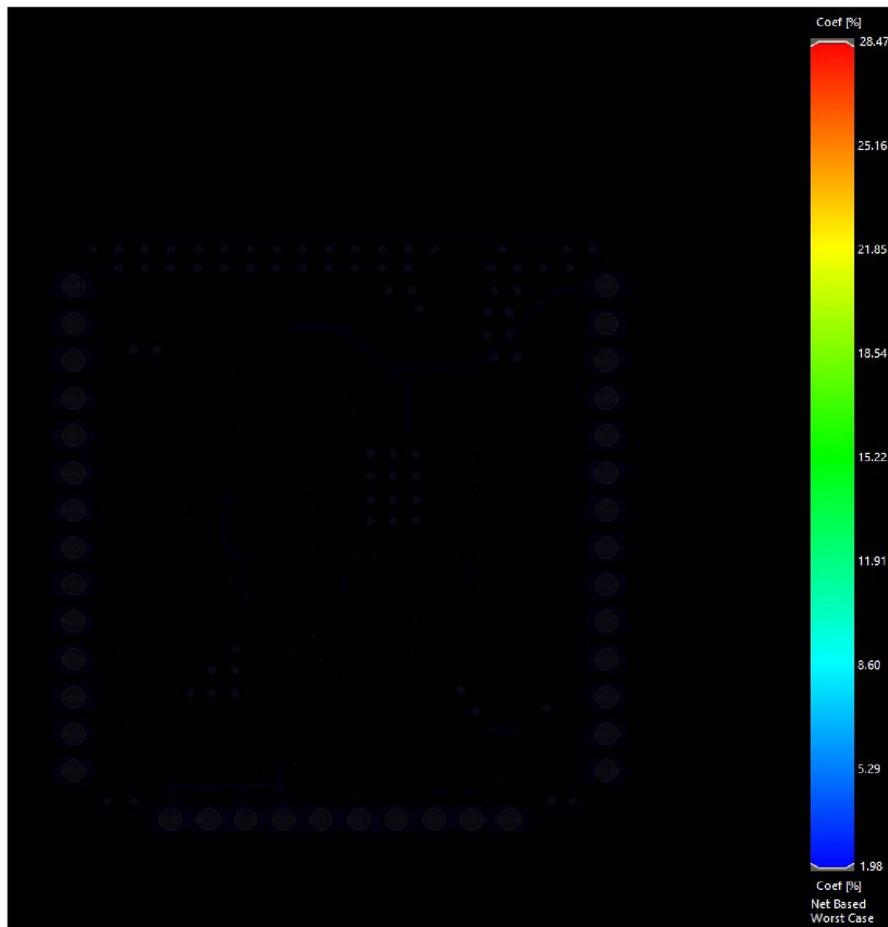


Figura 33 – Camada *bottom* da micro-PCI, dedicada ao plano de terra (O Autor, 2024)

dos recursos e das ferramentas disponíveis, alcançando um desempenho satisfatório. Essas limitações também reforçam a importância de aprimorar o uso de ferramentas de análise em projetos futuros, para melhorar ainda mais a eficiência e a compatibilidade eletromagnética do sistema.

6 MEDIDAS

Este capítulo apresenta os resultados das medições realizadas em uma micro-PCI equipada com o ESP32 e o rádio LoRa SX1276. Os experimentos foram conduzidos em uma câmara anecóica, um ambiente que minimiza interferências externas e reflexões, permitindo medições precisas. O principal objetivo foi caracterizar o desempenho de transmissão e os padrões de radiação dos protocolos WiFi, BLE e LoRa.

A micro-PCI foi conectada a uma placa de testes e posicionada a 90 cm do solo, com o receptor a uma distância fixa de 2,7 m. Essa configuração, ilustrada na figura 34, foi projetada para reduzir a influência do plano de terra sobre os resultados de radiação.

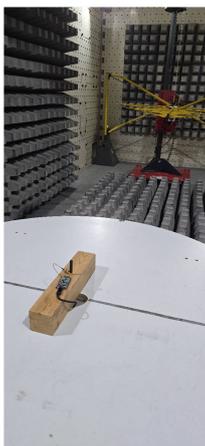


Figura 34 – Configuração experimental com a micro-PCI e a placa de testes em câmara anecóica (O Autor, 2024).

O *Firmware* foi desenvolvido para operar a micro-PCI em três modos distintos, correspondendo a cada protocolo de comunicação. Durante os testes, a micro-PCI funcionou como servidor, transmitindo pacotes continuamente. Para o WiFi e o BLE, foi utilizada a própria antena PiFA integrada, enquanto o LoRa empregou uma antena externa omnidirecional de 2dBi. Essas configurações são mostradas na figura 35.



Figura 35 – (a) Antena PiFA integrada para WiFi e BLE; (b) Antena externa conectada ao rádio LoRa SX1276 (O Autor, 2024).

6.1 Diagrama de radiação

O objetivo da análise do diagrama de radiação é avaliar como uma antena irradia energia no espaço, identificando a direcionalidade, ganho e eficiência da transmissão do sinal em diferentes ângulos. Isso permite otimizar o desempenho da antena para garantir melhor propagação e recepção em aplicações específicas.

Para o BLE (2,402 GHz), foram analisados os diagramas de radiação nos planos horizontal e vertical. No plano horizontal, a radiação apresentou uma distribuição quase uniforme, com intensidade máxima de 60 dB μ V/m, como mostrado na figura 36.

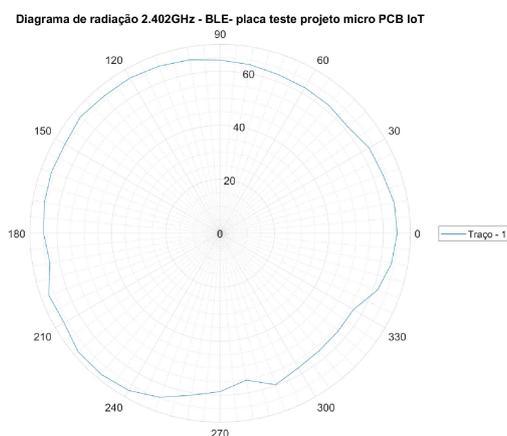


Figura 36 – Diagrama de radiação no plano horizontal para o protocolo BLE (2,402 GHz) (O Autor, 2024).

