

Caracterização de um módulo de comunicação IoT multipadrão e multibanda

J. V. Alvares¹, ¹A. A. Mariano, ¹B. Leite, ¹M. Souza, ¹A. L. T. Costa, ¹G. H. Flach, ¹L. N. Endrice, ¹I. P. Adam, ²J. B. S. Martins

¹Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil

²Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil

E-mail de contato: joaalvares@ufpr.br

Resumo - Este artigo explora a integração de múltiplas tecnologias de comunicação sem fio, como WiFi, Bluetooth Low Energy (BLE) e LoRa (Long Range), em uma micro-PCI (micro placa de circuito impresso) para aplicações de Internet das Coisas (IoT). Foi analisado o impacto da coexistência dessas tecnologias em um mesmo sistema. Testes de potência de transmissão foram realizados em uma câmara anecoica, mostrando resultados variando de 2.88 dBm a 16.12 dBm para o WiFi, 9.23 dBm a 0 dBm para o BLE e até 14.56 dBm para o LoRa. Além disso, diagramas de radiação evidenciaram uma distribuição quase omnidirecional no plano horizontal e quedas mais acentuadas no plano vertical, características comuns em dispositivos compactos. A integração de uma antena PiFA (Planar Inverted-F Antenna) e um conector U.FL para LoRa mostrou-se eficaz em manter a qualidade da comunicação, tornando o sistema adequado para redes IoT densas e de longo alcance.

I. INTRODUÇÃO

O crescimento das redes de Internet das Coisas impulsionou o uso de tecnologias sem fio como WiFi, BLE e LoRa em aplicações como monitoramento industrial e cidades inteligentes. A integração dessas tecnologias em plataformas compactas, como micro-PCIs, promove avanços significativos, mas enfrenta desafios, como consumo energético e interferências de sinal. A coexistência eficiente desses protocolos exige uma gestão cuidadosa de antenas e energia para evitar conflitos e garantir desempenho em redes densas [1, 6].

Cada tecnologia apresenta vantagens: WiFi oferece alta largura de banda para aplicações exigentes [11]; BLE se destaca pelo baixo consumo energético em comunicações de curto alcance [3]; e LoRa, eficiente em longo alcance, é amplamente usado em redes de sensores [10]. A integração em uma micro-PCI combina essas forças em um dispositivo versátil para diversas aplicações [4].

Nos sistemas multitecnológicos, o comportamento das antenas é crucial, influenciando potência e cobertura do sinal. Antenas LoRa (915 MHz) são geralmente omnidirecionais, cobrindo áreas extensas [9]. Em micro-PCIs com múltiplas antenas, a gestão da coexistência entre WiFi, BLE e LoRa é essencial para reduzir interferências e otimizar o desempenho [2, 8]. Este estudo analisa tais desafios, propondo soluções para o design de antenas e alocação do espectro [7].

As principais contribuições deste artigo incluem:

- A caracterização de uma micro-PCI equipada com padrões de comunicação WiFi, BLE e LoRa;
- A realização de testes em câmara anecoica para diferentes antenas integradas;
- A análise de desempenho com diferentes níveis de potência de transmissão.

II. PROJETO

A. Micro-PCI de teste

A placa micro-PCI integra BLE, WiFi e LoRa, gerenciados por uma MCU. Os transceptores BLE e WiFi operam separadamente, enquanto o LoRa se comunica via SPI. Recursos como LED RGB, botão de teste, chave liga/desliga e conversor USB-Serial facilitam controle e *debug*. A antena PiFA integrada à MCU assegura sinal estável, enquanto GPIOs conectam periféricos externos, e circuitos de alimentação garantem estabilidade operacional.

Placas de teste acompanham a micro-PCI para validar GPIOs e interoperabilidade, especialmente na seção de RF. Essas placas permitem gravação de *firmware*, análise de desempenho elétrico e testes em tempo real por meio da interface USB. A disposição otimizada de componentes e capacitores de desacoplamento reduz interferências, assegurando qualidade de sinal e menor ruído.

A Figura 1-a apresenta a micro-PCI, que possui dimensões de 26 mm x 18 mm. Já a Figura 1-b mostra a placa de teste, desenvolvida para possibilitar a análise e otimização das comunicações sem fio, assegurando a estabilidade e eficiência do sistema em operações IoT multiconectadas. Esta placa tem dimensões de 48 mm x 29 mm.

