



Comparação de Desempenho de Rede Mesh em Campo com os Padrões Wi-SUN FAN 1.0 (FSK) e FAN 1.1 (OFDM)

Tema: Tecnologias Emergentes

Autores: Douglas D. M. Silva

Co-Autores: Thiago C. Rocha, Maurício M. Okuyama, Kristtopher K. Coelho, Lucas C. Moreira, Eduardo C. Cardoso, Gustavo R. Pinheiro, José A. M. Nacif

Empresa: OneRF Networks

Resumo

Devido à significativa evolução e criação de tecnologias emergentes no âmbito da radiofrequência, é de suma importância a validação e consolidação destas tecnologias. Nesse sentido, este trabalho busca evidenciar as melhorias que o padrão Wi-SUN FAN 1.1 tem perante à FAN 1.0, através de diversos experimentos feitos em campo, variando distância e tamanho de payload do pacote enviado. Os resultados indicam uma redução de quase 5 vezes relacionada a latência em alguns cenários da FAN 1.1, e também uma potência de sinal mais robusta em distâncias maiores quando comparado à FAN 1.0.

1. Introdução

A evolução contínua da tecnologia Internet das Coisas (IoT) possibilita diversas aplicações com objetivo de promover a sustentabilidade global. A diversidade de aplicações vem revolucionando inúmeras áreas, como saúde, industrial, automotiva, entre outras. A adoção de tecnologias IoT em cidades inteligentes (Smart cities) tem transformado a maneira como as cidades e empresas gerenciam recursos e serviços essenciais, como água e energia por meio da medição inteligente (Smart metering) e redes inteligentes (Smart grids) (KAWASHIMA; NAGAI, 2024). Nesse contexto, as redes de comunicação desempenham um papel importante, sendo responsáveis pela troca de informações sem fio entre dispositivos, sensores e sistemas coordenadores centrais. Entretanto, escolher a conectividade IoT certa para uma determinada aplicação depende de vários fatores. Os padrões de comunicação LoRa, Sigfox ou NB-IoT priorizam baixo consumo e longo alcance. Os padrões Zigbee, Bluetooth ou Z-Wave são tecnologias que proporcionam baixo consumo e malha, entretanto possuem curto alcance (PHUNG, 2022; KATO, 2015). Entre as tecnologias emergentes, as redes Wi-SUN têm ganhado destaque por sua capacidade de oferecer conectividade robusta, eficiente e escalável, especialmente em cenários que demandam alta confiabilidade e baixo consumo de energia. O Wi-SUN proporciona avanços significativos no desenvolvimento de redes mesh, ao proporcionar interoperabilidade, escalabilidade e eficiência para aplicações como redes inteligentes. O Wi-SUN FAN (Field Area Network) 1.0, consolidou-se como uma referência inicial, adotando a modulação Frequency Shift Keying (FSK) para proporcionar desempenho robusto em redes mesh de baixa complexidade. Contudo, a evolução do Wi-SUN FAN para a versão 1.1, introduz inovações significativas. O suporte à modulação Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) abre perspectiva para melhorias significativas, especialmente em

termos de taxa de transmissão, resiliência a interferências e capacidade de cobertura (KASHIWAGI et al., 2022; KAWASHIMA; NAGAI, 2024).

Embora animadoras, as melhorias teóricas do padrão FAN 1.1 ainda necessitam de avaliações práticas em cenários reais onde os fatores ambientais podem impactar diretamente na propagação dos sinais. Este trabalho avalia o desempenho do padrão Wi-SUN FAN 1.1 (OFDM) em comparação ao FAN 1.0 (FSK) quando aplicado a ambientes reais, considerando métricas para a cobertura de sinal e latência. Esta avaliação apresenta o comportamento dos padrões em relação ao alcance da comunicação e o impacto no tempo de resposta e na entrega de dados em cenários com aumento da carga de tráfego, sendo o OFDM o padrão que obteve melhor desempenho em praticamente todas as métricas avaliadas. Em termos de latência, a FAN 1.1 alcançou valores muito menores em todos os cenários avaliados. E em relação ao alcance, o padrão FAN 1.1 apresentou melhor comportamento em relação à FAN 1.0, que não se desempenhou tão bem à medida que a distância foi sendo incrementada nos experimentos.