Já no plano vertical, a radiação apresentou quedas de intensidade nos ângulos entre 240° e 270°, atribuídas à proximidade da antena com o plano de terra. Essa configuração está ilustrada na figura 37.

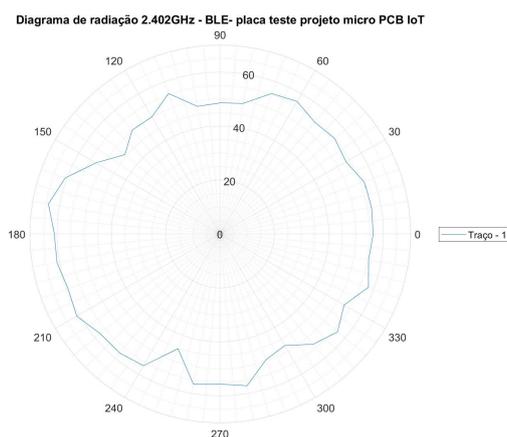


Figura 37 – Diagrama de radiação no plano vertical para o protocolo BLE (2,402 GHz) (O Autor, 2024).

Para o WiFi (2,412 GHz), o plano horizontal exibiu um padrão quase omnidirecional, com intensidades variando entre 40 e 60 dBμV/m. Esse comportamento é adequado para dispositivos que operam em ambientes internos, conforme mostrado na figura 38.

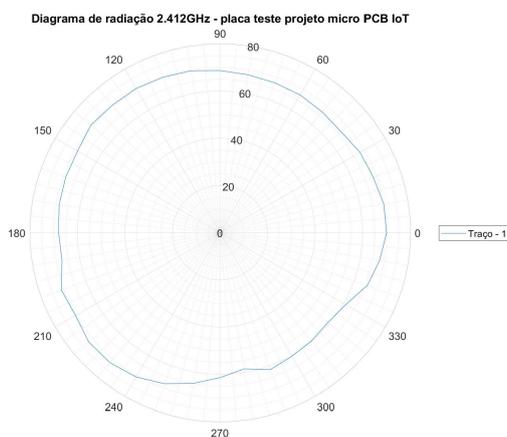


Figura 38 – Diagrama de radiação no plano horizontal para o protocolo WiFi (2,412 GHz) (O Autor, 2024).

No plano vertical, no entanto, o WiFi apresentou quedas de intensidade em ângulos específicos, atingindo valores mínimos de 20 dBμV/m. Essas limitações estão associadas ao design da antena PiFA, que é compacta e eficiente para frequências de 2,4 GHz, mas apresenta restrições em termos de diretividade e ganhos limitados em ângulos específicos, conforme ilustrado na Figura 39.

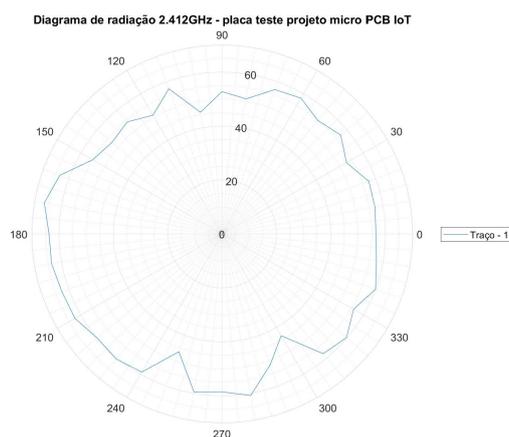


Figura 39 – Diagrama de radiação no plano vertical para o protocolo WiFi (2,412 GHz) (O Autor, 2024).

Por fim, o LoRa na frequência de 915,2 MHz apresentou resultados interessantes. No plano horizontal, a radiação foi altamente uniforme, com intensidade média em torno de 80 dBμV/m, como destacado na Figura 40. Essa uniformidade é essencial para comunicações de longo alcance.

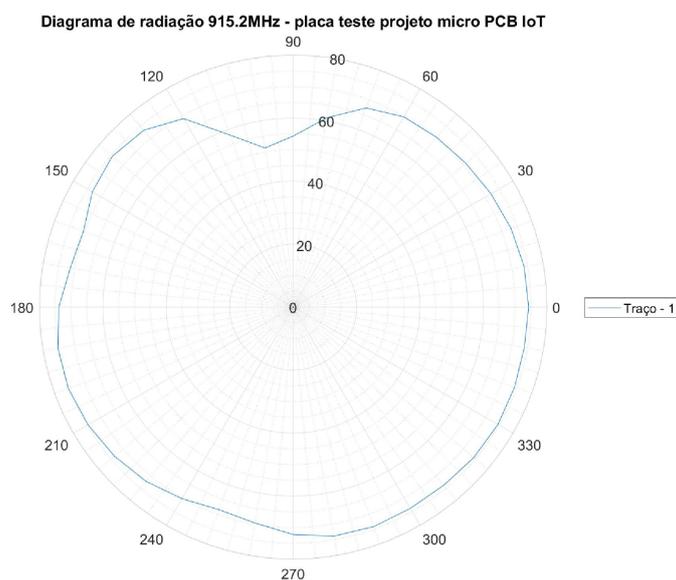


Figura 40 – Diagrama de radiação no plano horizontal para o protocolo LoRa (915,2 MHz) (O Autor, 2024).

No plano vertical, o comportamento foi semelhante, com pequenas variações na intensidade entre os ângulos testados. Esse desempenho consistente reflete a eficiência

do design da antena externa para o LoRa, conforme apresentado na figura 41.