III. MEDIDAS

A Figura 2 apresenta a configuração do conjunto micro-PCI e placa de testes em uma câmara anecoica. Para caracterizar a micro-PCI, medições de RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) foram realizadas com o analisador de espectro RSA5065N da Rigol e uma antena calibrada, posicionados para minimizar interferências externas. O *Firmware* foi desenvolvido para operar a micro-PCI individualmente nos protocolos WiFi, BLE e LoRa, com transmissão contínua de pacotes

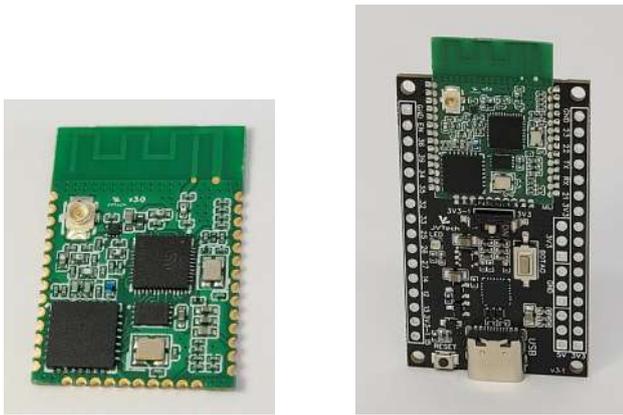


Figura 1: a) *Micro-PCI proposta (imagem à esquerda); b) integração da micro-PCI com a placa de testes (imagem à direita).*

em cada modo, permitindo análises detalhadas. Utilizando o ambiente ESP-IDF e arquivos de suporte do fabricante, os códigos foram ajustados para atender às condições específicas de cada protocolo e garantir a precisão das medições.

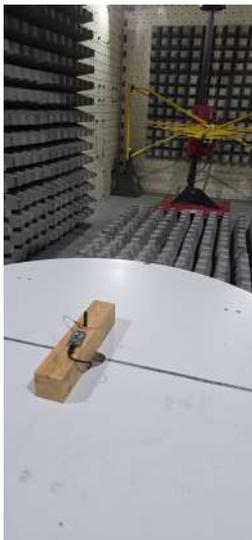


Figura 2: *Configuração montada para os testes da micro-PCI com a placa de testes.*

A. Medidas em câmara anecoica

Durante os testes com a micro-PCI equipada com o ESP32 e o rádio LoRa SX1276, foi mantida uma distância fixa de 2,7 m entre a micro-PCI e o cliente LoRa na câmara anecoica, com a placa posicionada a 90 cm do chão, seguindo as dimensões da câmara para garantir condições adequadas. As medições ocorreram com a potência de transmissão fixa em 20 dBm, sem variações na alimentação ou na saída de potência. A transmissão LoRa foi contínua, enviando pacotes de 10 bytes, com a placa alimentada por um powerbank conectado a um conversor LDO (*Low Dropout Regulator*) para estabilidade. A Figura 3 mostra o cenário de teste com e sem a antena LoRa conectada.

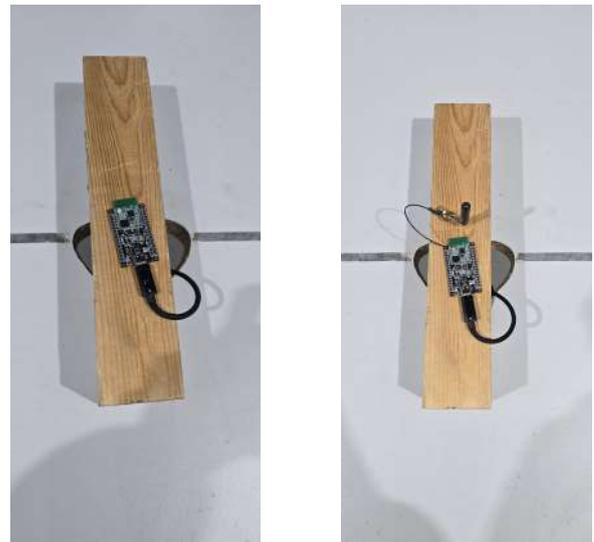


Figura 3: a) *Configuração montada para os testes para os padrões WiFi e BLE (antena PiFA) (imagem à esquerda); b) conexão de antena externa para o padrão LoRa (imagem à direita).*

B. Potência de transmissão

A Tabela 1 apresenta os níveis de potência de transmissão do WiFi no ESP32, medidos com uma antena PiFA otimizada para 2,4 GHz e conectada a um analisador de espectro. Com alimentação de 3,3V, a potência variou de 2,88 dBm a 16,12 dBm, em conformidade com os valores teóricos de 3 dBm a 17 dBm descritos no *datasheet* [5].