O restante deste artigo é organizado da seguinte forma: a Seção 2.1 descreve sobre o padrão de conectividade Wi-SUN FAN; a Seção 2.2 detalha a metodologia proposta para a avaliação do desempenho de rede mesh em campo para os padrões Wi-SUN FAN 1.0 e 1.1; a Seção 2.3 apresenta e discute os resultados. Por fim, a Seção 3 conclui o artigo.

2. Desenvolvimento

2.1. Wi-SUN

O padrão de conectividade wireless Wi-SUN (Wireless Smart Ubiquitous Network) foi criado para suprir as necessidades de conectividade em áreas de campo, com usos destinados à infraestrutura inteligente, como redes elétricas, iluminação pública, medidores hidrelétricos e dispositivos Internet das Coisas (IoT) em geral.

- Com a Wi-SUN Alliance, foi estabelecido o perfil FAN (Field Area Network), que conecta dispositivos de campo com um sistema autoconfigurável, baseado nos padrões IEEE 802.15.4e e 802.15.4g, com suas tecnologias de IPv6, 6LoWPAN e RPL (Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks). Este perfil é notável por sua eficiência energética, escalabilidade e confiabilidade, sendo ideal para redes que necessitam de comunicações seguras e de longa distância. As principais características do Wi-SUN FAN incluem:
- Tecnologia Mesh Autoconfigurável: A rede pode se autoformar e se autorrecuperar, ou seja, a adição de novos dispositivos na rede é feita de forma automática, e caso uma via de comunicação falhe, os dispositivos refazem suas rotas, procurando uma nova conexão que os leve ao roteador de borda.
- Salto em frequência (Frequency Hopping): Usa técnicas de salto de frequência, auxiliando na redução de interferência e aumentando a confiabilidade em ambientes com muito ruído, como zonas urbanas densas. Segurança: Adota uma autenticação robusta, usando o protocolo de acesso 802.1X/EAP-TLS, garantindo confidencialidade nas transações entre os dispositivos.
- Interoperabilidade: Por conta da padronização proveniente da Wi-SUN Alliance, dispositivos de diferentes fabricantes podem se comunicar sem necessidade de grandes ajustes, reduzindo custos de implantação e manutenção. Compatibilidade com IPv6: Com o limite superior de endereçamento do protocolo IPv6,

que suporta 3.4×10^{38} endereços em relação ao IPv4, com cerca de 4.3×10^9 bilhões de endereços, o protocolo escala bem em redes com dispositivos massivamente conectados.

- Eficiência Energética: Projetado para operações de longa duração em dispositivos com baterias ou fontes de baixa potência. Em (KASHIWAGI et al., 2022) os autores realizaram experimentos com a placa de avaliação ROHMB35C5-TOI, os quais alcançaram uma autonomia de mais de 90 meses com duas baterias AA (5000mAh).

2.1.1. Principais diferenças entre FAN 1.0 e FAN 1.1

No desenvolvimento do perfil FAN 1.0, foi adotado a modulação FSK (Frequency-Shift Keying) (MORIKAWA; MIZUTANI; HARADA, 2024), a qual utiliza uma técnica por chaveamento de frequência para garantir baixo consumo energético, sendo eficaz para transmissões de baixa taxa de dados.

Com o avanço tecnológico de medidores inteligentes e suas aplicações, deu-se origem ao desenvolvimento do perfil FAN 1.1, que se diferencia do FAN 1.0 ao suportar a modulação OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing), possibilitando taxas de transferência de dados de até 2,4Mbps (MORIKAWA; MIZUTANI; HARADA, 2024). Além disso, o FAN 1.1 introduz o conceito de nós folha (Leaf Nodes) em redes Wi-SUN, permitindo a integração de aplicações que dependem de dispositivos de baixo consumo energético (Limited Function Nodes).

