

工业应用中 LoRa 和 ZigBee 的性能分析 4.0

Renan R. Mendes, Rafael M. Silva, Carlos E. Capovilla
and Ivan R. S. Casella

Federal University of ABC, Santo Andre, SP, Brazil
{renan.mendes, carlos. capovilla, ivan. casella }@ufabc.edu.br,
r.montoia@aluno.ufabc.edu.br

摘要

工业 4.0 概念已经在全球范围内逐步得到巩固，它的成功很大程度上归功于 LPWA 通信技术的应用。其中，LoRa 和 Zigbee 脱颖而出，除了低功耗和覆盖范围大的特点，它们成本低，并且使用扩频技术来增加系统对干扰的鲁棒性。在此背景下，本文对这两个技术在室内和室外环境中的性能进行了研究，以分析它们在工业 4.0 中使用的可行性。

关键词: Industry 4.0 • IoT • LPWA • LoRa • Zigbee

1 简介

近年来，世界工业经历了一场真正的革命。工业 4.0 的概念已被部署用于提供物联网 (IoT) 技术，用于监控和控制工业过程 [1]。其快速增长的一个原因是采用无线 LPWA(低功率广域) 通信技术。其中，LoRa(远距离) 和 Zigbee 技术已显示出广阔的前景，因为它们提供的设备价格实惠，易于获取，部署成本低且具有良好的抗干扰能力(扩频技术)，此外还有低功耗(例如，大约 10 年)和远程(例如，几公里)[2-4]。

目前成功实施工业 4.0 概念的一个非常重要的问题，是这些技术在不同的无线电传播环境中的性能，例如部署在那些工业厂房中时。因此，最近在科学文献中发表了几篇作品 [1,5-7]。

在此背景下，本文旨在基于在室内和室外环境中进行的实验获得的测量数据，对 LoRa 和 Zigbee 技术进行比较研究，以验证它们在工业 4.0 中的可行性。分析将使用 RSSI(接收信号强度指示)、PER(数据包错误率)的测量值和估计的最大范围作为性能参考。

除引言外,本文还分为四个部分。第2节简要介绍了待评估的技术——LoRa和Zigbee。第3节展示了测量测试的方式。第4节展示了无线电传播模型分析。最后第5节对全文进行了总结。

2 技术概述

LoRa使用Chirp扩频(CSS),并已指定在某些特定的ISM(工业、科学和医疗)频段上运行。本文中,选择了915MHz频段标准,因为这是LoRa在巴西采用的频段。LoRa有一个非常有趣的特性:它允许对系统的一些重要参数进行调整,例如SF(扩频因子,从7到12)、BW(带宽,从125到500kHz)和CR(编码速率,从4/5到4/8)[8]。根据这些参数,数据速率可以从0.3到50kbps不等。

另一方面,Zigbee采用直接序列扩频(DSSS)。它已被标准化在三个不同的ISM频段上运行,每个频段都有非常不同的特性[9]。本文中,将采用2.4GHz标准,因为它是在巴西最常用的标准。它采用基于OQPSK(偏移四进制相移键控)的准正交调制,可以实现大约250kbps[6]的数据速率。

3 性能分析

本文旨在从传输质量(RSSI和PER)和传输范围的角度评估和比较LoRa和Zigbee技术的性能。由于工业厂房的特性,系统的性能将针对室内和室外环境进行分析。

对于LoRa性能分析,使用了两个基于SX1276芯片的ESP-LoRa设备,工作在915MHz,距离地面2.0m,其中一个用作发射器(TX)和另一个作为接收器(RX)。该研究基于表1中针对SF、BW和传输功率(P_{TX})[1]的不同可能组合给出的八种可能的LoRa操作配置。

对于Zigbee性能分析,使用了两个运行在2.4GHz的Xbee-Pro设备(TX和RX)。每个设备都连接到一个嵌入式Arduino Mega系统,用于控制和传输数据包,并且与LoRa测试一样,两者都位于距离地面2.0m的位置。