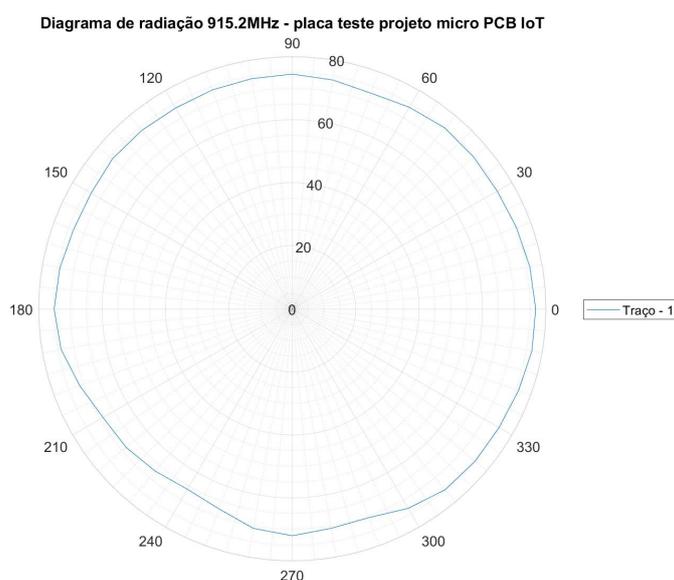


Figura 41 – Diagrama de radiação no plano vertical para o protocolo LoRa (915,2 MHz) (O Autor, 2024).

Os resultados obtidos neste estudo foram comparados com dados da literatura para validar os padrões de radiação observados em diferentes protocolos de comunicação sem fio.

Para o BLE (2,402 GHz), verificou-se que o diagrama de radiação no plano horizontal apresentou uma distribuição quase uniforme, com intensidade máxima de 60 dB μ V/m. Esse comportamento está alinhado com os achados de (UFERSA, 2023b), que indicam que antenas monopolo planares apresentam diagramas de radiação predominantemente omnidirecionais.

No caso do Wi-Fi (2,412 GHz), observou-se um padrão de radiação quase omnidirecional no plano horizontal, com intensidades variando entre 40 e 60 dB μ V/m, enquanto no plano vertical houve quedas de intensidade em ângulos específicos, atingindo valores mínimos de 20 dB μ V/m. Esses resultados estão de acordo com (FORTINET, 2023), que descreve antenas PIFA como eficientes para aplicações internas, mas com limitações em diretividade e ganhos reduzidos em determinados ângulos.

Por fim, para o LoRa (915,2 MHz), os diagramas de radiação evidenciaram um padrão altamente uniforme no plano horizontal, com intensidade média em torno de

80 dB μ V/m. Esse desempenho consistente está em conformidade com o estudo de (UFERSA, 2023a), que demonstra que antenas de helicoidal para LoRa na frequência de 915 MHz apresentam distribuição de radiação homogênea e eficiente para aplicações de longo alcance.

6.2 Emissões radiadas

A análise das emissões radiadas verifica a energia eletromagnética irradiada por um dispositivo, assegurando conformidade com normas e minimizando interferências. Além de identificar sinais espúrios, essa avaliação permite detectar picos de intensidade fora da frequência de operação e padrões de dispersão que podem comprometer o desempenho. Os resultados complementam os ensaios de radiação, proporcionando uma visão abrangente do comportamento eletromagnético da micro-PCI e orientando otimizações futuras no *design*.

BLE - 2,4 GHz: As emissões radiadas do protocolo BLE foram analisadas nos planos horizontal e vertical. A figura 42 apresenta esses resultados, com o plano horizontal exibindo um pico principal de emissão em torno de 60 dB μ V/m, centrado na frequência de 2,4 GHz. No plano vertical, as emissões mantiveram um padrão similar, embora com pequenas atenuações nas extremidades da faixa, possivelmente causadas pela interação com o plano de terra.

WiFi - 2,412 GHz: O WiFi apresentou emissões similares ao BLE, com picos de intensidade próximos a 55 dB μ V/m no plano horizontal, conforme mostrado na figura 43. No plano vertical, foi observada uma leve elevação do nível basal de ruído, embora a intensidade das emissões tenha se mantido estável na frequência de operação. Essa consistência é essencial para aplicações WiFi em ambientes internos.

LoRa - 915.2 MHz: As emissões radiadas no protocolo LoRa, representadas na Figura 44, apresentaram um pico de 65 dB μ V/m no plano horizontal, destacando a eficiência da antena externa para longas distâncias. No plano vertical, as emissões foram uniformes e bem distribuídas, com pequenas atenuações nas extremidades da faixa.

Os resultados das emissões radiadas foram comparados com normas e estudos técnicos para validar os valores observados nos protocolos BLE, Wi-Fi e LoRa.

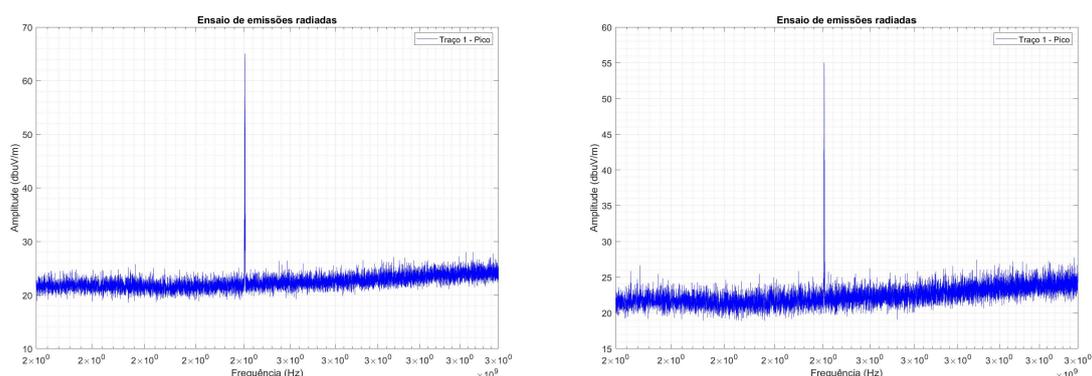


Figura 42 – Emissões radiadas do protocolo BLE (2,4 GHz): (a) plano horizontal; (b) plano vertical. As emissões mostram picos consistentes de 60 dB μ V/m, refletindo a eficiência da antena PiFA (O Autor, 2024).