Dentre outras vantagens do perfil FAN 1.1 destacam-se:

- Flexibilização do uso do espectro, garantindo a acomodação de dispositivos com diferentes requisitos na mesma rede, com menor interferência, ao utilizar a técnica de full-duplex heterogêneo.
- Retrocompatibilidade com a versão 1.0, não tendo necessidade de escolher ou substituir equipamentos que poderiam ser incompatíveis, diminuindo custos com adaptações desnecessárias (KAWASHIMA; NAGAI, 2024).

2.2. Metodologia

Esta Seção apresenta a metodologia utilizada para a realização dos experimentos em campo. Todos os experimentos foram realizados no Campus da Universidade Federal de Viçosa localizado na cidade de Florestal/MG.

2.2.1. Dispositivos

Os equipamentos utilizados para os experimentos consistem em um Network Interface Controller (NIC) OneRF com 1W de potência e system-on-chip (SoC) Silicon Labs, de um Silicon Labs Wi-SUN Wireless Starter Kit (WSTK) com 39 de potência, como ilustrado pelas Figuras 1 e 2.

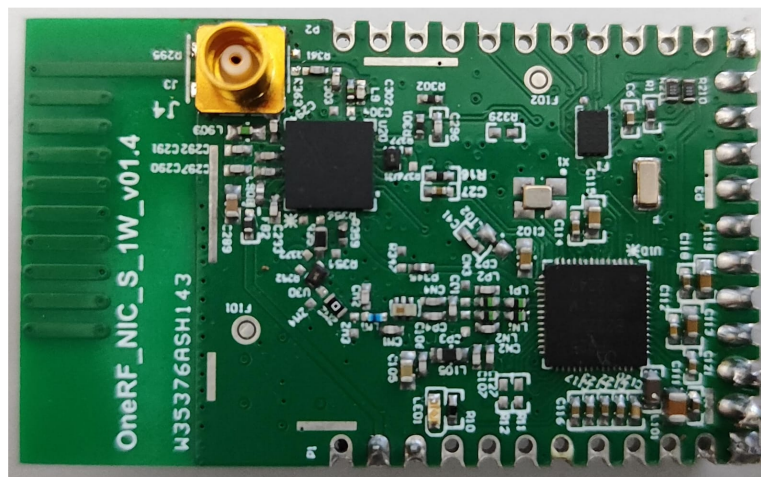


Figura 1. NIC OneRF de 1W

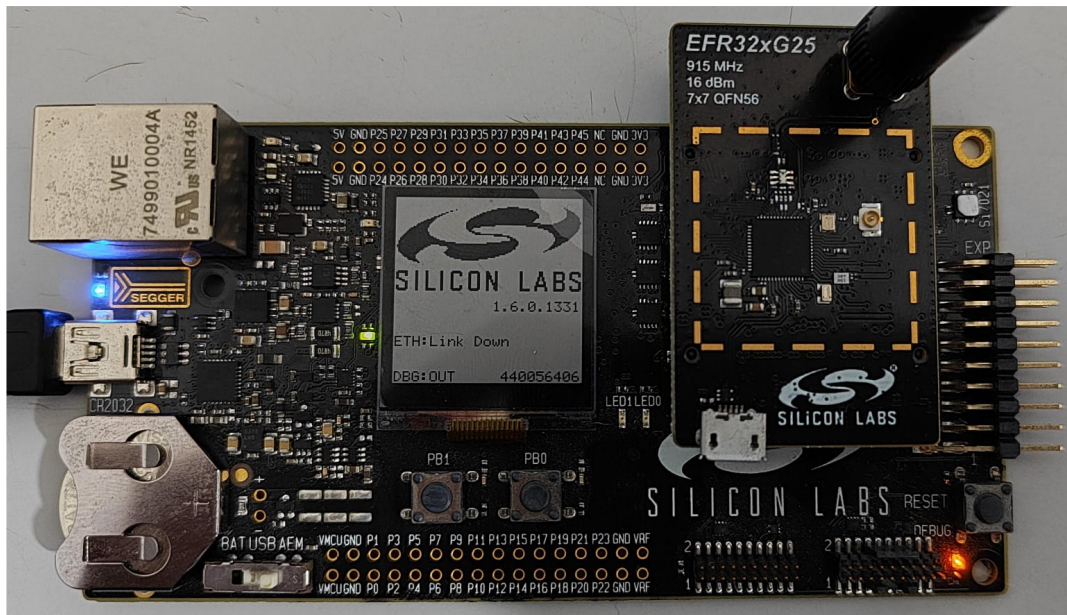


Figura 2. WSTK da Silicon Labs de 39mW

Além destes 2 dispositivos também foi utilizado uma antena externa do tipo N tendo em vista que a NIC possui amplificador e suporte para antena externa, enquanto o WSTK não possui. Para a configuração destes dispositivos e realização dos experimentos para ambas configurações, os valores descritos na Tabela 1 foram utilizados.

