

# Avaliação da Confiabilidade de uma Rede Wi-SUN com Topologia Linear para Aplicações de Cidades Inteligentes

Frederico A. M. Saraiva, Allan Bispo, Ruan D. Gomes e Iguatemi E. Fonseca

**Abstract**—A tecnologia Wi-SUN (*Wireless Smart Ubiquitous Network*) permite a construção de redes de comunicações de longo alcance e baixa potência (LPWAN) com base no padrão IEEE 802.15.4g. Oferecendo possibilidades de interoperabilidade entre equipamentos fornecidos por múltiplos fabricantes, Wi-SUN tem encontrado aplicações em diversos campos, tais como Agricultura Inteligente, Redes Elétricas Inteligentes, Cidades Inteligentes, dentre outros. Neste trabalho, são apresentados os resultados de um experimento realizado em um ambiente externo com uma rede IEEE 802.15.4g em topologia linear que adota arquitetura de camadas idêntica ao Wi-SUN FAN 1.0, a fim de gerar informações para o estudo de estratégias para aumentar a confiabilidade da rede ante a eventual falha de algum dos nós. Os resultados obtidos mostram que a adaptação de potência se apresenta como um meio viável de recuperação de falhas e consequente aumento da confiabilidade da rede.

**Palavras chave:** Wireless Smart Ubiquitous Network, 802.15.4g, topologia linear

## I. INTRODUÇÃO

*Wireless Smart Ubiquitous Networks* - Wi-SUN, são redes de comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.15.4g, projetadas para serem confiáveis, possuírem baixo custo e baixo consumo de energia [1]. Normalmente, são empregadas em comunicações que envolvem dispositivos de Internet das Coisas (IoT) ou comunicação máquina a máquina (M2M) [2], para aplicações de monitoramento ou controle.

O padrão IEEE 802.15.4-2006 [3] (revisão do IEEE 802.15.4-2003) é uma especificação aberta para as comunicações que envolvem as tecnologias de IoT e M2M e é usado como base por diversas tecnologias, como ZigBee e WirelessHART. Contudo, o padrão possui um conjunto de limitações que comprometem seu uso em diversas aplicações, como suscetibilidade a interferências externas, problema de atenuação por multipercurso [4], escalabilidade limitada e, principalmente, alcance curto das comunicações [5]. Tais questões levaram o IEEE a fazer emendas no padrão com o objetivo de superar essas limitações, o que originou as emendas IEEE 802.15.4g e IEEE 802.15.4e [6], [7].

A emenda 802.15.4g propôs modificações que consistiram na criação de três novas definições de camada física (PHY),

usando diferentes tipos de modulação: SUN-FSK (*Frequency-shift keying*), SUN-OQPSK (*Offset Quadrature Phase-shift keying*) e SUN-OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) [8]. Essa emenda possibilitou a utilização de dispositivos em distâncias que podem atingir a ordem de até quilômetros. Além disso, problemas de escalabilidade também puderam ser minimizados [9]

O Wi-SUN é baseado no IEEE 802.15.4g e pode ser entendido como uma tecnologia ubíqua, isto é, voltada para a interoperabilidade de redes SUN e com ampliação do espectro de aplicação da tecnologia em domínios diversificados, como por exemplo em Redes Elétricas Inteligentes (REI) [10], [11], Redes FAN (*Field Area Network*) [12], Cidades Inteligentes [13], dentre outros.

Todavia, esse largo potencial de aplicações traz consigo desafios que, por sua vez, motivam também diversos estudos e pesquisas. Um desses desafios são as redes Wi-SUN com topologia linear, que permite ligar os nós de uma rede em série. Dessa forma, se um dos nós deseja entregar uma mensagem a outra parte da rede, a mensagem é repassada de nó em nó até chegar ao destino [14]. Essa técnica é geralmente utilizada quando as distâncias físicas a serem cobertas pelos nós são demasiado grandes e há a impossibilidade de comunicações diretas. Um exemplo de uso é no monitoramento de linhas de transmissão de energia elétrica [15].