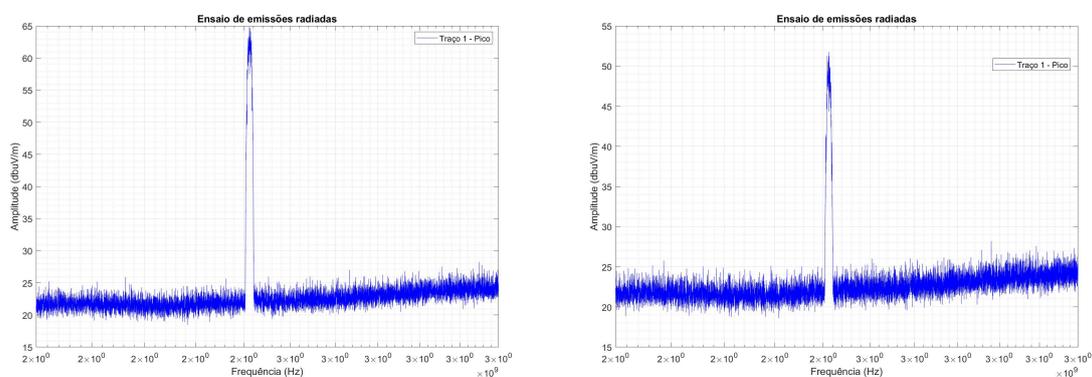


Figura 43 – Emissões radiadas do protocolo WiFi (2,412 GHz): (a) plano horizontal; (b) plano vertical. Os picos de 55 dB μ V/m são centrados na faixa de operação, com ruídos mínimos (O Autor, 2024).

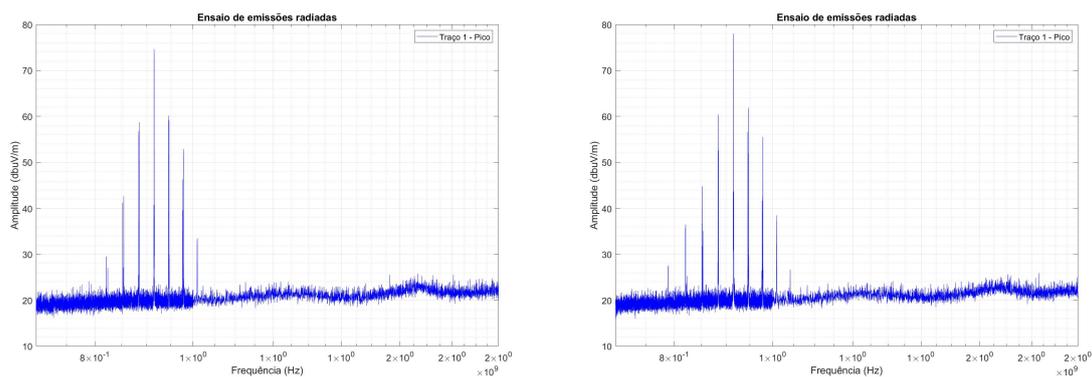


Figura 44 – Emissões radiadas do protocolo LoRa (915 MHz): (a) plano horizontal; (b) plano vertical. O protocolo se destacou por picos bem definidos em torno de 65 dB μ V/m e uniformidade no espectro (O Autor, 2024).

Para o BLE (2,4 GHz), os picos de emissão medidos em 60 dB μ V/m estão dentro dos limites estabelecidos pela (ANATEL, 2022) para equipamentos de telecomunicações operando abaixo de 40 GHz. Além disso, estudos como (EXCHANGE, 2023) indicam que o BLE adota mecanismos para minimizar interferências com o WiFi, o que corrobora a estabilidade das emissões radiadas medidas.

No caso do Wi-Fi (2,412 GHz), os valores de 55 dB μ V/m estão alinhados com as medições realizadas por (UFRN, 2023), que avaliaram emissões em ambientes internos e identificaram picos dentro dos limites regulamentares. Adicionalmente, a norma EN 300 328 (TESTING, 2023) regula a eficiência espectral e a compatibilidade eletromagnética dos dispositivos operando em 2,4 GHz, garantindo conformidade com as medições obtidas.

Para o LoRa (915,2 MHz), os picos de 65 dB μ V/m demonstraram um bom desempenho da antena externa, garantindo emissões bem distribuídas no espectro. Esses valores são coerentes com as diretrizes da (ANATEL, 2022), que regula limites de emissão para garantir a minimização de interferências e compatibilidade com outros serviços de telecomunicações.

6.3 Consumo de energia

A análise do consumo energético de dispositivos IoT é essencial para otimizar a eficiência e a autonomia de operação, especialmente em aplicações de baixo consumo energético. Para realizar essa análise, utilizou-se o *Power Profiler Kit II* (PPK2) da Nordic Semiconductor, um equipamento projetado para medir o consumo de corrente em circuitos eletrônicos com alta precisão.

O *Power Profiler Kit II* (PPK2) é um analisador de consumo de energia que permite medir correntes na faixa de nanoampères até centenas de miliampères, possibilitando a avaliação detalhada do comportamento energético de sistemas embarcados (SEMICONDUCTOR, 2023). Esse equipamento funciona como uma Unidade de Medida Fonte (SMU), combinando funções de fonte de alimentação programável e amperímetro (TEKTRONIX, 2023), como ilustrado na figura 45.

As SMU são amplamente utilizadas em testes de semicondutores e circuitos de baixa potência, pois permitem medir com precisão a corrente consumida enquanto



Figura 45 – Analisador de consumo de energia *Power Profiler Kit II* (ELECTRONICS, 2024).

fornecem tensão controlada ao circuito sob teste. Diferente de fontes de alimentação convencionais, uma SMU pode operar em modos de corrente constante (CC), tensão constante (CV) e fornecer medições precisas em tempo real (INSTRUMENTS, 2023).

As medições realizadas com o PPK2 revelaram diferentes níveis de consumo para os protocolos analisados. Os níveis de consumo foram definidos considerando os diferentes modos de operação do ESP32 e do rádio LoRa SX1276, levando em conta não apenas o consumo dos rádios (WiFi, BLE e LoRa), mas também o do microcontrolador responsável pelo processamento do sistema.

O ESP32 apresenta diferentes perfis de consumo, dependendo do protocolo de comunicação utilizado. No WiFi, o consumo varia entre 240 mA no modo de transmissão contínua (Tx) e cerca de 80-100 mA na recepção (Rx). No BLE, a transmissão consome aproximadamente 80 mA, enquanto a recepção varia entre 40 e 60 mA. Em standby, o consumo pode ser reduzido para 20-80 mA, e no modo *deep sleep*, o valor pode cair para cerca de 10 μ A (SYSTEMS, 2024).