Tabela 1. Configuração dos dispositivos para cada modulação

Parâmetros	FSK	OFDM
Dominio Regulatório	BZ	BZ
chan_plan_id	1	5
phy_mode_id	0x12	0x24
tx_power	1	1

2.2.2. Cenário de teste

A métrica escolhida para avaliar a qualidade e a potência do sinal de conexão recebido pelos dispositivos FSK e OFDM foi o RSL (Received Signal level). O RSL consiste em uma métrica EWMA (Exponentially Weighted Moving Average) que representa o valor absoluto do nível de sinal recebido na direção nó para vizinho (RSL_out) e na direção vizinho para nó (RSL_in), calculado relativamente ao ruído térmico padrão (290°K) à uma largura de banda de 1Hz (SILICON LABS, 2022).

Para a obtenção dos valores de RSL de entrada e saída, foram avaliados 4 pontos distintos, variando a distância do Router Node (RN) em relação ao ponto 0, o Border Router (BR), conforme ilustrado na Figura 3. Em cada um dos pontos, foi realizado uma espera de alguns segundos para a estabilização do sinal e posteriormente foram feitas 10 medidas distintas. Vale ressaltar que, os valores de RSL obtidos são relativos ao BR, ou seja, RSL_in é o nível de sinal recebido pelo BR e RSL_out é o nível de sinal transmitido pelo BR. Para a latência, devido ao seu comportamento não depender diretamente da distância, todos os valores foram coletados no mesmo ponto, variando o payload, esperando sempre cerca de 10 a 15 pings para realizar a coleta.

