



ANÁLISE DE PROPAGAÇÃO DE SINAIS DE DISPOSITIVOS SEM FIO PARA INTERNET DAS COISAS

Amanda Trindade de Santana Elisiario^{1,2}, Arthur José Cardoso dos Santos², Arnaldo de Carvalho Junior^{1,2}, Walter Augusto Varella^{1,2}

¹Laboratório Maxwell de Micro-ondas e Eletromagnetismo Aplicado, IFSP – BR, ²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Cubatão.
{e.trindade, arthur.cardoso}@aluno.ifsp.edu.br e {adecarvalhojr,varella}@ifsp.edu.br.

Resumo – O século XXI experimentou uma explosão de dispositivos conectados à internet, chamada de a era da Internet das Coisas (*internet of things* - IoT). As redes sem fio desempenham um papel fundamental na interconexão dos dispositivos IoT, tanto sensores quanto atuadores. O objetivo deste trabalho é investigar a propagação de sinais de dispositivos sem fio nas frequências de 900 MHz e 2450 MHz, utilizando dispositivos IEEE 802.15.4 e LoRa.

Abstract: The 21st century has seen an explosion of internet-connected devices, called the age of the Internet of Things (IoT). Wireless networks play a key role in the interconnection of IoT devices, both sensors, and actuators. The objective of this work is to investigate the propagation of signals from wireless devices in the frequencies of 900MHz and 2450 MHz, using IEEE 802.15.4 and LoRa devices.

Palavras-chave: IoT; LoRa; IEEE 802.15.4; WSN; Propagação.

INTRODUÇÃO

A Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT) pode ser entendida como a troca independente de informações entre diferentes dispositivos que são mantidos por determinadas tecnologias, por exemplo, a rede de sensores sem fio (*Wireless Sensor Network* - WSN) [1]. Sua relevância atualmente é tão importante que existe expectativa que em 2025 a sua utilização aplicada em diferentes ambientes alcance uma movimentação financeira de 200 bilhões de dólares por ano, de acordo com um relatório do BNDES [2]. Isso poderá ocorrer por meio da otimização de operações, redução de custo e aumento da produtividade humana [2]. A Indústria 4.0 torna possível a conexão de dispositivos inteligentes (*smart devices*) em ambiente fabril e simplifica processos, isto é, usar de sistemas físico- virtual e abarcar diversas tecnologias para permitir a conectividade na indústria, além disso a quarta revolução industrial diferente das anteriores afeta a sociedade e a economia [3].

Para a implementação da IoT e Indústria 4.0 de fato ocorrer, necessita-se de dispositivos sem fio e através dos microcontroladores que detém de maior capacidade computacional e componentes eletrônicos de baixo custo o uso de dispositivos sem fio para comunicação cresceu. Dentre os dispositivos IoT utilizados na indústria e que possuem baixa largura de banda, destacam-se o ZigBee e o Bluetooth Low Energy (BLE) [4]. Nesse sentido, sabe-se que a faixa de frequências não licenciadas, chamadas de ISM (*Industrial, Scientific, Medical* nos EUA) e regulamentadas pela Anatel (Resolução 680/2017 que trata de equipamentos de radiação restrita), cujas frequências mais utilizadas são a banda de 900 MHz (902 a 928 MHz) e a banda de 2400 MHz (2.400 a 2.483,5 MHz) são mais utilizadas. Nestas faixas de frequências, tecnologias disponíveis comercialmente para prototipagem e desenvolvimento de projetos IoT são o LoRa (*long range*) (900 MHz), Zigbee (IEEE 802.15.4), Bluetooth e WiFi (IEEE 802.11) [5].

O objetivo deste trabalho é apresentar os resultados dos estudos de propagação das tecnologias

Zigbee e LoRa, realizados nas dependências do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP campus Cubatão.

REVISÃO DA LITERATURA

A seguir são apresentados conceitos que serão utilizados neste trabalho.