表 1: LoRa 配置

配置	SF	BW (kHz)	P_{TX} (dBm)
Config 1	7	125	14
Config 2	12	125	14
Config 3	7	125	20
Config 4	12	125	20
Config 5	7	500	14
Config 6	12	500	14
Config 7	7	500	20
Config 8	12	500	20

3.1 室内环境

室内环境测试在圣安德烈的 ABC 联邦大学 (UFABC)A 楼的地下室进行。从 RSSI 和 PER 参数的测量结果分析 LoRa 和 Zigbee 的性能。

在测量期间, TX 保持固定, RX 从 10 m 开始移动, 每次移动 10 m, 直到达到 100 m。重要的是要注意, 系统在站点上会受到不同的干扰, 例如来自运行中的 WiFi(无线保真) 网络的同信道干扰。专门针对 LoRa, 对表 1 中列出的所有配置进行了测量。

进行测试的室内环境如图 1 所示。

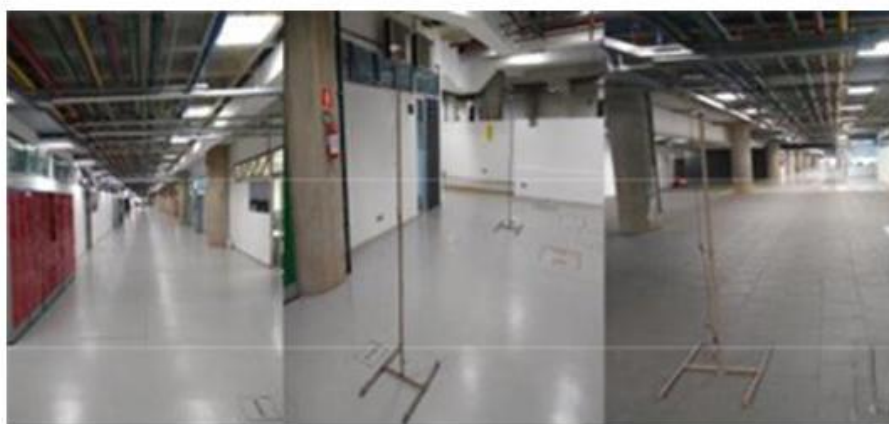


图 1: 室内环境

图 2 显示了所分析室内环境的 RSSI 变化作为 d (距离) 的函数, 可以看出, 对于 LoRa, RSSI 的测量值在 -60 和 -96dBm 之间。对于 Zigbee 可以看出, 在小于 50 m 时, RSSI 高于 -50dBm , 而在 50 m 以上, RSSI 高于 -65dBm 。

