

Análise do Efeito da Cooperação em Redes IEEE 802.15.4g sob Interferência LoRaWAN

Eros Leon Kohler, Guilherme de Santi Peron, Glauber Brante e Richard Demo Souza

Resumo— Este artigo analisa o impacto da interferência gerada por uma rede LoRaWAN coexistindo no mesmo ambiente que uma rede IEEE 802.15.4g de interesse. As simulações comparam o modo de múltiplos saltos, restrito ao *dual-hop* nessa análise, com um algoritmo cooperativo, ambos utilizando seleção de *relays*. Os resultados mostram que a modificação do protocolo de comunicação IEEE 802.15.4g visando suportar cooperação, especialmente em ambientes que sofrem interferências de outras redes, chega a transmitir de 4 a 20 vezes mais informação, para os parâmetros de rede aqui considerados, quando comparado com o método tradicional usando o modo *dual-hop*.

Palavras-Chave— IEEE 802.15.4g, LoRaWAN, cooperação, *dual-hop*.

Abstract— This paper analyses the impact of the interference generated by a LoRaWAN network coexisting in the same environment of an IEEE 802.15.4g network of interest. The simulations compare the multi-hop mode, restricted to *dual-hop* in this analysis, with a cooperative algorithm, both using relay selection. The results show that the modification of the IEEE 802.15.4g communication protocol in order to support cooperation, especially in environments that are affected by interference from other networks, transmits from 4 to 20 times more information, with the system parameters here considered, when compare to the traditional method using the *dual-hop* mode.

Keywords— IEEE 802.15.4g, LoRaWAN, cooperation, *dual-hop*.

I. INTRODUÇÃO

A internet das coisas (IoT, *Internet of Things*) representa uma nova tendência para a evolução das comunicações sem fio. De acordo com [1], no ano de 2019 existiam cerca de 27 bilhões dispositivos ativos no mundo, crescendo a uma taxa de aproximadamente 127 novos dispositivos a cada segundo. Um fator fundamental para a popularização da IoT são as LPWAN (*Low-Power Wide-Area Networks*), as quais são vantajosas por fornecer uma boa relação custo/eficiência para conectividade de diversos dispositivos alimentados por bateria, que podem ser distribuídos por uma extensa área, explorando bandas de frequência não licenciadas e comunicações abaixo de 1 GHz. O padrão IEEE 802.15.4 define diferentes esquemas de modulação para essas frequências [2]. Uma das mais importantes é a IEEE 802.15.4g, denominada SUN (*Smart Utility Network*), que opera na banda de 902-928 MHz¹ [3].

E. L. Kohler e G. S. Peron, Pós-Graduação em Sistemas de Energia (PPGSE), Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, e-mails: eros.kohler@gmail.com, peron@utfpr.edu.br; G. Brante, Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CPGEI), UTFPR, Curitiba, e-mail: gbrante@utfpr.edu.br; R. D. Souza, Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, e-mail: richard.demo@ufsc.br. Este trabalho foi realizado com apoio da CAPES, código de financiamento 001, e do CNPq.

¹Valor de banda considerado especificamente para EUA e Américas.

Apesar de existirem diversas tecnologias de comunicação sem fio, a indústria tem apoiado principalmente duas iniciativas: *LoRa Alliance* e *Wi-SUN Alliance*, que regulam as especificações do LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*) e do Wi-SUN (*Wireless SUN*), respectivamente [4]. O LoRaWAN é uma tecnologia LPWAN que utiliza um esquema de modulação proprietário CSS (*Chirp Spread Spectrum*), permitindo aumentar a robustez e alcance do sinal com baixo consumo e taxa de transmissão [5]. O Wi-SUN é um padrão que define o protocolo e a interconexão para dispositivos que utilizam transmissões de curto alcance, com baixa taxa de dados, baixa potência e baixa complexidade [2].

Como LoRaWAN e Wi-SUN operam no espectro não licenciado e compartilham a mesma área com outros dispositivos, essas redes geram interferências umas nas outras. O compartilhamento do espectro é analisado em [6], onde são comparadas diferentes tecnologias de IoT considerando bandas licenciadas (eMTC, *enhanced Machine-Type Communication* e NB-IoT, *Narrowband IoT*) e não licenciadas (Bluetooth, Zigbee, LoRaWAN e SigFox). O trabalho mostra as configurações básicas de cada tecnologia para compartilhamento do meio e menciona possíveis tecnologias futuras, mas sem propor nenhuma solução diferente.