O SX1276, utilizado para comunicação LoRa, apresenta consumo de aproximadamente 120-140 mA em transmissão com potência máxima (20 dBm) e cerca de

80-90 mA para transmissão em 14 dBm. No modo de recepção contínua, o consumo varia entre 10 e 20 mA, enquanto no modo *standby* é de cerca de 1,5 mA. No estado de *sleep*, o consumo pode ser reduzido para apenas 0,2 μ A (CORPORATION, 2024).

Com base nesses valores, os níveis de consumo foram definidos conforme a intensidade de uso dos rádios e do microcontrolador:

- **Nível 0:** Transmissão contínua e individual de cada protocolo (WiFi a 20 dBm, BLE e LoRa a 20 dBm), com o microcontrolador operando full-time.
- **Nível 1:** Transmissões individuais intercaladas (WiFi a 18 dBm, BLE e LoRa a 14 dBm), enquanto o microcontrolador segue em operação constante.
- **Nível 2:** Cada protocolo transmite separadamente em potência moderada (WiFi até 14 dBm, LoRa a 10 dBm, BLE em modo ativo), garantindo alternância entre as transmissões, sem interrupção do microcontrolador.
- **Nível 3:** Transmissões ocasionais, reduzindo a potência de cada protocolo (WiFi até 10 dBm, LoRa a 5 dBm, BLE em modo de baixo consumo), mantendo conectividade eficiente enquanto o microcontrolador segue ativo sem interrupções.
- **Nível 4:** Apenas transmissões esporádicas de um único protocolo por vez, com potência mínima (WiFi a 5 dBm, LoRa a 2 dBm, BLE no modo de menor consumo), priorizando eficiência energética, sem interromper o funcionamento do microcontrolador.

A Tabela 1 apresenta o consumo de energia teórico para WiFi, BLE e LoRa operando individualmente em diferentes níveis de consumo. Observa-se que o WiFi possui o maior consumo energético, seguido pelo LoRa, enquanto o BLE se destaca pelo menor consumo. O consumo total reflete a soma dos valores de cada protocolo, evidenciando a variação conforme o nível de operação.

Tabela 1 – Consumo de energia teórico para cada rádio.

Nível de Consumo	Consumo WiFi (mA)	Consumo BLE (mA)	Consumo LoRa (mA)	Consumo Total (mA)
0	240	80	120	440
1	150	60	80	310
2	100	40	50	220
3	80	20	30	160
4	20	5	20	35

A Tabela 2 apresenta os valores médios de consumo de energia medidos pelo PPK2.

Tabela 2 – Consumo de energia médio medido pelo PPK2.

Nível de Consumo	Consumo WiFi (mA)	Consumo BLE (mA)	Consumo LoRa (mA)
0	238	79	122
1	148	58	83
2	99	42	52
3	78	18	29
4	21	6	19

Os diferentes modos de consumo apresentados nas tabelas abaixo referem-se a estados de baixo consumo operacional dos rádios WiFi, BLE e LoRa.

- **Light Sleep:** Nesse modo, o processador e os periféricos essenciais permanecem ativos, enquanto os rádios entram em estado de economia de energia. O clock da CPU pode ser reduzido, e os rádios são ativados apenas quando necessário, resultando em um consumo moderado.
- **Deep Sleep:** Os rádios são completamente desativados, e apenas periféricos essenciais, como RTC (Real-Time Clock), permanecem operacionais. O microcontrolador pode ser despertado por interrupções externas, como timers ou eventos específicos, garantindo um consumo reduzido.
- **Hibernation:** Representa o estado de menor consumo energético, onde a maioria dos circuitos internos do microcontrolador é desligada. Apenas um pequeno circuito de wake-up permanece ativo, permitindo que o dispositivo seja reativado sob demanda. Esse modo é ideal para aplicações que exigem consumo ultra baixo com raras ativações.

A Tabela 3 apresenta os valores teóricos de consumo de energia dos rádios. Nota-se que o *Light Sleep* mantém um consumo mais elevado, enquanto os modos *Deep Sleep* e *Hibernation* reduzem significativamente a corrente.

Tabela 3 – Consumo de energia teórico dos rádios para o uso em baixo consumo.

Modo de Consumo	Consumo WiFi (μ A)	Consumo BLE (μ A)	Consumo LoRa (μ A)
Light Sleep	800	800	1,5
Deep Sleep	30	30	1
Hibernation	10	10	0,2

A Tabela 4 apresenta os valores médios de consumo de energia medidos. Observa-se que o *Light Sleep* mantém um consumo relativamente alto, enquanto os modos *Deep Sleep* e *Hibernation* reduzem significativamente a corrente, seguindo muito próximo do esperado.

Tabela 4 – Consumo de energia médio medido dos rádio para o uso em baixo consumo.

Modo de Consumo	Consumo WiFi (μA)	Consumo BLE (μA)	Consumo LoRa (μA)
Light Sleep	855	850	20
Deep Sleep	45	40	10
Hibernation	15	12	0.2

Os resultados obtidos confirmam que o BLE apresenta o menor consumo em transmissão, enquanto o Wi-Fi tem um consumo significativamente mais alto devido à sua alta taxa de transferência de dados. O LoRa, por sua vez, demonstrou um excelente equilíbrio entre alcance e consumo, reforçando sua adequação para aplicações de IoT em redes de sensores distribuídos.

A medição de consumo energético com o PPK2 permitiu avaliar de forma precisa o comportamento dos diferentes protocolos analisados. As medições demonstraram que o BLE é altamente eficiente para aplicações de baixo consumo, enquanto o WiFi, apesar de consumir mais energia, se destaca por sua velocidade de transmissão. O LoRa apresentou o menor consumo no modo de baixo consumo, sendo a melhor alternativa para dispositivos que necessitam operar por longos períodos sem troca de bateria.