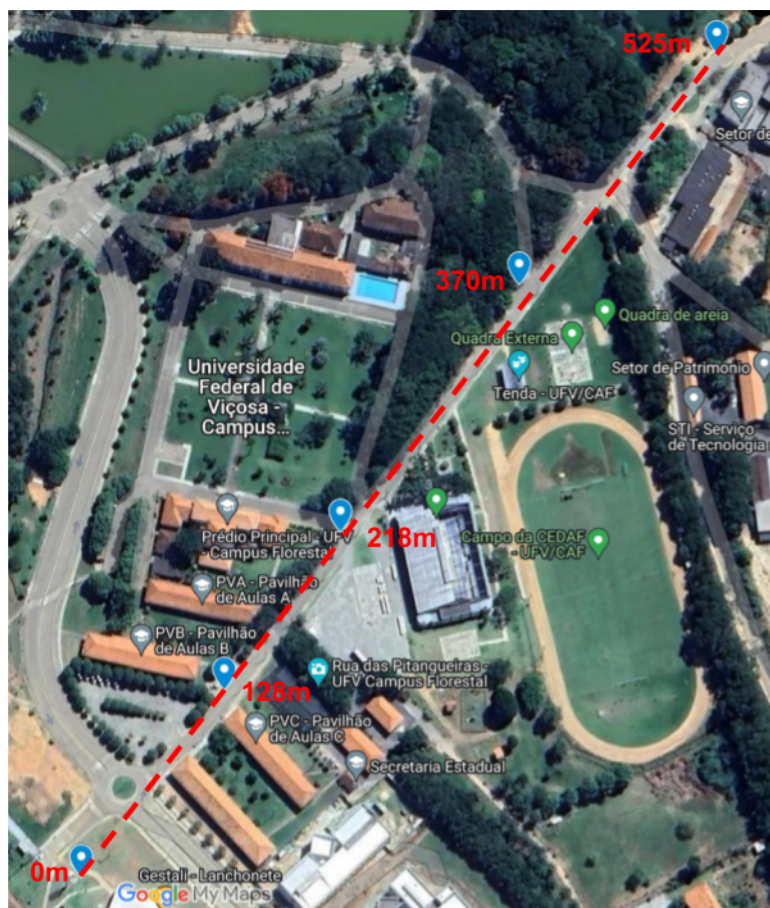


Figura 3. Posicionamento dos dispositivos em campo

Alinhado com o objetivo do trabalho, todos os pontos e métricas foram testados duas vezes, uma vez para a FAN 1.0 (FSK) e outra para a FAN 1.1 (OFDM), para fins de comparação. Vale ressaltar que todas as medições foram realizadas no Campus UFV-Florestal da Universidade Federal de Viçosa em dias com clima mais úmido e chuvoso, o que pode ter gerado pequena variação em alguns pontos de medição, mas que não geram impacto significativo na análise apresentada neste trabalho.

2.3. Resultados

2.3.1. Payload x Latência

A Figura 4 ilustra o gráfico de payload x latência. A modulação OFDM presente na FAN 1.1 se destacou em relação à modulação FSK da FAN 1.0, obtendo valores de latência cerca de 5 vezes menores, e uma menor instabilidade nos cenários de maior payload, onde se espera maior latência e instabilidade. Além disso, é notável que a latência do OFDM para 1.024 Bytes (maior payload avaliado) é similar à latência do FSK para 64 Bytes (menor payload avaliado).