Um dos desafios a serem enfrentados em redes com topologia linear é que quando algum dos nós falha, as rotas que necessitam passar pelo nó defeituoso ficam interrompidas, o que traz prejuízos às comunicações e incide negativamente sobre a confiabilidade da rede. Redundância de nós pode é uma solução. Porém, os custos podem ficar proibitivos a depender do número de nós a serem duplicados. Outra solução de custo menor é por meio da adaptação de potência dos nós vizinhos ao nó defeituoso. Nesse caso, a potência dos vizinhos seria ajustada a um nível que permitisse transpassar o nó defeituoso, porém dentro das restrições legais.

O objetivo deste artigo foi efetuar o estudo de níveis de potência que se tornem viáveis para o contorno de falhas em nós de redes Wi-SUN com topologia linear e, com isso, verificar se a adaptação de potência é um meio viável de solução para o cenário avaliado. Para o estudo foi montada uma rede Wi-SUN em ambiente externo, composta por 3 nós sensores e 1 nó *Gateway* no Campus I da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), implantados em postes de energia (nós sensores) e na sede da Superintendência de TI do Campus (*Gateway*). Os nós foram configuradores para transmitir com

Frederico Saraiva e Iguatemi Fonseca são do Centro de Informática da UFPB, e-mails: fred@sti.ufpb.br, iguatemi@ci.ufpb.br; Allan Bispo e Ruan Gomes são do GComPI do IFPB Campina Grande, e-mails: allan.bispo@academico.ifpb.edu.br, ruan.gomes@ifpb.edu.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo IFPB (54/2019) e pelo CNPq (421461/2018-7; 311419/2019-4).

diferentes potências (entre 5 dBm e 14 dBm), com o objetivo de fornecer dados para os estudos.

Os resultados mostraram que a adaptação da potência pode ser um meio a ser utilizado para a recuperação de falhas a fim de se aumentar a confiabilidade de redes Wi-SUN com topologia linear.

## II. VISÃO GERAL DO PADRÃO IEEE 802.15.4G/WI-SUN

O IEEE 802.15.4g é uma emenda da norma IEEE 802.15.4 para redes sem fio de baixa potência, que foi inicialmente projetado para *Smart Utility Networks – SUN* [8]. Diferenças significativas em relação às primeiras versões do IEEE 802.15.4, tais como alcance e taxa de bits, bem como a adequação para uso *outdoor*, impulsionaram a ampliação do domínio de aplicações da tecnologia. Essas diferenças, no entanto, não tornam os padrões mutuamente excludentes, mas direcionam o uso de cada um de acordo com circunstâncias e necessidades.

O escopo da emenda IEEE 802.15.4g inclui:

- Operação em bandas de frequência entre 433 MHz e 1 GHz e na banda de 2.4 GHz;
- Taxas de bits variando de 6.25kbps a 800kbps;
- Quadros PHY com tamanho mínimo de 1500 octetos, permitindo que um quadro IP possa ser transmitido sem necessidade de fragmentação.

O Wi-SUN, por sua vez, é uma tecnologia de redes sem fio LPWAN que se baseia no padrão IEEE 802.15.4g e é voltada para a interoperabilidade de redes SUN de diferentes fornecedores. Sua aplicação se dá em vários campos, tais como Agricultura Inteligente, Redes Elétricas Inteligentes Cidades Inteligentes, entre outras.

### A. Trabalhos relacionados

Existem na atualidade diversos trabalhos que têm o padrão IEEE 802.15.4g como objeto de estudos. Muitos destes dedicados a analisar questões de desempenho da tecnologia em diferentes situações e cenários [1], [5], [16]–[18].

Um estudo de avaliação de desempenho do IEEE 802.15.4/4g/4e em ambientes externos é descrito em [1], com protótipos de transceptores com modulação 2GFSK e com potências de 14 dBm e 24 dBm a depender das distâncias a serem cobertas e da necessidade de preservação da bateria. Resultados mostraram que comunicações eram possíveis em distâncias de 450 m a taxas de bits de 50 kbps ou em edificações de concreto com limite de até 20 andares. Os autores concluíram que Wi-SUN pode ser aplicado em ambientes do mundo real e proporcionar comunicações entre aplicações que tenham requerimentos similares, a exemplo de M2M ou redes de sensores.