A. Modelagem Matemática de Propagação de Radiofrequência.

De acordo com a Equação (1) do modelo de propagação do espaço livre [6],[7], quanto maior a frequência utilizada na transmissão, maior a perda de propagação na via (*path loss* – PL). Nesta equação a frequência (F) é dada em MHz, a distância (d) em km e PL em dB.

$$PL = 32.44 + 20 \log(F) + 20 \log(d) \quad (1)$$

A União Internacional de Telecomunicações (International Telecommunication Union – ITU) também elaborou um documento sobre estudos de propagação, inspirado no modelo de propagação do espaço livre, porém adaptado para estudos em ambiente interno (*indoor*), chamado Recomendação ITU-R P.1238-7 [7]. Este modelo é apresentado na Equação (2).

$$PL = 20 \log(F) + N \log(d) + P_f(n) - 28 \quad (2)$$

TABELA 1 – Parâmetros do Modelo ITU-R para 900 e 2400 MHz.

Banda (MHz)	N (dB)	$P_f(n)$ (dB)	n
900	33	9	1
		19	2
		24	3
2400	30	$15+4(n-1)$	n

Onde F é a frequência em MHz, d a distância em metros, $P_f(n)$ é o fator de perda de penetração do andar do edifício em dB, n é o número de andares, e N é o coeficiente de perda de propagação com a distância. Este modelo do ITU faz uso também de algumas tabelas de referência. A Tabela 1 apresenta os valores de N e $P_f(n)$ para o ambiente de escritório.

B. Tecnologias de Redes Sem Fio para IoT.

O protocolo ZigBee utiliza tecnologia sem fio confiável e faz parte do LPWAN (*Low Power Wide Area Network*). O ZigBee apresenta baixo consumo de energia e é conhecido por ter todas as camadas OSI. As camadas 1 e 2 seguem os parâmetros do IEEE.802.15.4. Os dispositivos comerciais geralmente operam na banda de 2400 MHz [5],[8].

O LoRa é uma tecnologia sem fio desenhada para longo alcance, com baixo consumo de energia e é responsável principalmente pela troca de dados de grande cobertura [5],[9]. Por ser uma tecnologia de radiofrequência com longo alcance, pode ser utilizada em sensores e monitores remotos [10].

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização das medições na faixa de 900 MHz foram utilizados 2 dispositivos LoRa Módulo LoRaWAN Bee V2 da Robocore [11], com transceptor SMW-SX1276M0 da SMART Modular. Já as medições na faixa de 2400 MHz foram realizadas com 2 dispositivos Xbee modelo S1 da DIGI, com transceiver MC13212 da Freescale [12]. Ver Figura 2.

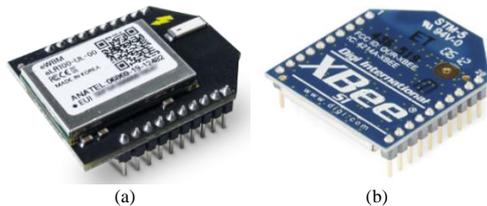


Figura 1– Transceptor LoRa (a) e Zigbee (b).

Os dispositivos LoRa foram montados sobre módulos USB-Stick e conectados às portas USB de 2 computadores, conforme a Figura 3a e monitorados com software livre RealTerm. As interfaces seriais foram configuradas para 115.2 kbps. Comandos AT foram utilizados para realizar o envio de quadros no dispositivo transmissor e o seu monitoramento no dispositivo receptor. Junto com o recebimento do quadro, o dispositivo receptor informa a potência recebida (*Received signal strength indication*– RSSI) e a relação sinal ruído (*signal to noise ratio* – SNR).

Para a medição do Zigbee, apenas um dispositivo foi instalado no USB Stick e conectado ao computador. O outro dispositivo foi configurado em modo *loopback*, quando o dispositivo transmite de volta o mesmo quadro recebido. A configuração e monitoramento dos dispositivos foi realizada com o software XCTU fornecido pela própria DIGI.

Foram realizadas medições em ambiente aberto, sem obstruções, com diferentes distâncias. Também foram realizadas medições com distância de 1 m e diferentes obstáculos, como parede de blocos, parede tipo *dry wall*, parede ou divisória de vidro e porta folheada de madeira.