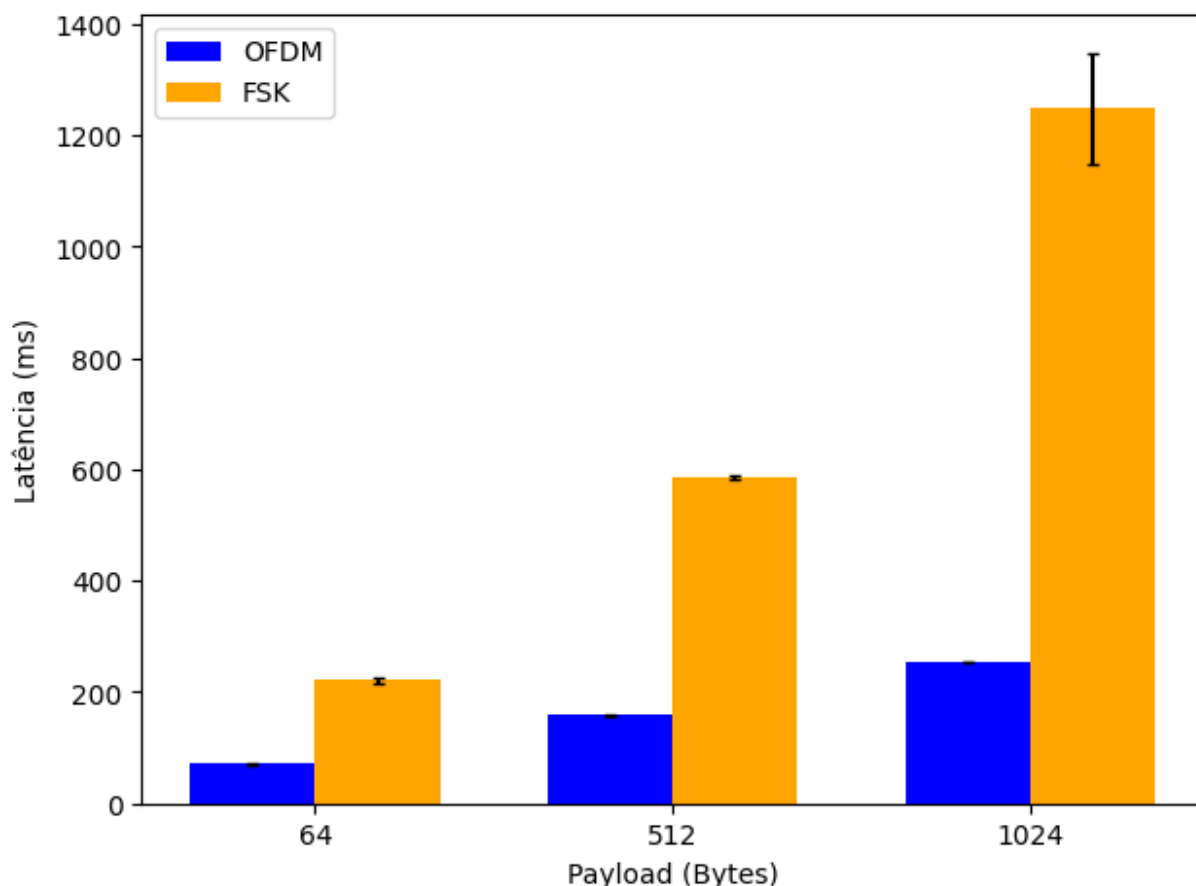


Figura 4. Latência das modulações FSK e OFDM com variação do payload.

Tais resultados demonstram o avanço da FAN 1.1 em relação a FAN 1.0 como citado na seção 2.1.1. Devido ao OFDM suportar uma maior taxa de transmissão de dados, a modulação possui um congestionamento de rede muito menor, resultando em tempos menores de ida e volta dos pacotes.

2.3.2. RSL x Distância

Os resultados obtidos de RSL evidenciam uma melhora na potência de sinal do RN e uma assimetria esperada nos resultados obtidos, visto que o RN possui amplificador de sinal e potência de 1W e o BR 39mW de potência e não possui amplificador.

Além disso, como evidenciado na Tabela 2, as médias dos valores obtidos nos experimentos indicam os avanços do OFDM em relação ao FSK, visto que obteve potência de sinais maiores com as mesmas condições climáticas e de localidade

Tabela 2. Média dos valores RSL de entrada e saída para as modulações OFDM e FSK com variação de distância.

OFDM	RSL_in	RSL_out	FSK	RSL_in	RSL_out
128m	-86	-67	128m	-93	-70,0
218m	-95	-79	218m	-104	-80,5
370m	-98	-82	370m	-104	-82,0
525m	-97	-87	525m	-106	-81,5

Em relação aos valores de saída, a Figura 5 evidencia com mais clareza as vantagens da modulação OFDM. Assim como na análise de latência, os valores se mostraram nitidamente melhores. Analisando o gráfico, é notável que os valores de saída que combinam amplificador e o uso do OFDM apresentam melhorias quando comparado ao FSK para todos os casos, mesmo considerando todos os valores e não só a média, como já havia sido evidenciado na Tabela 2.