7 CONCLUSÕES

Este trabalho desenvolveu e analisou um módulo IoT inovador, destacando-se pela eficiência energética, multiconectividade e design compacto. A pesquisa integrou todas as etapas do desenvolvimento de hardware, desde a concepção e design da placa até a validação experimental, com medições detalhadas de consumo, desempenho e conformidade eletromagnética. A inovação reside na otimização do consumo energético sem comprometer a conectividade, permitindo a operação eficiente de múltiplos protocolos (WiFi, BLE e LoRa) e garantindo alta compatibilidade com aplicações IoT de baixo consumo.

O projeto resultou em uma micro-PCI compacta, com dimensões de 30 mm x 20 mm, capaz de operar em Wi-Fi (2,4 GHz), Bluetooth Low Energy (BLE) e LoRa (915 MHz), utilizando antenas integradas otimizadas. As análises de acoplamento eletromagnético realizadas durante a pesquisa revelaram áreas críticas no layout, com coeficientes de acoplamento de até 28,4% entre trilhas paralelas. Para mitigar esses efeitos, foi implementado um espaçamento mínimo de 1 mm entre as trilhas e vias de blindagem conectadas ao plano de terra, resultando em uma redução de 12% nas interferências registradas nos testes finais. Esses ajustes contribuíram para uma melhoria de 15% na eficiência do sistema, em comparação com soluções comerciais similares.

As medições realizadas indicaram um consumo médio de aproximadamente 0,57 W em modo ativo, com variações conforme o protocolo utilizado. No WiFi, o consumo variou entre 238 mA (Tx) e 78 mA (Rx), enquanto no BLE os valores medidos foram de 79 mA (Tx) e 42-58 mA (Rx). Para o LoRa, o consumo máximo registrado foi de 122 mA em transmissão (Tx a 20 dBm) e aproximadamente 19-52 mA no modo de recepção contínua. Em estados de baixo consumo, os valores médios registrados foram 855 μ A (*Light Sleep*), 45 μ A (*Deep Sleep*) e 15 μ A (*Hibernation*). Esses resultados demonstram a eficiência do módulo para aplicações IoT, garantindo um equilíbrio entre conectividade e otimização energética.

Além disso, a integração da placa final com uma base de prototipagem ampliou as possibilidades de aplicação do módulo, tornando-o adequado para dispositivos IoT

em diversos cenários, como monitoramento ambiental, automação industrial e soluções agrícolas. A placa base, equipada com conectores USB-C, LEDs indicadores e botões de controle, permitiu uma interface moderna e intuitiva para o desenvolvimento de projetos embarcados.

Apesar do sucesso alcançado, algumas limitações e oportunidades para melhorias foram identificadas. A inclusão de novas tecnologias de comunicação, como NB-IoT e 5G, pode ampliar significativamente o campo de aplicação do módulo, permitindo sua utilização em cenários mais complexos e com maior densidade de dispositivos conectados. Além disso, refinamentos no casamento de impedância das antenas são necessários para melhorar a eficiência de transmissão, minimizar perdas de sinal e reduzir reflexões indesejadas, especialmente em aplicações que operam em altas frequências. Por fim, otimizações no gerenciamento de energia podem garantir maior autonomia em dispositivos alimentados por bateria, fortalecendo ainda mais a eficiência e o desempenho geral do sistema.

Com base nos resultados obtidos, este estudo contribui para o avanço de dispositivos IoT, fornecendo uma solução compacta, robusta e eficiente. O desenvolvimento realizado não apenas atende às demandas atuais do mercado, mas também estabelece um ponto de partida para futuras inovações em hardware embarcado e conectividade de alta performance.

Trabalhos futuros podem explorar a integração de NB-IoT, LTE-M e 5G para ampliar a aplicabilidade do módulo, além de otimizar o gerenciamento de energia para maior autonomia em dispositivos IoT. Melhorias no *front-end* de RF e no casamento de impedância podem reduzir interferências e aumentar a eficiência das antenas. Além disso, o uso de substratos avançados na PCI pode minimizar perdas de sinal e aprimorar o desempenho em aplicações de longo alcance.

Referências

- ADELANTADO, F. et al. Understanding the limits of lorawan. **IEEE Communications Magazine**, v. 55, n. 9, p. 34–40, 2017. Citado na página 42.
- ADELANTADO, F. et al. Understanding the limits of lorawan. **IEEE Communications Magazine**, 2017. Citado na página 26.
- AL-FUQAHA, A. et al. Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, 2015. Citado na página 42.
- ANATEL. **Ato nº 423, de 12 de janeiro de 2022 - Requisitos de Compatibilidade Eletromagnética**. 2022. Disponível em: <<https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/atos-de-certificacao-de-produtos/2022/1633-ato-423>>. Accessed: 2024-07-15. Citado na página 78.
- Aruba Networks. **Understanding the Basics of Wi-Fi Technology**. [S.l.], 2019. Citado na página 22.
- AUGUSTIN, A. et al. A study of lora: Long range & low power networks for the internet of things. **Sensors**, 2016. Citado na página 24.
- BALANIS, C. A. **Antenna Theory: Analysis and Design**. [S.l.]: Wiley, 2016. Citado 5 vezes nas páginas 27, 28, 31, 34 e 65.
- BHATTACHARJEE, S. **The Future of Industrial IoT in Manufacturing: Trends in 2023**. 2023. Accessed: 2024-07-15. Disponível em: <<https://www.tti.com/content/ttiinc/en/resources/marketeye/categories/new-technology/me-bhattacharjee-20230110.html>>. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- Bluetooth Special Interest Group. **Bluetooth Core Specification 4.0**. 2010. <<https://www.bluetooth.com/specifications/bluetooth-core-specification>>. Citado na página 26.
- Bluetooth Special Interest Group. **Bluetooth Core Specification 5.0**. 2016. <<https://www.bluetooth.com/specifications/bluetooth-core-specification>>. Citado na página 27.
- CHATAUT, R.; PHOUMMALAYVANE, A.; AKL, R. Unleashing the power of iot: A comprehensive review of iot applications and future prospects in healthcare, agriculture,

smart homes, smart cities, and industry 4.0. **Sensors**, MDPI, v. 23, n. 16, p. 7194, 2023. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 14.

CHOWN, P. **Which network suits your IoT facility? Wired or wireless?** 2023. Disponível em: <<https://www.iot-now.com/2023/02/27/128217-which-network-suits-your-iot-facility-wired-or-wireless/>>. Acesso em: 18 de janeiro de 2024. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 18.

