

Avaliação Experimental de Sistemas WET para Aplicações Indoor

João Roberto Teixeira dos Santos, Victoria Dala Pegorara Souto e Richard Demo Souza

Resumo— A Transferência de Energia sem Fio (WET, do inglês *Wireless Energy Transfer*) via radiofrequência (RF) surge como solução promissora para alimentar dispositivos IoT de forma autônoma e sem manutenção. Este trabalho avalia experimentalmente um sistema WET para Transferência de Informação Sem Fio (WIT do inglês, *Wireless Energy Transfer*) em ambiente indoor, utilizando o kit Powercast P2110-EVAL-01. Foram analisados o padrão de radiação do transmissor e a Taxa de Erro de Quadros (FER), os quais podem ser utilizados para determinar o número mínimo de Power Beacons (PBs) para garantir cobertura adequada. Os resultados demonstram a viabilidade prática da tecnologia WET em aplicações reais de IoT.

Palavras-Chave— Transferência de Energia Sem Fio, IoT, Powercast.

Abstract— Wireless Energy Transfer (WET) via radio frequency (RF) emerges as a promising solution to autonomously and maintenance-free power IoT devices. This work experimentally evaluates a WET system for Wireless Information Transfer (WIT) in an indoor environment using the Powercast P2110-EVAL-01 kit. The radiation pattern of the transmitter and the Frame Error Rate (FER) were analyzed, which can be used to determine the minimum number of Power Beacons (PBs) required to ensure adequate coverage. The results demonstrate the practical feasibility of WET technology in real IoT applications.

Keywords— Wireless Energy Transfer, IoT, Powercast.

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a rápida expansão da Internet das coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*) trouxe consigo uma crescente demanda por soluções energéticas sustentáveis, autônomas e eficientes e de baixa manutenção [1]. Dispositivos IoT vêm se tornando parte do cotidiano em diversas áreas, como casas inteligentes, monitoramento industrial, agricultura de precisão, controle ambiental e tecnologias vestíveis. Apesar desse avanço, muitos desses dispositivos ainda dependem de baterias convencionais para seu funcionamento, o que impõe uma série de desafios, especialmente em situações nas quais o acesso físico aos dispositivos é limitado ou inviável [2].

Nesse contexto, a transferência de energia sem fio (WET, do inglês *Wireless Energy Transfer*) configura-se como uma alternativa viável e promissora. Essa tecnologia possibilita

o fornecimento de energia sem a necessidade de cabos ou contato físico, utilizando ondas de radiofrequência (RF) para alimentar dispositivos de forma remota. Assim, torna-se possível manter sensores operacionais de maneira contínua, sem depender de intervenções humanas para recarga ou substituição de baterias [3], [4].

Motivados pelas vantagens dos sistemas WET, alguns trabalhos têm explorado a aplicação de sistemas WET em cenários práticos. Em [5], os autores propõem um sistema WET para aplicações IoT em aeronaves, focando em sensores de baixa taxa de dados. A pesquisa abordou a otimização da localização e do ângulo de inclinação dos transmissores WET, utilizando programação linear para definir a implantação ideal, validada por experimentos com o kit Powercast P2110-EVAL-01. Já o estudo em [6] analisa o desempenho energético de sistemas RF-WET em dispositivos IoT baseados em BLE, investigando o consumo de energia do chip CC2652R1 e a capacidade de coleta de energia do Powercast P21XXCSR-EVB. A integração desses módulos em um dispositivo IoT alimentado por WET demonstrou a viabilidade da abordagem.

Observa-se que poucos trabalhos na literatura analisam a viabilidade do uso de sistemas WET em ambientes reais. Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar experimentalmente um sistema WET em ambiente indoor. Especificamente, foi conduzida uma campanha de medições utilizando o sistema comercial Powercast P2110-EVAL-01 com objetivo de determinar o padrão de radiação do transmissor utilizado e, diferentemente de [5], [6], este trabalho também apresenta uma análise taxa de erro de quadros (FER, do inglês *Frame Error Rate*) indoor de sistemas WET para transferência de informação sem fio (WIT, do inglês *Wireless Information Transfer*). Através dos resultados obtidos foi possível verificar a influência do alinhamento entre transmissor e receptor e, também, a necessidade de realizar o posicionamento ótimo do transmissor para garantir a cobertura adequada, considerando diferentes restrições de energia para os dispositivos. Portanto, a principal contribuição deste trabalho reside na comprovação prática da aplicabilidade de sistemas WET em cenários reais, o que é fundamental para aplicações emergentes de IoT.