A Tabela 2 mostra os resultados da potência de transmissão BLE, obtidos em câmara anecoica. O valor máximo medido foi de 9,23 dBm, próximo ao teórico de 10 dBm, com variações atribuídas a perdas de radiação e ineficiências do sistema.

Tabela 1: Potência de transmissão WiFi do ESP32 com a antena PiFA na câmara anecoica.

Nível de Potência	Potência Medida (dBm)	Potência Teórica (dBm)
0	16,12	18
1	12,95	15
2	9,56	12
3	6,01	9
4	2,88	6

Tabela 2: Potência de transmissão BLE do ESP32 com a antena PiFA na câmara anecoica.

Nível de Potência	Potência Medida (dBm)	Potência Teórica (dBm)
0	9,23	10
1	6,84	8
2	4,68	6
3	2,33	4
4	0,00	2

Os resultados apresentados na Tabela 3 mostram a medição da potência de transmissão do LoRa, considerando o uso de uma antena com ganho de 2 dBi. Observa-se uma redução significativa nos níveis de potência medida devido à combinação

de perdas inerentes ao sistema e ao ajuste de potência da antena. No nível de potência mais alto (originalmente 20 dBm), a potência real caiu para 14,56 dBm. À medida que os níveis de potência foram reduzidos, o impacto das perdas permaneceu proporcional, com a potência atingindo 5,43 dBm no nível mais baixo.

Tabela 3: Potência de transmissão LoRa com antena de 2 dBi na câmara anecoica.

Nível de Potência	Potência Medida (dBm)	Potência Teórica (dBm)
0	14,56	15
1	12,34	13
2	10,06	11
3	7,68	9
4	5,43	7

C. Padrões de radiação

O diagrama de radiação é utilizado para visualizar como a energia eletromagnética é distribuída em torno de uma antena em diferentes direções [6].

Os diagramas de radiação WiFi na frequência de 2,412 GHz apresentam uma distribuição quase omnidirecional no plano horizontal, com picos de 60 dB μ V/m entre 120° e 150° e variações entre 40 e 60 dB μ V/m (Figura 4a). No plano vertical, observam-se quedas para 20 dB μ V/m entre 240° e 270°, enquanto picos de 60 dB μ V/m aparecem entre 90° e 150° (Figura 4b). Essas diferenças devem-se à influência do plano de terra da PCB, mas os resultados são adequados para IoT, onde cobertura uniforme é essencial, característica da antena PiFA.

Os diagramas de radiação para BLE na frequência de 2,402 GHz mostram uma distribuição de sinal consistente, com picos de aproximadamente 60 dB μ V/m nos planos horizontal e vertical. No plano horizontal, a radiação mantém-se bastante uniforme, com pequenas variações ao longo dos ângulos, alcançando valores máximos próximos a 60 dB μ V/m em ângulos como 120° e 150°. No plano vertical, observa-se uma queda mais significativa entre 240° e 270°, onde os valores caem para cerca de 20 dB μ V/m. Esse padrão indica uma boa cobertura omnidirecional no plano horizontal, o que é adequado para comunicações de curto alcance, como BLE, embora haja limitações no plano vertical, comuns em dispositivos compactos. A Figura 5 ilustra o diagrama de radiação obtido durante os testes.

Os diagramas de radiação para LoRa a 915,2 MHz mostram padrão quase omnidirecional no plano horizontal, com picos de 80 dB μ V/m e variações mínimas entre 60 e 80 dB μ V/m. No plano vertical, os valores variam entre 60 e 80 dB μ V/m, com leve queda para 50 dB μ V/m entre 240° e 270° devido à proximidade do plano de terra. A antena LoRa garante cobertura eficiente para aplicações IoT de longo alcance e baixo consumo.

A Figura 6 apresenta os diagramas de radiação obtidos durante os testes.