Um estudo semelhante é descrito em [5], ao utilizar modulação FSK e taxas de bits de 50 kbps em cenário urbano, semi-rural e rural. Perceberam que no primeiro cenário foram atingidas distâncias de 150 m, no segundo 250 m e no terceiro 800 m. Dessa forma, foi possível avaliar como obstáculos, tais como prédios, árvores e outros objetos exercem influência sobre a atenuação do sinais e distância das comunicações externas.

Em [16] é descrita a avaliação de uma rede IEEE 802.15.4g em ambiente industrial, utilizando 11 nós finais e as três modulações definidas no padrão (i.e. SUN-FSK, SUN-OQPSK e SUN-OFDM). Foram obtidos valores de RSSI, CCA e taxa de entrega de pacote. Os resultados mostraram muita variabilidade dos valores medidos devido a problemas de multipercurso e interferências externas, o que levou os autores a concluir que são necessários esquemas adicionais para que as comunicações LPWAN atendam a requisitos de confiabilidade no ambiente industrial. Neste sentido, os autores introduzem o conceito de diversidade de modulação em camada de enlace, que consiste na replicação de pacotes utilizando diferentes modulações, para atingir altas taxas de entrega de pacote.

Em [18] é descrito um estudo comparativo do desempenho de duas configurações diferentes de camada física do IEEE 802.15.4g: OQPSK e OFDM, no contexto de aplicações de *smart building*. Os experimentos foram realizados em ambiente interno, com teto metálico e paredes de concreto e janelas de vidro, com variações de posição dos nós receptores. Os autores concluíram que o OFDM é recomendado para aplicações de *smart building*, pois apresenta taxa de entrega de pacote e alcance superiores ao OQPSK operando na banda de 2,4 GHz, especialmente em ambientes sujeitos a problemas de multipercurso e interferência externa.

Resultados experimentais de avaliação de duas tecnologias LPWAN para a conectividade de IoT, usando abordagem sistêmica, são apresentados em [19]. Foram utilizados no ensaio LoRa e Wi-SUN, para suporte comparativo. Os autores concluíram que ambas as tecnologias possuem prós e contras, destacando que LoRa possui bom desempenho, pois se beneficia de sua largura de banda. Contudo, segundo eles, isto pode vir a ser, em alguns momentos, fator de conflitos com leis de órgãos reguladores locais. Já o Wi-SUN, por sua vez, possui a grande vantagem de ser bastante robusta e bem documentada, além de ser padronizada pela norma aberta IEEE 802.15.4-2015.

Um estudo minucioso é descrito em [8] para investigar se o IEEE 802.15.4g pode de fato ser utilizado em ambientes externos com nível de qualidade adequado. Os autores realizaram vários experimentos em diferentes cenários, em ambientes com visada direta, ambientes urbanos e ambientes relevantes para aplicações de agricultura inteligente e aplicações de redes de medição inteligentes. Os autores avaliaram 31 configurações de camada física do IEEE 802.15.4g, concluindo que as maiores distâncias cobertas foram provenientes do uso de SUN-FSK com FEC (*Forward Error Correction*) e SUN-OQPSK. Além disso, os autores também constataram que OFDM é mais robusto no que diz respeito a interferências e efeitos de multipercurso.

Alguns outros estudos se concentram em proposta de topologia linear, confiabilidade e tolerância a falhas [14], [20], [21]. O primeiro trabalho propõe uma rede de topologia linear simples, bem como uma rede com topologia em árvore, usando microcontroladores econômicos habilitados para comunicação sem fio. O segundo propõe um método de comunicação denominado  $\mu$ Net, o qual faz uso de mensagens de reconhecimento em transmissões ponto a ponto a fim de reduzir o tamanho do *buffer* de rede e desperdício de energia para, assim, aumentar a

confiabilidade da taxa de entrega de pacotes. O último, por sua vez, tem uma proposta parecida com a descrita neste artigo, porém, os autores consideram a rede sem fio como uma rede secundária que passa a operar se eventualmente algum nó da rede principal, a cabeada, falhar. Nossa proposta se concentra puramente em nós de rede sem fio Wi-SUN, onde o aumento da confiabilidade da rede, para o caso de eventual falha de algum nó, vem do controle de potência dos nós vizinhos ao nó danificado.