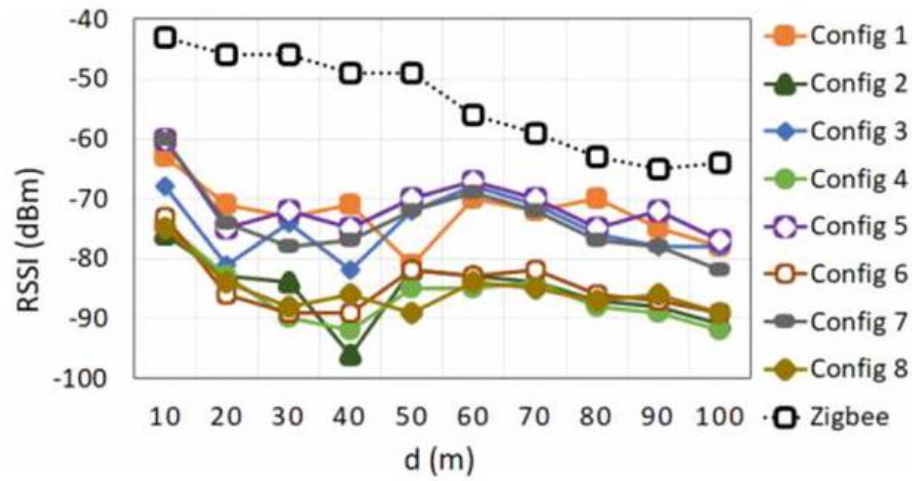
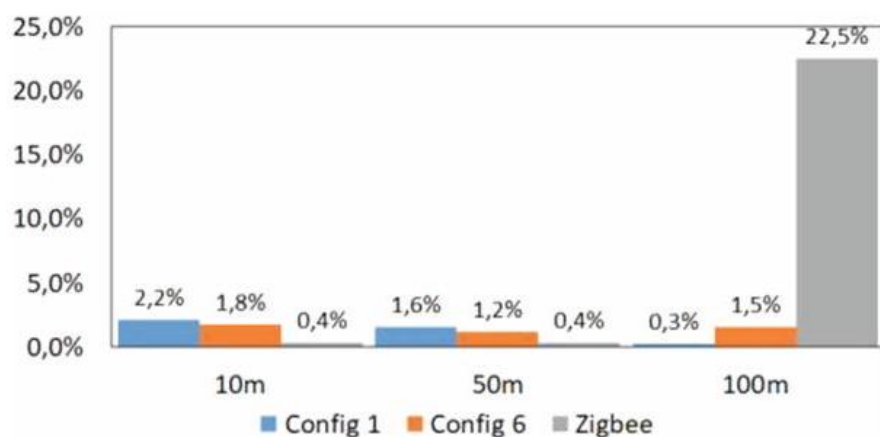


图 2: RSSI 作为室内环境中 d 的函数

反过来, 图 3 显示了在分析的室内环境中, 对于 Lora(配置 1 和配置 6) 和 Zigbee, PER 作为 d (距离) 的函数的结果。在测试中, 定义了三个不同的测量点 ($10, 50$, 和 100 m), 并且在每个点上传输了 $10,000$ 的数据包。可以看出, 在高达 100 m 的情况下, LoRa 对 Config 1 的最大 PER 为 2.2% , 对 Config 6 的最大 PER 为 1.8% 。对于 Zigbee, 最大 PER 在 10 m 和 50 m 之间为 0.4% 。然而, 对于 100 m , PER 有显著增加, 约为 22.5% 。

图 3: PER 作为室内环境中 d 的函数

3.2 室外环境

室外测量在圣贝尔纳多-杜坎波工学院 (FATEC) 进行。图 4 显示了执行测试的环境。在测量过程中, TX 保持固定, RX 放置在距离 TX 100、200、250 和 300 m 的位置, 两者的高度均为 2.0 m。为简单起见, LoRa 测量仅针对 Config 1 和 Config 6 进行。图 5 显示了测量点 (a) 和地形的高程剖面 (b)。可以看出 TX 和 RX 之间的最大斜率为 22.0 m。