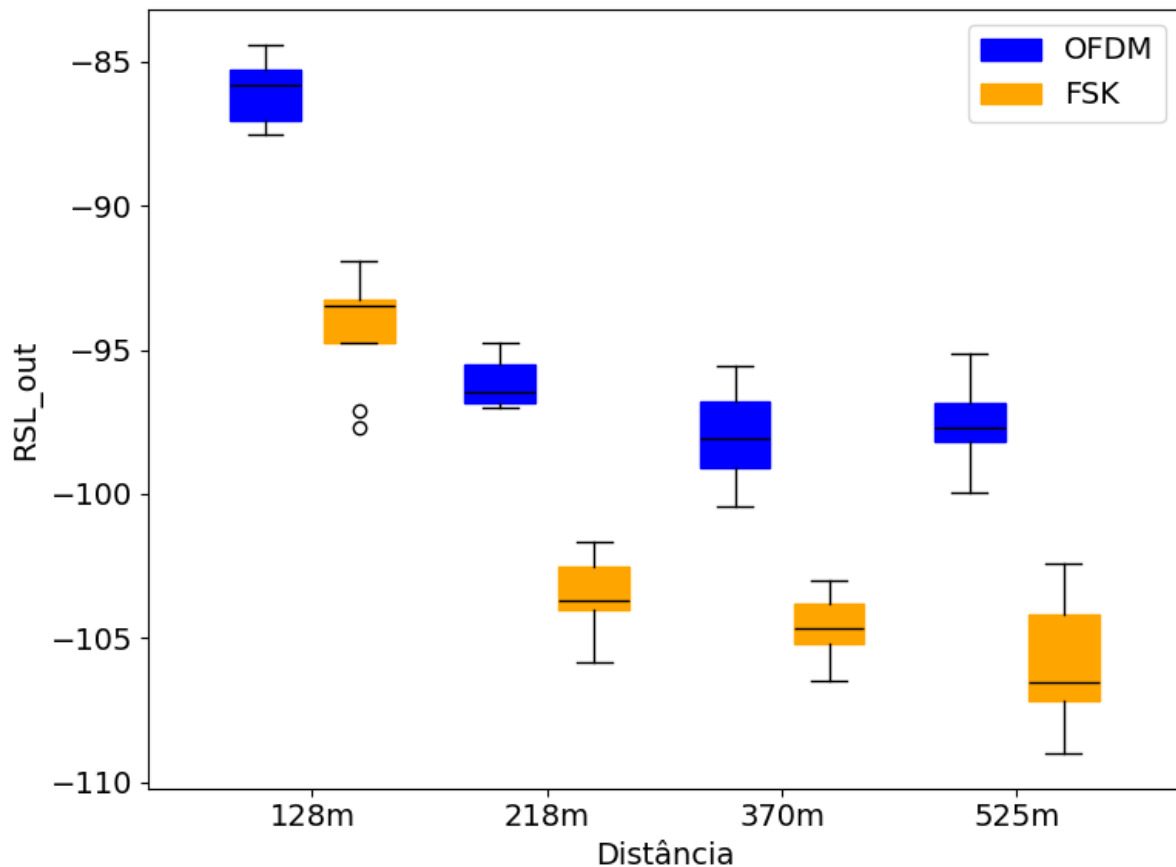


Figura 5. Impacto da distância nos valores de RSL de saída.

Já para os valores de entrada avaliados, como mostra a Figura 6, é possível observar uma aproximação maior entre os resultados do FSK e OFDM. Entretanto, o OFDM apresenta um leve ganho em alguns casos. Esta aproximação se dá pelo fato do dispositivo WSTK não possuir amplificador de sinal, como citado na Seção 2.2.1. Nesse sentido, os valores não atingem o potencial máximo que a modulação OFDM pode alcançar.