### III. CONFIABILIDADE DE REDE WI-SUN COM TOPOLOGIA LINEAR

A confiabilidade é a probabilidade de que um sistema, elemento ou componente, tem em desempenhar suas funções prescritas, durante um determinado período de tempo e sob determinadas condições [22].

Em muitos casos, a confiabilidade de um sistema pode ser aumentada através do uso de elementos que sejam altamente confiáveis para construir um determinado sistema. Desta forma, ao final do processo de construção este sistema também será altamente confiável.

Todavia, essa ideia não se reflete de forma direta para redes sem fio com topologia linear, conforme o exemplo da Figura 1:



Fig. 1: Rede em Topologia Linear.

Nessas situações, a confiabilidade geral do sistema  $R(t)$ , para componentes que falham independentemente, é dada pela equação de Lusser [23]:

$$R(t) = \prod_{i=1}^N R_i(t)$$

A confiabilidade geral de uma rede com topologia linear pode ser entendida como sendo o produto das taxas de confiabilidade das partes individuais conectadas. Então, supondo uma rede com 100 nós, em que cada um destes tem 0.999 de confiabilidade, a confiabilidade geral da rede será de 0.904 aproximadamente. Em condições genéricas, a falha em algum dos nós leva a confiabilidade do nó defeituoso, bem como também a de todos os nós que dele dependem, para zero.

Logo, é preciso uma estratégia para não depender do nó defeituoso e que permita que os demais nós continuem funcionando, mesmo que a confiabilidade geral não seja a mesma da anterior, mas que permita que a rede continue funcionando com qualidade aceitável.

### IV. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E RESULTADOS

Nesta seção são descritos os experimentos realizados para avaliar a confiabilidade de uma rede IEEE 802.15.4g com topologia linear para aplicações de Cidades ou Campi inteligentes. O principal objetivo é verificar como o uso de controle dinâmico de potência de transmissão pode ser usado para mitigar possíveis falhas em nós sensores.

#### A. Descrição do cenário de testes

O cenário de realização do experimento, conforme Figura 2, foi o Campus I da UFPB. Os experimentos consistiram na implementação de uma rede IEEE 802.15.4g/Wi-SUN com topologia linear, composta de quatro nós, sendo três nós sensores e um *gateway*. Os nós sensores foram instalados em postes de energia do Campus a altura aproximada de 3 metros. Já o *gateway* foi instalado na sede da Superintendência de TI. As distâncias entre os nós podem ser vistas na Figura 2.



Fig. 2: Cenário da Rede de Testes.

A execução dos experimentos se deu em duas etapas. Na primeira foram coletados dados por aproximadamente 7 horas de observações. Já na segunda, foram coletados dados por 21 horas.

Os hardwares utilizados na construção dos nós da rede e do *gateway*, cuja finalidade é a de encaminhar os pacotes recebidos para serem gravados no banco de dados, consistiram de uma placa SimpleLink Sub-GHz CC1310, a qual possui um transceptor que opera na banda Sub-GHz e foi programado para usar modulação 2GFSK, com frequência de 868 MHz e taxa de bits de 50 kbps, um mini computador de placa única Raspberry Pi, para salvar informações sobre pacotes recebidos em cada nó, e de uma bateria de 10.000 mAh. A exceção coube apenas ao nó 3, no qual não foi utilizado o mini computador, uma vez que ele não recebia pacotes, apenas transmitia. Detalhes dos componentes de hardware podem ser encontrados a seguir:

- **SimpleLink Sub-GHz CC1310:** É um kit de desenvolvimento fabricado pela *Texas Instruments* que oferece conectividade de longo alcance, opera na banda Sub-GHz e possui um processador ARM Cortex M3 de 32 bits. É destinado a aplicações que

exigem baixo consumo de energia e longo alcance de comunicação. Adota arquitetura idêntica à Wi-SUN FAN V1.0.

- **Raspberry Pi 3:** A Raspberry Pi possui uma distribuição Linux e também o código construído para o envio das informações a serem armazenadas no banco de dados (no caso do *gateway*) ou para salvamento em arquivo (no caso dos nós finais).

A montagem final do hardware pode ser observada na Figura 3.



Fig. 3: Montagem final do Kit em caixa plástica de proteção.