图 4: 室外环境

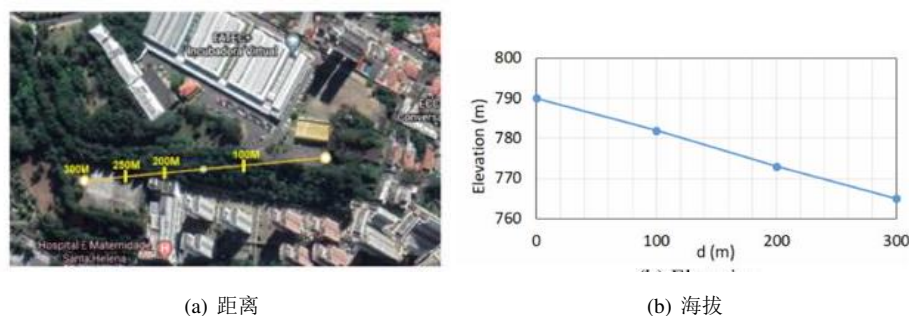
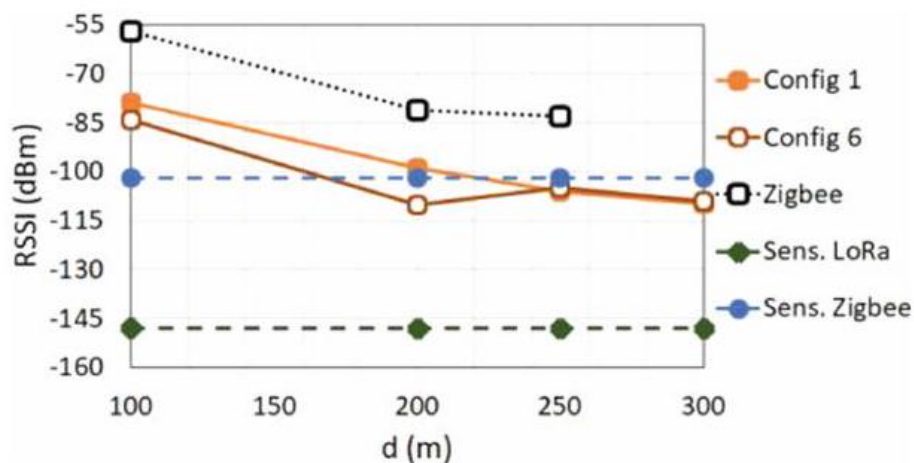


图 5: 室外环境的测量点位置和对应地形海拔

图 6 将 RSSI 作为 d (距离) 的函数, 进行室外环境分析。对于 LoRa, 可以看出, 当距离在 50 到 300m 时: 对于 Config 1, RSSI 从 -80 到 -110 dBm, 而对于 Config 6, RSSI 从 -85 到 -110 dBm。由于 LoRa 设备的接收灵敏度为 -148 dBm, 因此系统在分析范围内正常运行 (甚至可以覆盖更远的距离, 如图所示)。对于 Zigbee, 距离在 50 到 250 m 时, RSSI 从 -57 到 -83 dBm。然而, 不可能在 300 m 测量 RSSI, 因为所有收到的数据包都出错了, 表明接收信号的电平低于 Zigbee 设备 -102 dBm 的接收灵敏度。

图 6: RSSI 作为室外环境中 d 的函数

另一方面, 图 7 显示了 PER 作为 d (距离) 的函数, 对于 Lora(Config 1 和 Config 6) 和 Zigbee 在室外环境的分析结果。对于 Lora, 可以看出距离为 300 m

时, Config 1 达到最大 PER 值 3.0%, 而 Config 6 达到最大 PER 值 2.5%。对于 Zigbee, 距离 200m 的 PER 为 34.71%, 距离 250m, PER 低于 6.17%。这主要是环境的动态特性造成的, 例如测试环境周围的人和车辆的流通。然而, 距离 300 m 时, Zigbee 停止正常工作, 所有收到的数据包都出错了 (对应 100% 的 PER)。