II. SETUP EXPERIMENTAL

Neste artigo, investiga-se a eficiência de sistemas WET para WIT, a partir da utilização do kit de desenvolvimento P2110-EVAL-01 da Powercast ilustrado na Figura 1. Especificamente, o kit P2110-EVAL-01 é composto por um transmissor TX91501-3W-ID, um ponto de acesso WSN-AP-01, placas de avaliação P2110-EVB e placas de sensores WSN-EVAL-01, operando na frequência de 915 MHz [7]. O transmissor

João Roberto Teixeira dos Santos e Victoria Dala Pegorara Souto, Instituto Nacional de Telecomunicações, Santa Rita do Sapucaí, MG, e-mail: {joao.roberto@gea.inatel.br; victoria.souto@inatel.br}; Richard Demo Souza, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, e-mail: richard.demo@ufsc.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo projeto XGM-AFCCT-2024-4-1-1, apoiado pelo xGMobile-EMBRAPII-Inatel Centro de Competência em Redes 5G e 6G, com recursos financeiros do programa PPI IoT/Manufatura 4.0 do edital MCTI número 052/2023, firmado com a EMBRAPII e pela FAPEMIG no âmbito dos projetos nº APQ-05305-23, APQ-04523-23, PPE-00124-23, e RED-00194-23.

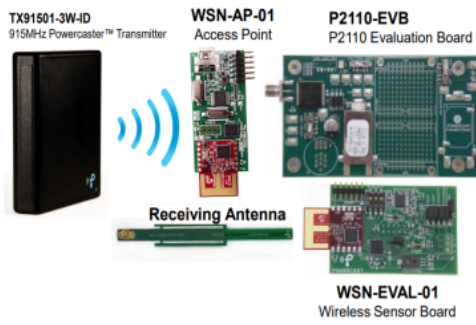


Fig. 1: Kit de desenvolvimento WET P2110-EVAL-01

TABELA I: Especificações do Kit P2110-EVAL-01 [7].

Parâmetro	Especificação
Frequência de operação	915 MHz
EIRP Máximo	3 W
Antena Transmissora	Patch (60° H/V, polarização vertical)
Antena Receptora	Antena Dipolo omnidirecional (1 dBi)
Eficiência RF-DC	$\geq 50\%$ para entrada entre -8 dBm e 8 dBm
Tensão de Saída	Regulada entre $1,8$ V e $5,25$ V
Corrente de Saída	50 mA
Consumo TX/RX/Sleep	109 mW / 92 mW / 1 μ W

TX91501-3W-ID, também denominado PB, possui uma antena do tipo *patch*, com polarização vertical e feixe de radiação com abertura de 60° tanto no plano vertical quanto no horizontal. Sua potência equivalente isotropicamente radiada (EIRP, do inglês *Effective Isotropic Radiated Power*) é de 3 W no eixo principal de transmissão. Em termos de eficiência, o módulo P2110-EVB apresenta conversão RF-DC superior a 50% para potências de entrada entre -8 dBm e 8 dBm [8].

Além disso, as placas de sensores (WSN-EVAL-01) disponíveis possuem integrados sensores para medição de temperatura (25 – 125°F), umidade relativa (15 – 85%) e luminância ambiente (10 – 99.999 lux) integradas. Ademais, os módulos WSN-EVAL-01 também são capazes de medir o valor do indicador de intensidade do sinal recebido (RSSI, do inglês *Received Signal Strength Indicator*) referente a intensidade da potência coletada pelos dispositivos e enviar dados para o ponto de acesso WSN-AP-01. O módulo de comunicação WSN-AP-01 é baseado no padrão IEEE 802.15.4 (ZigBee), operando em $2,4$ GHz, responsável pela transmissão dos dados capturados. Este módulo é conectado a um computador e alimentado via porta USB (do inglês, *Universal Serial Bus*). Além disso, os módulos ZigBee utilizados apresentam consumo de 109 mW durante a transmissão, 92 mW durante a recepção e apenas 1 μ W em modo de repouso, características que os tornam adequados para aplicações de IoT com baixa taxa de dados e ciclos de atividade esporádicos. A Tabela I resume as principais especificações do kit de desenvolvimento WET utilizado neste trabalho.