Foram também utilizados softwares que serviram para programação dos transceptores (plataforma *SimpleLink* da Texas), scripts de coleta dos dados (escritos em Python), bem como para a construção de um banco de dados, usando o sistema gerenciador de bancos de dados de séries temporais *InfluxDB*.

Os nós 1, 2 e 3 foram configurados para gerar um novo pacote a cada 30 segundos. Na aplicação implementada, cada pacote é transmitido múltiplas vezes, com potências de 5 dBm, 8 dBm, 11 dBm e 14 dBm. O valor da potência usada na transmissão de uma réplica do pacote é armazenado no *payload* e essa informação também é gravada no arquivo de registro (no caso da recepção por nós intermediários) e no banco de dados (no caso da recepção pelo *gateway*).

Os valores gravados no banco de dados e nos arquivos de cada nó<sup>1</sup> foram de RSSI, destino final do pacote, origem do pacote, número de sequência e potência de transmissão. Por meio dos valores gravados e conhecendo-se previamente os valores transmitidos, como quantidades de pacotes em uma determinada potência, por exemplo, foi possível fazer os diversos cálculos apresentados, tais como taxa de entrega de pacote e RSSI médio.

### B. Análise dos Resultados

Nesta seção são discutidos resultados dos experimentos obtidos no cenário considerado.

<sup>1</sup>Os arquivos podem ser encontrados em um repositório público em <https://github.com/GComPI-IFPB/WiSun-Linear-Traces>

As Figuras 4 e 5 mostram respectivamente a taxa de entrega de pacotes e os níveis de RSSI médios por cada par transmissor-receptor e potência empregados. Pode-se observar pelas figuras que o Nó 3 tem grandes dificuldades em se comunicar com o *gateway* diretamente, pois está localizado a uma distância de 167 m. Nas potências de 5 dBm e 8 dBm, a Taxa de Entrega de Pacote (PDR) fica em 0%, conforme Figura 4. Mesmo aumentando-se a potência para o máximo, o melhor valor de PDR foi em torno de 11%. O RSSI, para este nó, indica uma baixa qualidade do enlace, conforme pode ser visto na Figura 5. Assim, no cenário e na topologia considerados, pode-se concluir que estando o nó a uma distância de 167 m, é possível sobrepor os nós 2 e 1 utilizando a potência de 14 dBm, mas com qualidade muito baixa.

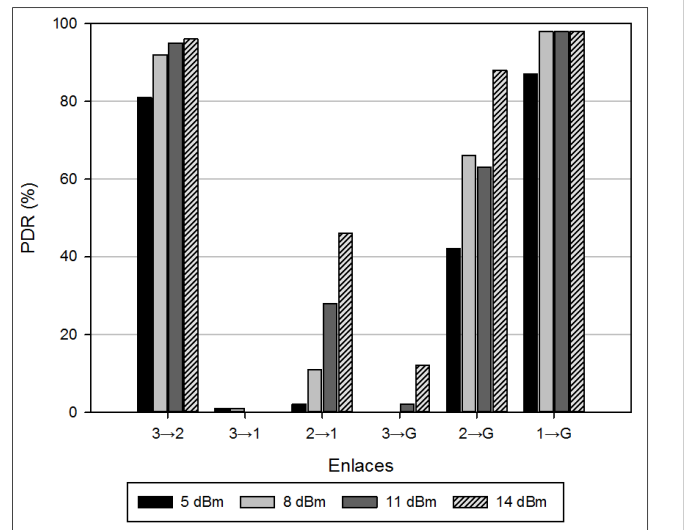


Fig. 4: Taxas de entrega de pacotes.