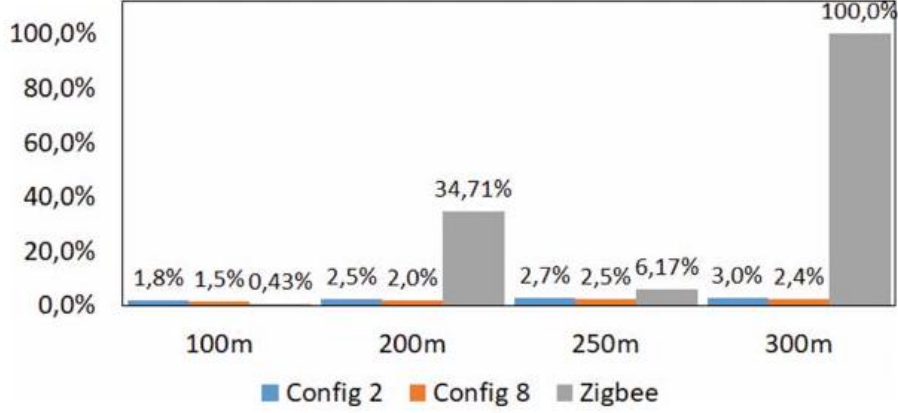


图 7: PER 作为室外环境中 d 的函数

4 阴影传播模型

为了将平均接收功率 (P_{RX}) 估计为 d (距离) 的函数, 使用了具有灵活性、简单性和在实际测量时的可行性的影子传播模型 (SPM)。该模型基于修改后的自由空间模型, 使用对数正态随机变量 X_{SH} 来表示在 $\text{dB}[6, 10]$ 可以通过标准差 σ_{SH} 的值来量化的环境的阴影效应。 SPM 的 P_{RX} 可以表示为:

$$P_{RX}(d) = P_{RX}(d_0) - 10 \cdot \gamma \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_{SH}$$

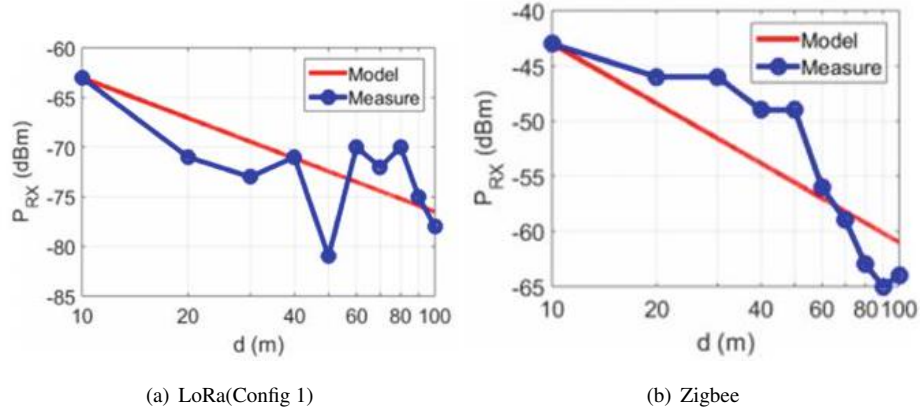
其中: d_0 是参考距离, $P_{RX}(d_0)$ 是在 d_0 处接收到的平均功率, $P_{RX}(d)$ 是在 d 中接收到的平均功率, γ 是环境的传播系数。

表 2 显示了室内环境中 LoRa(针对所有分析的配置) 和 Zigbee 频带的 γ 和 σ_{SH} 的值, 由对数回归方法 [6] 确定。表 2 得到室内环境的 γ 和 σ_{SH} 。

表 2: 获得室内环境中的 γ 和 σ_{SH} 值

Configurations	γ	σ_{SH}
Config 1	1.35	3.86
Config 2	1.35	4.38
Config 3	0.9	5.10
Config 4	1.74	4.07
Config 5	1.57	4.54
Config 6	1.60	4.60
Config 7	1.97	4.86
Config 8	1.45	3.13
Zigbee	1.8	3.9

图 8 显示了测量的 P_{RX} 和从 SPM 获得的分析室内环境的 P_{RX} 。为了使 LoRa 分析更清晰, 不失一般性, 图中只给出了 Config 1 曲线。分析结果, 可以验证 P_{RX} 沿 d 发生了一些变化, 主要是传输信号的半波长倍数多径分量的消除引起的。对于 Zigbee, 可以看出, 测量的 P_{RX} 也由于多径分量的抵消而变化。需要注意的是, 由于环境的物理限制 (即 100 m), 在距离大于临界距离 (D_c)[6] 时, 无法获得 γ 和 σ_{SH} 的估计值。

图 8: P_{RX} 作为室内环境中 d 的函数

反过来, 图 9 显示了阴影分量对 LoRa(Config 1) 和 Zigbee 在室内环境中 SPM 获得的 P_{RX} 曲线的随机影响。测量的 P_{RX} 曲线也显示为参考。