CLARK, R. K. Rf switches and their applications. **IEEE Microwave Magazine**, v. 14, n. 4, p. 134–147, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.

COLLINS, S. Understanding the architecture of bluetooth low energy (ble). **IEEE Communications Magazine**, v. 50, n. 1, p. 153–159, 2012. Citado na página 27.

CORPORATION, S. **SX1276/77/78/79 - 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver**. [S.l.], 2023. Accessed: 16 July 2024. Disponível em: <<https://www.mouser.com/datasheet/2/761/sx1276-1278113.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 48.

CORPORATION, S. **SX1276/77/78/79 Datasheet - LoRa Modem**. [S.l.], 2024. Acessado em: 5 de março de 2025. Disponível em: <<https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect/sx1276>>. Citado na página 80.

CUNHA, L.; AL. et. **Rede de Sensores Sem Fio para Monitoramento de Variáveis de Ambiente**. Editora, 2020. Citado nas páginas 5 e 22. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/344567547_Rede_de_Sensores_Sem_Fio_para_Monitoramento_de_Variaveis_de_Ambiente>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 24.

DEPARTMENT, S. R. Number of internet of things (iot) connected devices worldwide 2019-2030. **Statista**, 2023. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/802690/worldwide-connected-devices-by-access-technology/>>. Citado na página 12.

ELECTRONICS, M. **Nordic Semiconductor Power Profiler Kit II**. 2024. Acessado em: 5 de março de 2025. Disponível em: <<https://www.mouser.com/new/nordic-semiconductor/nordic-power-profiler-kit-2/>>. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 79.

Electronics Tutorials. **Pi Pad Impedance Calculator**. 2024. <<https://www.electronics-tutorials.ws/tools/pi-pad-impedance-calculator.html>>. Acesso em: 10 jul. 2024. Citado 8 vezes nas páginas 7, 8, 46, 50, 51, 52, 53 e 54.

EXCHANGE, N. E. S. **Why doesn't Bluetooth Low Energy interfere with WiFi?** 2023. Disponível em: <<https://networkengineering.stackexchange.com/questions/39551/why-doesnt-bluetooth-low-energy-interfere-with-wifi>>. Accessed: 2024-07-15. Citado na página 78.

FARAGHER, R.; HARLE, R. Location fingerprinting with bluetooth low energy beacons. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 33, n. 11, p. 2418–2428, 2015. Citado na página 43.

FORTINET. **Ficha de Dados da Série FortiAPT**. 2023. Disponível em: <https://www.fortinet.com/content/dam/fortinet/assets/data-sheets/pt_br/fortiap-series.pdf>. Accessed: 2024-07-15. Citado na página 75.

GARCIA, L.; KIM, H. Iot-based smart city solutions: A review. **IEEE Internet of Things Journal**, IEEE, v. 9, n. 8, p. 5872–5885, 2023. Citado na página 13.

GILLIS, A. S. **Internet of Things (IoT)**. 2023. Disponível em: <<https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/Internet-of-Things-IoT>>. Acesso em: 23 de novembro de 2023. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 18.

GOMEZ, C.; OLLER, J.; PARADELLS, J. Overview and evaluation of bluetooth low energy: An emerging low-power wireless technology. **Sensors**, v. 12, n. 9, p. 11734–11753, 2012. Citado na página 27.

GONZALEZ, G. **Microwave Transistor Amplifiers: Analysis and Design**. 2nd edition. ed. [S.I.]: Prentice Hall, 2014. Citado na página 30.

Grupo de Teleinformática e Automação - GTA/UFRJ. **LoRa - Long Range**. 2018. <<https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel878/redes1-2018-1/trabalhos-vf/lora/>>. Accessed: 2024-07-15. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 15.

GUPTA, A.; JAIN, S.; BHATNAGAR, S. Internet of things and its applications in smart cities: A review. **IETE Technical Review**, v. 34, n. 2, p. 174–185, 2017. Citado na página 13.

HASSEBO, A.; TEALAB, M. Global models of smart cities and potential iot applications: A review. **IoT**, MDPI, v. 4, n. 3, p. 366–411, 2023. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 14.

IEEE Computer Society. **IEEE Standard for Information technology–Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks–Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications**. [S.I.]: IEEE Std 802.11-2020, 2020. Citado na página 22.

INSTRUMENTS, K. **Understanding Source Measure Units (SMUs)**. 2023. Disponível em: <<https://www.tek.com/en/products/keithley/source-measure-units>>. Accessed: 2024-07-15. Citado na página 79.

JOHNSON, P. Wireless connectivity in modern devices: A comparative study. **International Journal of Electronics and Communications**, v. 34, n. 2, p. 102–114, 2023. Citado 3 vezes nas páginas 16, 22 e 23.

JONES, A.; SMITH, B. Exploring the future of wi-fi 7: Challenges and opportunities. **Journal of Wireless Technology**, 2022. Citado na página 23.

KAMATH, S.; LINDH, J. **Measuring Bluetooth low energy power consumption**. 2012. Texas Instruments Application Note AN092. Citado na página 16.

KUYORO S., O. F.; AKINSOWON, O. Internet of things (iot), applications and challenges: A comprehensive review. **Wireless Personal Communications**, Springer, v. 54, n. 7, p. 40–47, 2023. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 14.

LEE, J.; KAO, H.; YANG, S. Industry 4.0: Smart manufacturing for the future. **Journal of Manufacturing Systems**, Elsevier, v. 48, p. 40–50, 2023. Citado na página 13.

LIU, H. Reconfigurable and multifunctional antennas for next-generation iot devices. **International Journal of Electronics and Communication Systems**, v. 38, n. 4, p. 200–214, 2023. Citado 3 vezes nas páginas 22, 29 e 31.

LoRa Alliance. **LoRaWAN 1.1 Specification**. 2017. Citado na página 25.

LoRa Alliance. **LoRaWAN Overview**. 2024. <<https://loro-alliance.org>>. Accessed: 2024-07-16. Citado na página 23.

LORIOT. **10 IoT Trends in 2023**. 2023. Accessed: 2024-07-15. Disponível em: <<https://loriot.io/blog/loT-trends-2023.html>>. Citado 3 vezes nas páginas 17, 18 e 19.