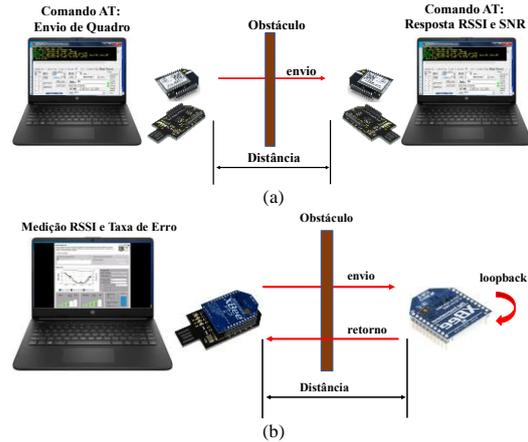


Figura 2– Medições de RF com dispositivos LoRa e Zigbee.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os estudos realizados e os comentários sobre os resultados obtidos.

A. Balanço de Enlace

A Figura 3 apresenta o balanço do enlace (*Link budget*) utilizado nas medições, com os dados das especificações dos fabricantes dos dispositivos.

Caminho do Sinal de Radio	A=>B	B=>A	Unidade
Potência de Transmissão	0.25	0.25	mW
Potência de Transmissão	-6.02	-6.02	dBm
Perda Conector, cabo, etc.	0.00	0.00	dB
Ganho Antena	-4.00	-4.00	dBi
EIRP	-10.02	-10.02	dBm
Sensibilidade Recepção	-136.00	-136.00	dBm
Perda Conector, cabo, etc.	0.00	0.00	dB
Ganho Antena	-4.00	-4.00	dBi
Mínima Potência Recebida	-132.00	-132.00	dBm
MAPL	121.98	121.98	dB
Margem Desvanecimento	0.00		dB
Margem FER	0.00		dB
Potência Recebida	-132.00	-132.00	dBm
Path Loss		121.98	dB

Caminho do Sinal de Radio	A=>B	B=>A	Unidade
Potência de Transmissão	1.00	1.00	mW
Potência de Transmissão	0.00	0.00	dBm
Perda Conector, cabo, etc.	0.00	0.00	dB
Ganho Antena	0.00	0.00	dBi
EIRP	0.00	0.00	dBm
Sensibilidade Recepção	-92.00	-92.00	dBm
Perda Conector, cabo, etc.	0.00	0.00	dB
Ganho Antena	0.00	0.00	dBi
Mínima Potência Recebida	-92.00	-92.00	dBm
MAPL	92.00	92.00	dB
Margem Desvanecimento	0.00		dB
Margem FER	0.00		dB
Potência Recebida	-92.00	-92.00	dBm
Path Loss		92.00	dB

Figura 3– *Link Budget* para o sistema LoRa e Zigbee utilizados.

Os dispositivos LoRa foram configurados para a menor potência de transmissão (AT+TX 10, correspondendo a -20dB da potência máxima de +14 dBm). A antena utilizada na placa LoRa, modelo

0915AT43A0026E, do fabricante Johanson Technology, possui um ganho de -4 dB. Apesar disso, a modulação CSS (*Chirp Spread Spectrum Modulation*) do LoRa garante uma alta sensibilidade de recepção, o que permite uma perda de propagação (*path loss* – PL) de 122 dB, mesmo com potência mínima. Utilizando-se a Equação 1 da Seção 1, este PL permitiria um alcance máximo, sem obstáculos, incluindo a própria curvatura da Terra, de aproximadamente 33 km. Já o PL máximo do Zigbee, de 92 dB, com a mesma equação, permitiria um alcance máximo de 300 m. No entanto, o próprio datasheet do fabricante informa que o alcance máximo do dispositivo em linha de visada é de 90 m. Margens de ruído e interferência não foram considerados nesta análise.

B. Medições Sem Obstrução

A Tabela 2 apresenta as medições dos dispositivos LoRa e ZigBee para diferentes distâncias, sem obstrução. A Figura 4a apresenta o gráfico referente ao LoRa, enquanto que a Figura 4b mostra os dados referentes ao enlace Zigbee. Os gráficos foram gerados via *script* do Matlab, conforme [6].

TABELA 2 – Medições sem Obstrução.