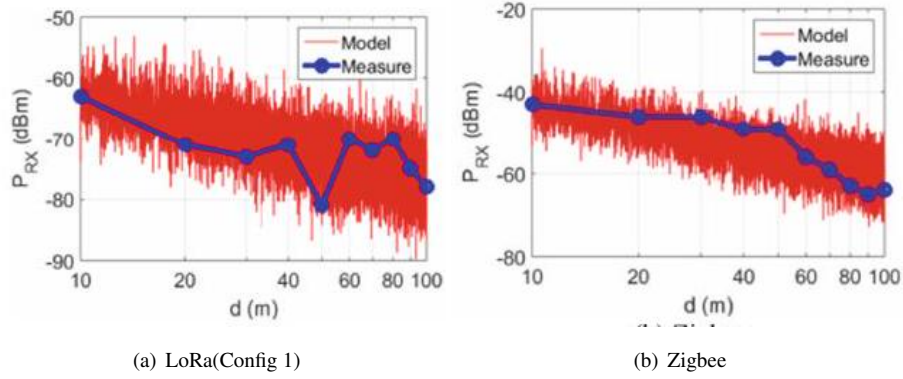


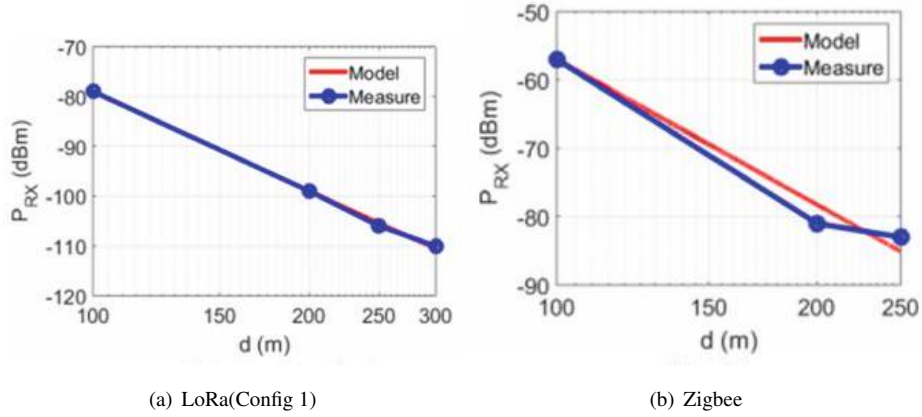
图 9: 在考虑阴影效应的情况下, P_{RX} 作为室内环境中 d 的函数

表 3 显示了在分析的室外环境中 Lora(Config 1 和 Config 6) 和 Zigbee 获得的 γ 和 σ_{SH} 的值。可以看出, 由于所分析环境的特征 (例如, TX 和 RX 之间的斜率, 路径障碍物) 以及测量使用距离大于 D_c 的一些点, 获得了较高的 γ 。(例如, 在 D_c 之外的点, γ 由于地面反射而变为更高的值)[6]。