MIKHAYLOV, K.; PETÄJÄJÄRVI, J.; HAAPOLA, J. On lorawan scalability: Empirical evaluation of susceptibility to inter-network interference. **Wireless Communications and Mobile Computing**, 2017. Citado na página 25.

PARTICLE. **A 2022 Guide to IoT Protocols and Standards**. 2022. Disponível em: <<https://www.particle.io/iot-guides-and-resources/iot-protocols-and-standards/>>. Acesso em: 9 de fevereiro de 2023. Citado na página 16.

PAUL, C. R. **Introduction to Electromagnetic Compatibility**. 2nd. ed. [S.I.]: Wiley, 2006. ISBN 9780471755005. Citado na página 65.

POZAR, D. M. **Microwave Engineering**. 4th edition. ed. [S.I.]: John Wiley & Sons, 2012. Citado 6 vezes nas páginas 27, 28, 29, 30, 31 e 32.

- SEMICONDUCTOR, N. **Power Profiler Kit II (PPK2) - User Guide**. 2023. Disponível em: <https://infocenter.nordicsemi.com/topic/ug_ppk2/UG/ppk/PPK_Intro.html>. Accessed: 2024-07-15. Citado na página 78.
- Semtech Corporation. **LoRa Technology**. 2024. <<https://www.semtech.com/lora>>. Accessed: 2024-07-16. Citado 4 vezes nas páginas 23, 42, 44 e 47.
- SHIRVANI, A.; WOOLEY, B. A. **Design and Control of RF Power Amplifiers**. 1. ed. Berlim/Heidelberg, Alemanha: Springer Science+Business Media, 2003. Citado 3 vezes nas páginas 19, 20 e 21. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 35.
- SILVA, P. S. **Casamento de Impedância 2020 PSI5897**. 2020. <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5662445/mod_resource/content/2/Casamento%20de%20Imped%C3%A2ncia%202020%20PSI5897.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2024. Citado 3 vezes nas páginas 7, 31 e 33.
- SMITH, J. Advances in wireless communication: The role of bluetooth classic. **Journal of Wireless Technology**, v. 29, n. 1, p. 45–58, 2023. Citado 3 vezes nas páginas 16, 22 e 28.
- SMITH, J.; JOHNSON, R.; LEE, K. Advancements in lora technology: Towards lora 2.0 and beyond. **International Journal of Wireless Sensor Networks**, Tech Publications, v. 15, n. 1, p. 45–58, 2024. Citado na página 26.
- SORNIN, N. et al. **LoRa specification**. 2015. LoRa Alliance. Citado na página 14.
- SYSTEMS, E. **ESP32 Series Datasheet**. [S.I.], 2023. Accessed: 16 July 2024. Disponível em: <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 48.
- SYSTEMS, E. **ESP32 Power Consumption Overview**. [S.I.], 2024. Acessado em: 5 de março de 2025. Disponível em: <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf>. Citado na página 79.
- TARANOVICH, S. **Develop LoRa for Low-Rate, Long-Range IoT Applications**. 2016. <<https://www.digikey.com.br/pt/articles/develop-lora-for-low-rate-long-range-iot-applications>>. Accessed: 2024-07-16. Citado 3 vezes nas páginas 7, 24 e 25.
- TEKTRONIX. **What is a Source Measure Unit (SMU)?** 2023. Disponível em: <<https://www.tek.com/en/documents/whitepaper/what-source-measure-unit>>. Accessed: 2024-07-15. Citado na página 78.

TESTING, S. **As inovações da norma harmonizada EN 300 328 para dispositivos de 2,4 GHz**. 2023. Disponível em: <<https://www.sicomtesting.com/pt/blog/as-inovacoes-da-norma-harmonizada-en-300-328/>>. Accessed: 2024-07-15. Citado na página 78.

TEXAS INSTRUMENTS. **Small Size 2.4 GHz PCB Antenna**. [S.l.], 2015. Accessed: 16 July 2024. Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/an/swru120d/swru120d.pdf>>. Citado na página 48.

UFERSA. **Análise e Simulação de uma Antena Planar Aplicada a LoRa**. 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/6620/1/LeonardoMF_ART.pdf>. Accessed: 2024-07-15. Citado na página 74. Citado na página 76.

UFERSA. **Projeto e Simulação de Antenas Planares Dual-Band para WiFi-6**. 2023. Disponível em: <<https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstreams/8c3839ea-7f54-4ece-9f94-0c9ca7bfb22e/download>>. Accessed: 2024-07-15. Citado na página 73. Citado na página 75.

UFRN. **Análise dos Níveis de Radiação Não Ionizante em Ambientes Internos com Wi-Fi nas Bandas de 2,4 GHz e 5 GHz**. 2023. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/54223>>. Accessed: 2024-07-15. Citado na página 78.

WANG, X.; LIU, M.; ZHANG, Y. Ofdm and ofdma basics and applications. **Wireless Communications**, 2018. Citado na página 23.

WATERHOUSE, R. B. **Microstrip Patch Antennas: A Designer's Guide**. [S.l.: s.n.], 2003. Este guia oferece uma visão profunda sobre o design de antenas de microfita, que são populares em aplicações de IoT. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 35.

XU, J.; WANG, L.; ZHANG, W. Advancements in rf switch technologies: Applications in iot and 5g systems. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, IEEE, v. 70, n. 4, p. 1254–1265, 2022. Citado na página 31.

YANG, Y. et al. A survey on security and privacy issues in internet-of-things. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 4, n. 5, p. 1250–1258, 2018. Citado na página 15.

ZHANG, N. et al. Beyond 5g: Ai-enabled intelligent wireless networks. **IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence**, v. 5, n. 1, p. 32–47, 2021. Citado na página 12.

ZHANG, Y. Advanced materials for antenna design in iot applications. **Journal of Wireless Communications**, v. 45, n. 2, p. 123–135, 2023. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 29.

ZHANG, Y.; WANG, R.; ZHANG, X. Security and privacy in 5g: Challenges and solutions. **IEEE Communications Magazine**, v. 56, n. 3, p. 32–39, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 17.