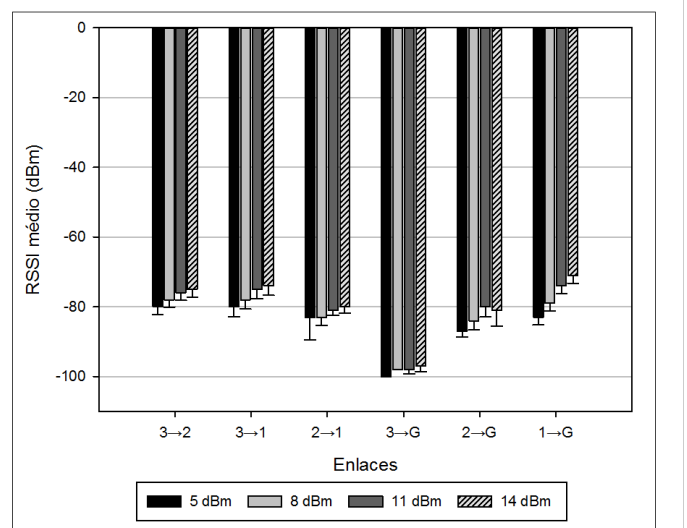


Fig. 5: Níveis de RSSI (médio).

Por outro lado, o Nó 2, mesmo estando a 124 m do *gateway*, já consegue se comunicar com este diretamente na potência de 5 dbm, sobrepondo o Nó 1. Observando as figuras, é possível notar a tendência de melhora da qualidade da comunicação quando se aumenta a potência.

O Nó 1, estando mais próximo do *gateway*, obteve bons resultados, conforme pode ser observado nos gráficos.

Destaca-se que as comunicações diretas entre o Nó 3 e *gateway* (sobrepondo o Nó 2 e Nó 1) foram de qualidade melhor que as comunicações diretas entre o Nó 3 e o Nó 1. Nota-se também que as comunicações entre o Nó 2 e o *gateway* foram melhores do que as comunicações diretas entre o Nó 2 e o Nó 1. Atribui-se tal acontecimento a obstáculos existentes entre o Nó 2 e o Nó 1, como uma lanchonete com telhado metálico, canos de ferro no poste onde foi instalado o Nó 1 e aos posicionamentos de todos os nós.

No entanto, esse evento, mesmo inesperado, serve para ilustrar o fato de que mesmo as comunicações do Nó 3 e Nó 2 com o Nó 1 terem sido prejudicadas, as comunicações daqueles nós com o *gateway* ocorreram.

Cumpra mencionar que o alcance obtido das comunicações foi menor do que o observado em outros estudos semelhantes. Possivelmente isso ocorreu também devido à utilização da antena PCB dos kits, as quais tem ganho de 3 dBi em 868 MHz. Além disso, os nós ficaram fechados dentro de uma caixa, o que certamente causa atenuação do sinal. Uma forma de melhorar as comunicações seria reposicionar os nós em alturas maiores, pois estariam menos sujeitos a obstáculos, bem como fazer uso de antena externa com ganho maior.

## V. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho realizou-se uma análise experimental das comunicações dos nós em uma rede Wi-SUN IEEE 802.15.4g com topologia linear em ambiente externo. Especificamente, estudou-se as comunicações entre os nós da rede, com medições da taxa de entrega de pacote, e potências de recepção (RSSI), para diferentes potências de transmissão. Os dados obtidos no experimento foram disponibilizados em repositório público, para permitir a realização de novas análises e simulações realistas baseadas em *trace*.

Os experimentos sugerem que a adaptação de potência é uma forma eficiente de mitigar problemas em nós intermediários em rede Wi-SUN com topologia linear. No entanto, dependendo do cenário, a confiabilidade pode ficar muito baixa, o que motiva o estudo de técnicas mais aprimoradas que permitam maximizar a confiabilidade e ao mesmo tempo tente minimizar o consumo de energia dos nós. Serão trabalhos futuros a construção de um protocolo que adapte automaticamente a potência dos nós.