Visando analisar o modelo de propagação de sistemas WET para WIT em ambientes indoor, foi realizada uma campanha de medições utilizando o sistema comercial Powercast P2110-EVAL-01, previamente descrito. Especificamente, para o experimento conduzido neste artigo, foi implementado um *setup*

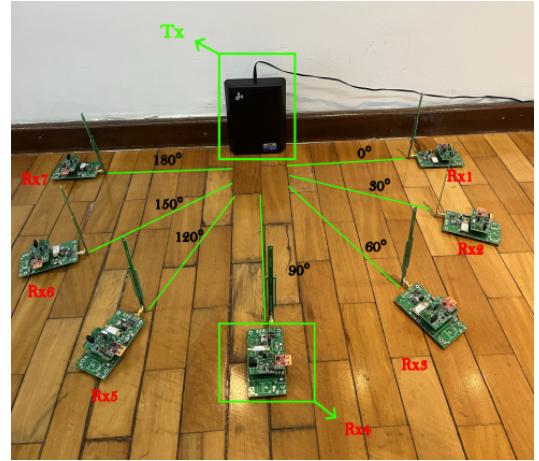


Fig. 2: Setup experimental avaliado.

em ambiente indoor, no qual foram utilizados sete sensores equipados com os módulos P2110-EVB e WSN-EVAL-01, responsáveis pela captura e conversão de energia RF em DC [8]. Ademais, o *setup* foi preparado para registrar o valor do RSSI referente a potência coletada pelos dispositivos, considerando diferentes posições dos sensores. Especificamente, conforme ilustrado na Figura 2, durante o experimento, o PB foi posicionado no centro de um arranjo semicircular, enquanto os sensores foram distribuídos ao longo de um arco de 180° , com espaçamento angular uniforme de 30° entre eles — ou seja, posicionados nos ângulos de 0° , 30° , 60° , 90° , 120° , 150° e 180° em relação ao transmissor. A distância entre o transmissor e os sensores variou de $0,75$ m a 2 m, sendo ajustada a cada três horas para permitir a coleta de energia em diferentes posições e ângulos.

III. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos a partir de 3 horas de medições, realizadas conforme o setup experimental ilustrado na Figura 2. Inicialmente, analisa-se a variação da potência recebida. A Figura 3 mostra a RSSI de energia em função da distância e do ângulo entre transmissor e receptor. As distâncias variaram de $0,75$ a 2 metros e os ângulos de 0° a 180° . Os resultados indicam que a RSSI atinge seu valor máximo quando o sensor está alinhado a 90° , considerado o ângulo ideal para a coleta de energia. À medida que o desalinhamento angular aumenta, especialmente acima de 150° , a eficiência do sistema WET cai drasticamente, evidenciando sua forte dependência angular. Também se observa uma redução progressiva da potência com o aumento da distância. Em distâncias superiores a $1,5$ metros e ângulos desfavoráveis (como 30° e 150°), a potência recebida é praticamente nula, indicando limitações relevantes na transferência de energia. Esses resultados ressaltam a importância do posicionamento adequado do transmissor, sobretudo em relação ao alinhamento angular e à proximidade, fator crucial para aplicações práticas onde o posicionamento ideal nem sempre é viável.

Além da potência coletada, os resultados também permitiram a análise da FER do sistema WIT. A Figura 4 apresenta

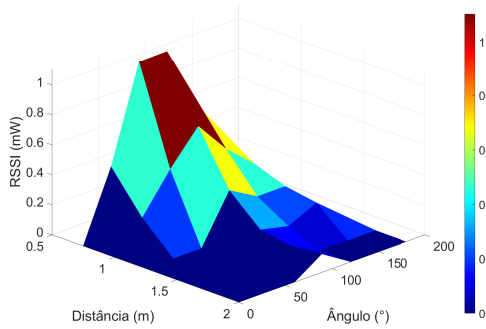


Fig. 3: RSSI para receptores EH em diferentes posições.

o número de amostras recebidas em diferentes distâncias (de 75 cm a 150 cm) e ângulos (30°, 60°, 90°, 120° e 150°) entre transmissor e receptor. Observa-se que, em ângulos menores (30° e 60°), as amostras foram predominantemente registradas nas menores distâncias (75 cm e 100 cm). No ângulo de 90°, considerado o alinhamento ideal, houve recepção em todas as distâncias avaliadas. Por outro lado, ângulos mais extremos (120° e 150°) apresentaram queda acentuada no número de amostras, especialmente acima de 1,25 m. Em alguns casos, não houve qualquer recepção, indicando a inviabilidade da coleta de energia nesses cenários.

Com base nos resultados obtidos, foi determinada a FER para diferentes configurações, conforme apresentado na Tabela II. A análise mostra que, em distâncias menores (75 cm e 1 m), a FER permanece baixa na maioria dos ângulos, indicando recepção eficiente. No entanto, a partir de 1,25 m, observa-se um aumento significativo na taxa de erro, chegando a 100% nos ângulos de 30° e 60°, o que indica falha total na recepção. Esse comportamento evidencia a maior vulnerabilidade do sistema a desalinhamentos, especialmente em distâncias maiores. O ângulo de 150° apresentou os piores resultados, com FER elevada em todas as distâncias, comprometendo seriamente a recepção. Já o ângulo de 120° mostrou desempenho estável até 1 metro, mas também sofreu forte degradação em maiores distâncias. Os dados confirmam que o alinhamento a 90° é o mais favorável para minimizar a FER, enquanto o aumento da distância e o desalinhamento do receptor elevam significativamente a perda de quadros. Esses resultados reforçam a importância do posicionamento otimizado para garantir a eficiência de WET e, consequentemente, garantir a transferência de informação ininterrupta em aplicações IoT.