Distância (m)	RSSI	
	LoRA	Zigbee
1	-58	-55
5	-78	-62
10	-82	-69
20	-98	-85

De acordo com a Tabela 2, as medições com LoRa indicam uma perda de 24 dB/década. A regressão linear apresentada na Figura 4a mostra que para as medições de RSSI de 900 MHz, obtidas pelo dispositivo LoRa, o coeficiente angular é de aproximadamente 26 dB/década.

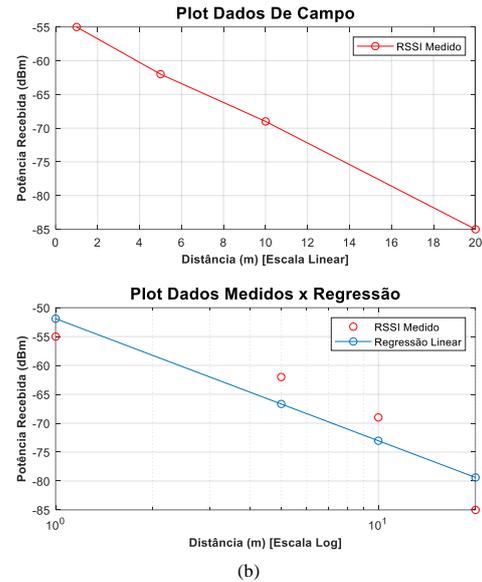
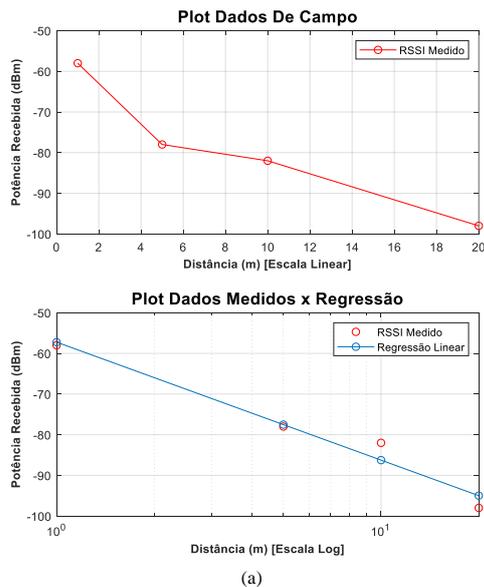


Figura 4– Gráfico do RSSI x distância, das medições sem obstrução para o enlace LoRa (a) e ZigBee (b).

De acordo com a Tabela 2, a perda para o Zigbee é de 14 dB/década. Já a regressão linear das medições são de 21 dB/década. Estes valores divergem dos valores esperados pela Equação 1 para o espaço livre, que é de 20 dB/década. Isso pode ser devido imprecisão das medições de RSSI feitas pelos dispositivos ou múltiplas propagações de obstáculos no entorno dos dispositivos, ainda que fora da Zona de Fresnel [6].

C. Medições Com Obstrução

A Tabela 3 apresenta os valores de perda de penetração para diferentes obstáculos, obtidos através das medições de RSSI e SNR dos dispositivos LoRa, em 900 MHz. Já a Tabela 4 apresenta os resultados para o enlace ZigBee, em 2450 MHz.

TABELA 3 – Medições de obstrução em 900 MHz.

Material	Espessura (mm)	RSSI (dBm)	Perda Penetração (dB)
Ar	---	-58	0
Vidro	10	-58	0
Porta madeira Folhada	40	-60	-2
Dry Wall	80	-65	-7
Parede Blocos	150	-70	-12

TABELA 4 – Medições de obstrução em 2400 MHz.

Material	Espessura (mm)	RSSI Remoto (dBm)	Perda Penetração (dB)
Ar	---	-55	0
Vidro	10	-56	-1
Porta madeira Folhada	40	-58	-3
Dry Wall	80	-60	-5
Parede Blocos	150	-65	-10



Nota-se uma diferença de perda de penetração comparando-se os valores medidos com 900 MHz e 2450 MHz. Isso pode ser devido a maior facilidade de penetração quando em frequência mais alta ou pelo erro de medição, já que os valores medidos em cada tecnologia dependem dos valores medidos pelo chip do dispositivo.