IV. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou uma análise detalhada do desempenho de uma micro-PCI com ESP32 e transceptor LoRa

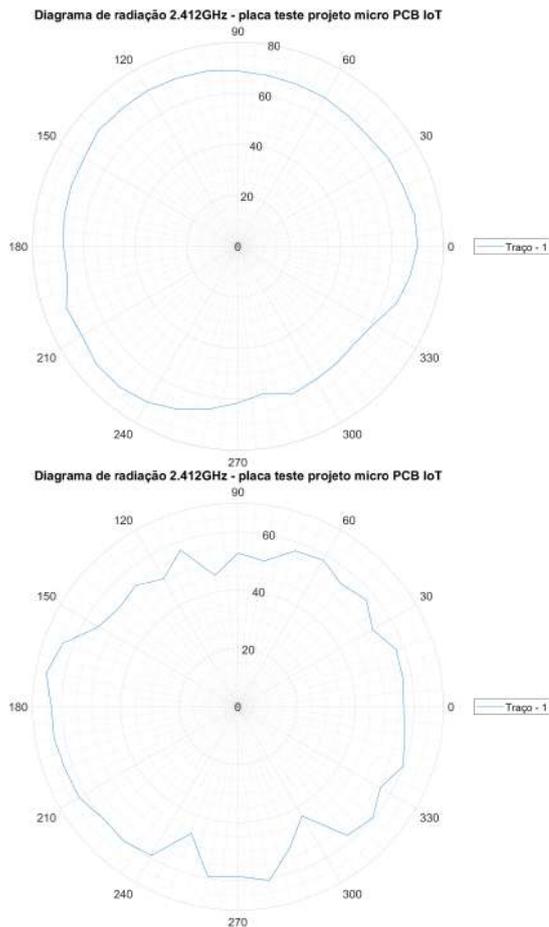


Figura 4: Diagramas de radiação para o padrão WiFi: a) plano horizontal (imagem superior); b) plano vertical (imagem inferior).

SX1276, integrando os protocolos WiFi, BLE e LoRa. Os testes demonstraram que a potência de transmissão para o LoRa variou de 5,43 dBm a 14,56 dBm, com valores estáveis e próximos ao esperado em todos os níveis testados. O BLE exibiu uma potência de transmissão entre 9,23 dBm e 0 dBm, enquanto o WiFi mostrou valores entre 16,12 dBm e 2,88 dBm, mantendo-se dentro dos valores teóricos para cada configuração de potência.

A análise dos diagramas de radiação mostrou uma distribuição uniforme de sinal para o LoRa, com picos de até 80 dB μ V/m, e uma performance estável para o BLE, apesar de quedas em alguns ângulos. Os protocolos WiFi, BLE e LoRa demonstraram eficiência quando operados separadamente na micro-PCI, com desempenho próximo aos valores teóricos de potência, garantindo confiabilidade para aplicações em ambientes de IoT multiconectados.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho apresenta resultados parciais do Projeto Microeletrônica 1A, coordenado pela SOFTEX e apoiado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações do Brasil, com financiamento da Lei de Informática. Também é parcialmente apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

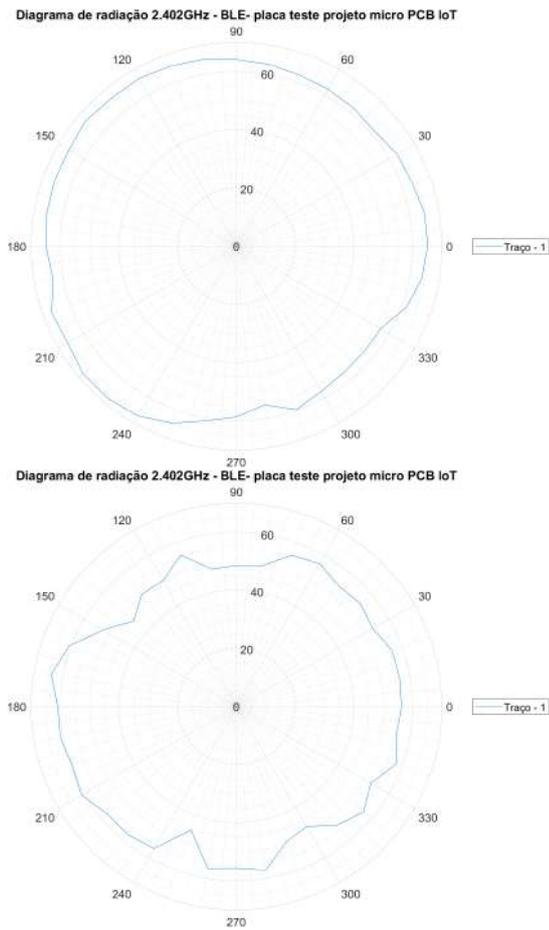


Figura 5: Diagramas de radiação para o padrão BLE: a) plano horizontal; b) plano vertical.