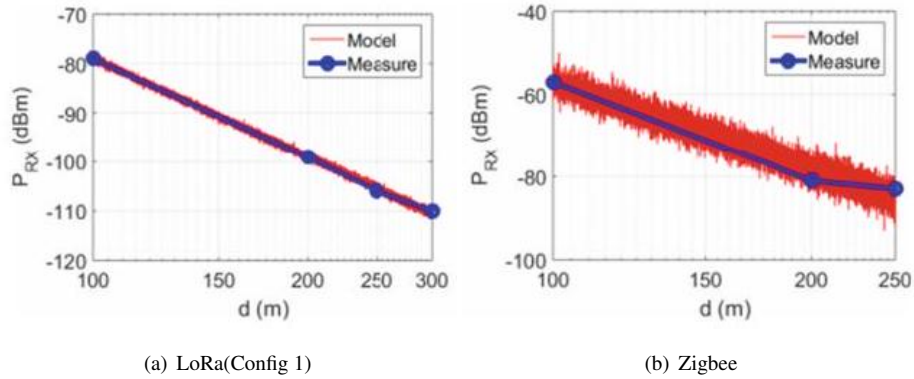
表 3: 获得室外环境中的 γ 和 σ_{SH} 值

Configurations	γ	σ_{SH}
Config 1	6.62	0.44
Config 6	5.8	4.73
Zigbee	7.06	2

图 10 显示了在室外环境中从 SPM 测得的 P_{RX} 和 P_{RX} 的值。为简单起见, 仅显示了 Config 1 的 LoRa 结果。可以看出, 在所使用的模型和两个系统的测量值之间获得了良好的拟合。

图 10: P_{RX} 作为室外环境中 d 的函数

另一方面，图 11 显示了阴影对室外环境中 LoRa(Cinfig 1) 和 Zigbee 从 SPM 获得的 P_{RX} 值曲线的影响。还显示了测量的 P_{RX} 值曲线。

图 11: 考虑阴影效应的情况下, P_{RX} 作为室外环境中 d 的函数

通过外推从 SPM 获得的 P_{RX} 曲线, 根据接受灵敏度, 可以获得所分析系统的最大范围的估计值。这样可以看出 LoRa(Config 1) 的最大范围是 1.1 km, 而 Zigbee 的范围限制在 433.9 m。

5 结论

获得的结果表明:在室内和室外环境距离为 50 m 的范围内,所评估的 Zigbee 系统具有比 LoRa 系统更好的性能。然而,在更深入的分析中,同样考虑到 50 m 以上的覆盖范围,LoRa 被证明是低速率、低消耗和远程应用的最合适选择。工作在 915MHz 频段的 LoRa,比工作在 2.4GHz 频段的 Zigbee 拥塞更少,并且具有更好的接收灵敏度,更广泛的覆盖范围和更好的信号质量,非常适合使用在工业 4.0 中。

6 引用

1. Zhou Q, Zheng K, Hou L, Xing J, Xu R (2019) Design and implementation of open LoRa for IoT. *IEEE Access* 7:100,649-100,657
2. Adame T, Bel A, Bellalta B (2019) Increasing LPWAN scalability by means of concurrent multiband IoT technologies: an industry 4.0 use case. *IEEE Access* 7:46990-47010
3. Aheleroff S, Xu X, Lu Y, Aristizabal M, Velásquez PJ, Joa B, Valencia Y (2020) IoT-enabled smart appliances under industry 4.0: a case study. *Adv Eng Inform* 43:101,043
4. Sisinni E, Ferrari P, Fernandes Carvalho D, Rinaldi S, Marco P, Flammini A, Depari A (2020) LoRaWan range extender for industrial IoT. *IEEE Trans Ind Inform* 16(8):5607-5616
5. El Chall R, Lahoud S, El Helou M (2019) LoRaWAN network: radio propagation models and performance evaluation in various environments in Lebanon. *IEEE Internet Things J* 6(2):2366-2378
6. Casella IRS, Pereira AL (2016) A bioinspired propagation model for brazilian digital TV system based on MLP and RBF networks. *IEEE Latin Am Trans* 14:3941-3948
7. Filsoof R, Bodine A, Gill B, Makonin S, Nicholson R (2014) Transmitting patient vitals over a reliable zigbee mesh network. In: 2014 IEEE Canada International Humanitarian Technology Conference, IHTC 2014, pp 1-5 8. Croce D, Gucciardo M, Mangione S, Santaromita G, Tinnirello I (2018) Impact of LoRa

imperfect orthogonality: analysis of link-level performance. *IEEE Commun Lett* 22(4):796799

8. Raposo D, Rodrigues A, Sinche S, Sá Silva J, Boavida F (2018) Industrial IoT monitoring: technologies and architecture proposal. *Sensors* 18(10):3568
9. Cheung KW, Sau JHM, Murch RD (1998) A new empirical model for indoor propagation prediction. *IEEE Trans Veh Technol* 47(3):996-1001