Aplicando-se a Equação (2) da seção 1, para ambiente de escritório, considerando-se como obstáculo, descontando-se a perda de penetração de uma parede de 10 dB no PL apresentado (82 dB), tem-se uma distância máxima indoor de 8,2 m. Já com o LoRa, ainda que sejam 2 paredes grossas, com perda de 12 dB cada (PL de 98 dB), o alcance será de 20 m.

CONCLUSÃO

Os objetivos deste trabalho foram atingidos. Testes com dispositivos LoRa e ZigBee foram realizados, e medições de RSSI foram obtidas diretamente das informações do *chipset* de cada dispositivo.

O LoRa além de operar em uma banda de frequência mais baixa e mais favorável, possui um PL de cerca de 30 dB maior que o do Zigbee, isso sem considerar operar em potências mais elevadas e antenas com maior ganho. Isso permite um alcance muito superior, o que favorece a sua utilização em diferentes ambientes de edificações, tanto *indoor* quanto *outdoor*, para IoT.

REFERÊNCIAS

- [1] FAROOQ, M.U; *et al.* A Review on Internet of Things (IoT). International Journal of Computer Applications (0975 8887). Volume 113 - No. 1, March 2015.
- [2] BNDS. Produto 3 Análise de oferta e demanda Relatório parcial – Análise da demanda, Versão 1.1, Nov. 2017. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/wps/wcm/connect/site/6c597bfe-b92d-4084-ab07-5498e1ae2445/produto-3-analise-de-oferta-e-demanda-relatorio-parcial-analise-de-demanda.pdf?MOD=AJPERES&CVID=ISZJKHO>>
- [3] SOUZA, Z. V. J.; BONETTE, R. L. Impactos da indústria 4.0 e sua autonomia operacional em processos de automação, através da internet das coisas. Revista Gestão Industrial ISSN: 1808-0448. R. Gest. Industr., Ponta Grossa, v. 15, n. 4, p. 42-55, Out./Dez. 2019.
- [4] SILVA, V. M.; SILVA, G. G.; GOMES, L. R. Minimização do Consumo de Energia de Dispositivos Sem Fio em Ambientes Industriais. In: WORKSHOP DE COMPUTAÇÃO URBANA (COURB), 4, 2020, Rio de Janeiro. Anais [...]. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2020. p. 43-56. ISSN 2595-2706.
- [5] ELISIARIO, A. T. S. ; VICENTINI, G. F. ; COSTA, H. G. ; DE CARVALHO JR, A. . Levantamento das tecnologias sem fio para IoT e Indústria 4.0. QUALIF, v. 10, p. 185-200, 2022.
- [6] A. de Carvalho Jr, D. V. Garcia, J. I. da Silva Filho. Análise do Orçamento de Enlace e Estimativa de alcance de Tecnologias Industriais de Sensores sem Fio. Revista Seleção Documental, Nº 44, Ano 11, pp 3-9, 2016.
- [7] International Telecommunication Union. Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz. Recommendation ITU-R P.1238-7, Geneva, 2012.
- [8] FRIAS, Renato N. ZIGBEE, 2004. Disponível em: <https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialzigbee/pagina_1.asp> . Acesso em: 15 de outubro de 2022.
- [9] Ferreira, A.E., Ortiz, F.M., Costa, L.H.M.K. et al. A study of the LoRa signal propagation in forest, urban, and suburban environments. Ann. Telecommun. 75, 333–351 (2020). <https://doi.org/10.1007/s12243-020-00789-w>.
- [10] JUNIOR, Vidal P. S. Conheça a tecnologia LoRa® e o protocolo LoRaWAN™. EMBARCADOS, 2015. Disponível em: <<https://embarcados.com.br/conheca-tecnologia-lora-e-o-protocolo-lorawan/#LoRa>> . Acesso em: 15 de outubro de 2022.
- [11] SMART Modular Technologies. Módulo IoT/LoRa® - Datasheet SMW-SX1276M0, 2019. Disponível em: https://d229kd5ey79jzj.cloudfront.net/1239/Transceiver_LoRaWAN_SMT_SMW-SX1276M0.pdf
- [12] Digi International. XBee®/XBee-PRO® RF Modules - Product Manual v1.xEx - 802.15.4 Protocol, 2009. Disponível em: <https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/pdf/s/90000982.pdf>.