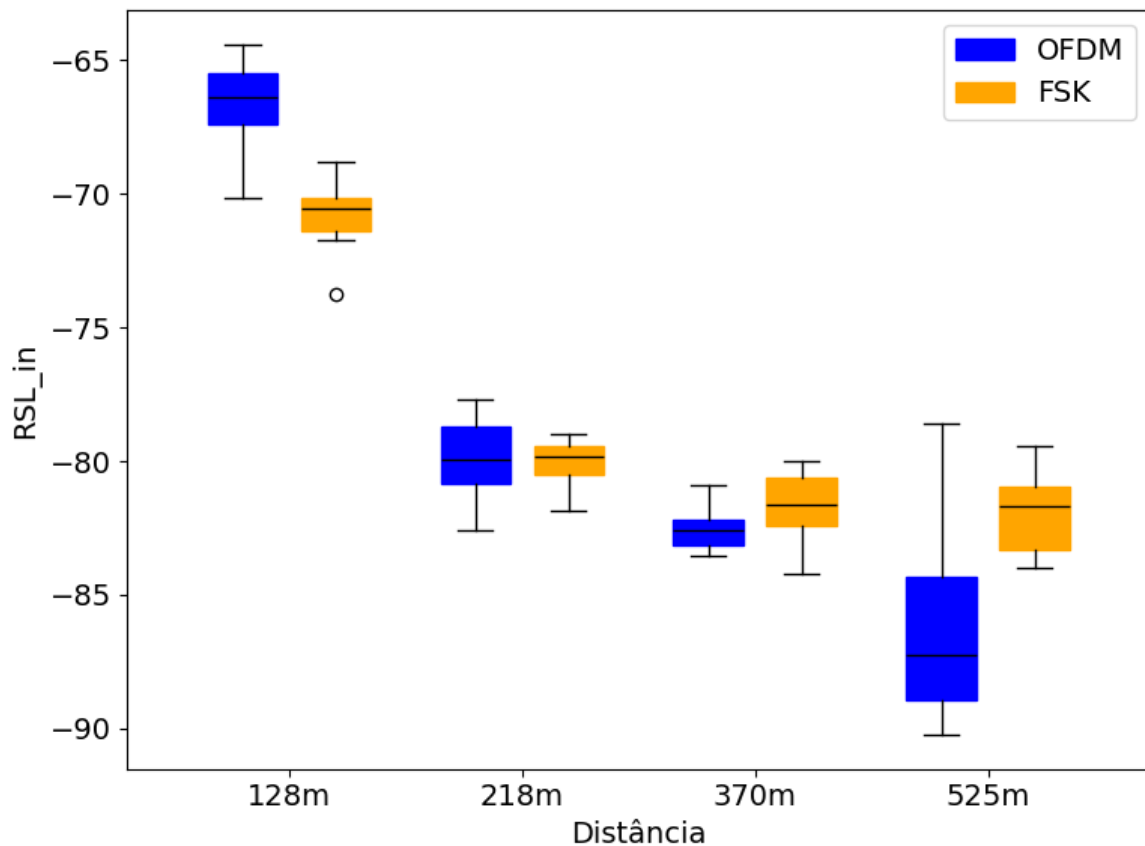


Figura 6. Impacto da distância nos valores de RSL de entrada

3. Conclusão

Com os avanços do Wi-SUN FAN 1.1 perante à FAN 1.0, podemos ver com clareza como que este padrão que está surgindo no mercado tem potencial para ganhar muito espaço. De acordo com as análises feitas neste trabalho, podemos ver o ganho que se obteve em termos de potência de sinal (RSL de entrada e saída) e também de latência. Vale ressaltar também os resultados positivos que temos em equipamentos de 1W de potência, quando comparados aos equipamentos que possuem somente 39mW, como mostram os valores de entrada e saída que obtivemos dos experimentos.

Mesmo com resultados promissores, vale ressaltar novamente que este trabalho possui limitações devido ao clima dos dias que os experimentos foram realizados. Apesar dos números mostrarem os ganhos do uso do OFDM sob o FSK, estes não representam o cenário ótimo, tendo espaço para melhorias e análises mais precisas em melhores condições climáticas e espaciais.

Como trabalhos futuros pretende-se analisar distâncias maiores para se obter os limites destes padrões, comparar diretamente o uso de somente dispositivos de 1W com uma comunicação feita somente com dispositivos de 39mW, além de aplicar modelos que possam extrapolar os resultados e trazer análises mais profundas com cenários mais diversos.

4. Referências bibliográficas

KAWASHIMA, Yuri; NAGAI, Yukimasa. Evaluation of Migration Methods for High Transmission Rate Nodes in RPL. In: IEEE 13th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE). [S.l.]: IEEE, 2024.

PHUNG, Giao Nguyen Quynh. Field Area Communication in Urban Environment-Wi-SUN Protocol, 2022.

KATO, Toyoyuki. Standardization and Certification Process for “Wi-SUN” Wireless Communication Technology. Anritsu, Technical Review, n. 23, p. 23–04, 2015.

KASHIWAGI, Yoshio; HARADA, Hiroshi; MASAKI, Hiroko; OSUMI, Kazuki. Development of Evaluation Systems for Large-Scale Wi-SUN FAN-Based IoT Applications. In: IEEE. 2022 IEEE 33rd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). [S.l.: s.n.], 2022. P. 1–6.

MORIKAWA, Yudai; MIZUTANI, Keiichi; HARADA, Hiroshi. Heterogeneous In-Band Full-Duplex for Simultaneous SUN-OFDM Transmission and SUN-FSK Reception. IEEE Internet of Things Journal, IEEE, 2024.

SILICON LABS. AN1364: Using the Wi-SUN Network Performance Measurement Application. [S.l.], dez. 2022.