TABELA II: Análise da FER % do sistema avaliado.

Distância (m)	Ângulo (°)			
	30	60	120	150
0,75	40,04	38,58	19,06	40,92
1,00	80,28	58,78	41,97	61,22
1,25	100,0	100,0	78,03	71,91
1,50	100,0	100,0	99,61	81,82

IV. CONCLUSÃO

Este trabalho investigou a viabilidade da integração de sistemas WET em ambientes indoor para dispositivos IoT,

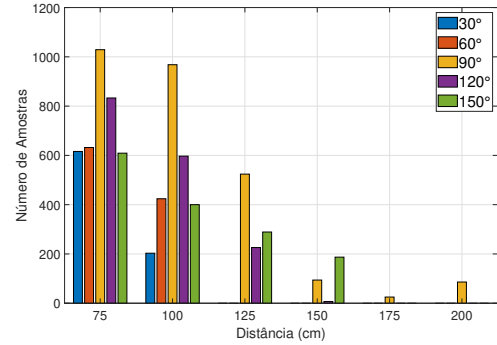


Fig. 4: Número de amostras versus distância entre PB e os dispositivos EH.

utilizando o sistema Powercast P2110-EVAL-01. Os resultados mostraram que o alinhamento ideal entre o transmissor e o receptor é fundamental para garantir a eficiência da coleta de energia, especialmente em distâncias superiores a 1 metro, onde a potência diminui significativamente. Ademais, verificou-se que a FER em sistemas indoor é sensível ao desalinhamento angular e aumento da distância, com desempenho pior em ângulos extremos. O estudo destaca a importância de um planejamento adequado do posicionamento dos transmissores, comprovando a viabilidade do uso de WET em ambientes internos para aplicações IoT, desde que atendidas condições específicas de alinhamento e proximidade. Como trabalho futuro, espera-se utilizar os resultados obtidos para determinação do número mínimo de PBs para garantir a cobertura completa do sistema e o posicionamento ótimo dos PBs em ambientes indoor.

REFERÊNCIAS

- [1] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, and Z. Han, "Wireless Networks With RF Energy Harvesting: A Contemporary Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 2, pp. 757–789, Secondquarter 2015. DOI: 10.1109/COMST.2014.2368999.
- [2] N. Garg and R. Garg, "Energy harvesting in IoT devices: A survey," 2017 International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS), Palladam, India, 2017, pp. 127–131, doi: 10.1109/ISSI.2017.8389371.
- [3] Y. Kumawat, S. Shukla, D. Verma and P. S. Rathore, "Wireless Energy Harvesting and Transfer: A Comprehensive Review of Recent Developments," 2023 IEEE Renewable Energy and Sustainable E-Mobility Conference (RESEM), Bhopal, India, 2023, pp. 1–4, doi: 10.1109/RESEM57584.2023.10236286.
- [4] Alcaraz López, O.L.; Suto, K. RF Energy Harvesting and Wireless Power Transfer for IoT. *Sensors* 2024, 24, 7567. <https://doi.org/10.3390/s24237567>
- [5] M. Tavana, M. Ozger, A. Baltaci, B. Schleicher, D. Schupke and C. Cavdar, "Wireless Power Transfer for Aircraft IoT Applications: System Design and Measurements," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 15, pp. 11834–11846, 1 Aug.1, 2021, doi: 10.1109/JIOT.2021.3072505.
- [6] D. A. Warnakulasuriya, K. Mikhaylov and O. L. Alcaraz López, "Wireless Power Transfer for Bluetooth Low Energy Based IoT Device: an Empirical Study of Energy Performance," 2022 14th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), Valencia, Spain, 2022, pp. 1–7, doi: 10.1109/ICUMT57764.2022.9943345.
- [7] POWERCAST CORPORATION. Documentação. Disponível em: <https://www.powercastco.com/documentation/>. Acessado em: 16 abr. 2025.
- [8] POWERCAST CORPORATION. P2110B Powerharvester Receiver Datasheet. 2016. Disponível em: <https://www.powercastco.com/wp-content/uploads/2021/06/P2110B-Datasheet-Rev-3.pdf>. Acessado em: 16 abr. 2025.