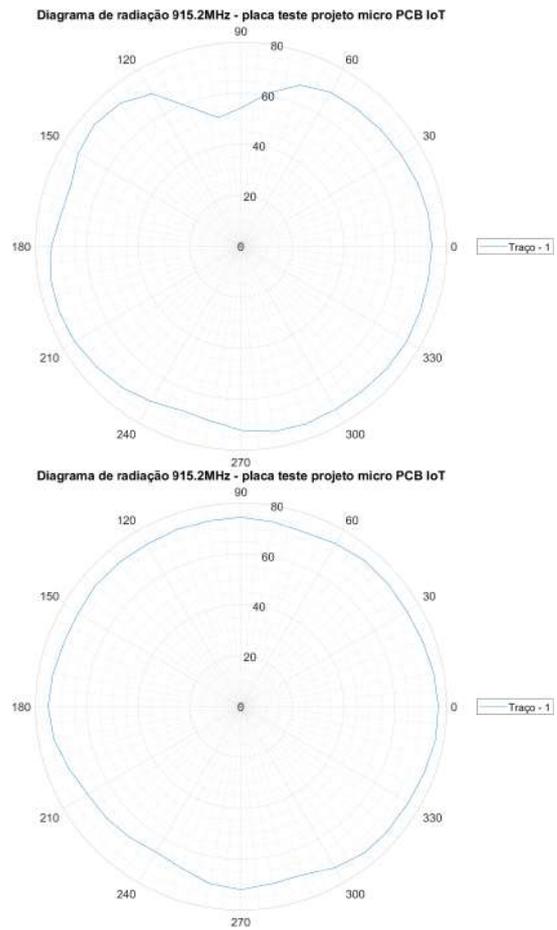


Figura 6: Diagramas de radiação para o padrão LoRa: a) plano horizontal; b) plano vertical.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Silva, M. Santos, and G. Oliveira, "Analysis of Radiation Patterns for IoT Antennas," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 899-910, 2023.
- [2] L. Harris and G. Stone, "Antenna Placement Optimization for Multi-Protocol IoT Devices," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 17, no. 5, pp. 340-348, May 2022.
- [3] D. Johnson and T. Rogers, "Energy Efficiency of BLE for Short-Range IoT Communication," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 578-589, 2022.
- [4] M. Silva and E. Brown, "Design and Optimization of Compact IoT Devices," *IEEE Internet of Things Magazine*, vol. 6, no. 1, pp. 33-42, Jan. 2023.
- [5] Espressif Systems, *ESP32 Series Datasheet*, version 2023. Available at: <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation>. Accessed on: October 31, 2024.
- [6] R. Smith, J. Patel, and M. Li, "Integrated IoT Technologies for Compact Devices," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 110-122, Feb. 2023.
- [7] C. Lee, M. Choi, and P. Kim, "Performance Evaluation of IoT Devices in Multi-Protocol Environments," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 10, no. 1, pp. 22-30, Jan. 2023.
- [8] B. Wang and Y. Liu, "Spectrum Management in Multi-Connected IoT Systems," *IEEE Wireless Communications*, vol. 20, no. 6, pp. 98-105, June 2023.
- [9] J. Wood, K. Nunes, and S. Patel, "Omnidirectional Antennas for LoRa Communication," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 14, no. 2, pp. 75-83, May 2023.
- [10] P. Lee, F. Wang, and H. Chen, "LoRa Applications in Large-Scale Sensor Networks," *IEEE Sensors Journal*, vol. 23, no. 4, pp. 204-215, Apr. 2023.
- [11] S. Park, H. Kim, and R. George, "Advances in WiFi Technology for IoT Devices," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 12, no. 7, pp. 250-260, July 2021.