## REFERÊNCIAS

- [1] C.-S. Sum, M.-T. Zhou, F. Kojima and H. Harada. “Experimental Performance Evaluation of Multihop IEEE 802.15. 4/4g/4e Smart Utility Networks in Outdoor Environment”. *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2017, 2017.
- [2] E.-S. Oh, S.-H. Lee, S.-H. Lee and S.-H. Hwang. “Comparison of sun and wi-fi p2p wsn in m2m environments”. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 11, no. 8, pp. 791849, 2015.
- [3] “802.15.4-2006 - IEEE Standard for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)”.  
- [4] J. Kurose and K. Ross. *Redes de computadores e a internet: uma abordagem top-down*. Pearson Education do Brasil LTDA, 2013.
- [5] F. Righetti, C. Vallati, D. Comola and G. Anastasi. “Performance Measurements of IEEE 802.15. 4g Wireless Networks”. In *2019 IEEE 20th International Symposium on “A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks”(WoWMoM)*, pp. 1–6. IEEE, 2019.
- [6] B. Heile, B. Liu, M. Zhang and C. Perkins. “Wi-sun fan overview”. *draft-heile-lpwan-wisun-overview-00, Internet-Draft, IETF*, 2017.
- [7] “802.15.4-2015 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks”.
- [8] J. Muñoz, T. Chang, X. Vilajosana and T. Watteyne. “Evaluation of IEEE802. 15.4 g for Environmental Observations”. *Sensors*, vol. 18, no. 10, pp. 3468, 2018.
- [9] C.-S. Sum, H. Harada, F. Kojima and L. Lu. “An interference management protocol for multiple physical layers in IEEE 802. 15. 4 g smart utility networks”. *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 4, pp. 84–91, 2013.
- [10] R. Rivera, A. S. Esposito and I. Teixeira. “Redes elétricas inteligentes (smart grid): oportunidade para adensamento produtivo e tecnológico local”. *Revista do BNDES*, vol. 40, pp. 43–83, 2013.
- [11] F. Al-Turjman and M. Abujubbeh. “IoT-enabled smart grid via SM: An overview”. *Future Generation Computer Systems*, vol. 96, pp. 579–590, 2019.
- [12] L. Chhaya, P. Sharma, A. Kumar and G. Bhagwatikar. “IoT-Based Implementation of Field Area Network Using Smart Grid Communication Infrastructure”. *Smart Cities*, vol. 1, no. 1, pp. 176–189, 2018.
- [13] D. Reeves. “How to Create a Smart City: Future-Proofed Cities That Foster Growth and Innovation”. *IEEE Electrification Magazine*, vol. 6, no. 2, pp. 34–41, 2018.
- [14] M. Azman, J. G. Panicker and R. Kashyap. “Wireless Daisy Chain and Tree Topology Networks for Smart Cities”. In *2019 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*, pp. 1–6. IEEE, 2019.
- [15] Y. W. Law, H. R. Pota, J. Jin, Z. Man and M. Palaniswami. “Control and communication techniques for the smart grid: An energy efficiency perspective”. *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 47, no. 3, pp. 987–998, 2014.
- [16] P. Tuset-Peiró, R. D. Gomes, P. Thubert and X. Vilajosana. “Evaluating IEEE 802.15. 4g SUN for Dependable Low-Power Wireless Communications In Industrial Scenarios”. *Available on Preprints*, 2020.
- [17] T. Junjalearnvong, R. Okumura, K. Mizutani and H. Harada. “Performance Evaluation of Multi-hop Network Configuration for Wi-SUN FAN Systems”. In *2019 16th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, pp. 1–6. IEEE, 2019.
- [18] J. Muñoz, E. Riou, X. Vilajosana, P. Muhlethaler and T. Watteyne. “Overview of IEEE802. 15.4 g OFDM and its Applicability to Smart Building Applications”. In *2018 Wireless Days (WD)*, pp. 123–130. IEEE, 2018.
- [19] L. R. Prando, E. R. de Lima, L. S. de Moraes, M. B. Hamerschmidt and G. Fraindenraich. “Experimental Performance Comparison of Emerging Low Power Wide Area Networking (LPWAN) Technologies for IoT”. In *2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, pp. 905–908. IEEE, 2019.
- [20] F. N. Godoi, G. W. Denardin and C. H. Barriquello. “Reliability enhancement of packet delivery in multi-hop wireless sensor network”. *Computer Networks*, vol. 153, pp. 86–91, 2019.
- [21] N. Mohamed and I. Jawhar. “A fault tolerant wired/wireless sensor network architecture for monitoring pipeline infrastructures”. In *2008 Second International Conference on Sensor Technologies and Applications (sensorcomm 2008)*, pp. 179–184. IEEE, 2008.
- [22] L. B. Verri. *A Confiabilidade Prática Na Administração Da Engenharia*. Clube de Autores, 2010.
- [23] T. Critchley. *High availability IT services*. Auerbach Publications, 2014.