A configuração ótima para LoRaWAN sob interferência Wi-SUN é abordada em [4], no qual são propostos dois algoritmos de otimização para determinar a melhor configuração do LoRaWAN atendendo a um nível mínimo de confiabilidade. Esses algoritmos oferecem uma ferramenta para explorar os *trade-offs* entre a carga da rede e a faixa de cobertura, mostrando uma região viável para configuração da rede LoRaWAN.

A interferência entre rádios LoRa e IEEE 802.15.4g também foi avaliada em [3], onde a taxa de erro de pacotes foi medida em diferentes SINR (*Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*) dentro de uma câmara semianecóica. Por utilizar modulação CSS, os nós LoRa se mostraram mais tolerantes às interferências quando comparados aos nós IEEE 802.15.4g, visto que este grau de tolerância do LoRa é impactado pelo SF e pela largura de banda (BW, *bandwidth*).

Para possibilitar que os sistemas de comunicação sem fio trabalhem com altas taxas de dados, ampla cobertura e efeitos de perdas de canal reduzidos, são utilizadas técnicas de cooperação. Por exemplo, em [7] é feita uma análise da seleção de *relays* em um cenário IoT, mostrando que para uma alta SNR (*Signal-to-Noise Ratio*), o aumento no número de saltos entre os *relays* aumenta a confiabilidade da comunicação, medida pela probabilidade de *outage* e pela probabilidade média de erro de símbolo.

Neste trabalho são estudados os efeitos das interfe-

rências geradas por uma rede LoRaWAN em uma rede IEEE 802.15.4g. As simulações são realizadas comparando o modo de comunicação por múltiplos saltos, restrito ao *dual-hop* (DH) nessa análise, com o modo cooperativo. Cabe ressaltar que o primeiro é o modo padrão de comunicação em uma rede Wi-SUN, a qual compensa o relativamente baixo alcance de comunicação realizando múltiplos saltos para levar informação até o *gateway*. Por outro lado, a cooperação permite que o destino combine as informações transmitidas ao longo dos dois saltos, diminuindo a probabilidade de erro. Para que a comparação entre os dois modos seja feita de forma justa, consideramos que tanto *dual-hop* quanto cooperação realizam seleção de *relays* para encontrar o nó intermediário. Neste trabalho consideramos que a seleção de *relays* é feita por um algoritmo de lógica *fuzzy* proposto em [8], o qual permite balancear a boa qualidade de transmissão do nó intermediário em relação ao destino, com a quantidade de bateria remanescente neste nó, visando aumentar o tempo de vida da rede. Os resultados mostram que o modo cooperativo tem *throughput* significativamente maior que o modo *dual-hop*, a depender da densidade de nós LoRaWAN interferentes e da potência de transmissão. Além disso, a quantidade de informação média transmitida pela rede também é consideravelmente aumentada, chegando a ser de 4 a 20 vezes maior que o modo *dual-hop* tradicional.

O restante do artigo está organizado da seguinte maneira. A Seção II apresenta o modelo do sistema, a Seção III discute os modos de comunicação empregados, seleção de *relays* e métricas. Os resultados numéricos são apresentados da Seção IV e, por fim, a Seção V conclui o artigo.

II. MODELO DO SISTEMA

Considera-se um sistema composto por K nós sensores IEEE 802.15.4g denotados por S_i , $1 \leq i \leq K$, e um *gateway* de destino S_D . Os nós são distribuídos aleatoriamente dentro de uma área quadrada de dimensão $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$, onde o destino se encontra na posição central, com $d = 100 \text{ m}$, conforme a Figura 1. Também são inseridos nós LoRaWAN dentro da mesma área de atuação. Considera-se que a distribuição dos nós IEEE 802.15.4g e dos nós LoRaWAN segue um processo homogêneo de Poisson, com densidades λ_K e λ_L nós/m², respectivamente.

Todos os nós sensores podem assumir o papel de *relay* e atuar como fonte por um certo período de tempo, exceto S_D . O nó S_i , $i \in \{1, \dots, K\}$, funcionando como fonte transmite um símbolo x , que é recebido simultaneamente pelos demais nós S_j , com $j \neq i$ e $j \in \{1, \dots, K, D\}$, dado por

$$y_{ij} = \sqrt{P} \chi_{ij} h_{ij} x + I_j + w, \quad (1)$$

onde P é a potência de transmissão, considerada igual para todos os nós, χ_{ij} é a perda de percurso, h_{ij} representa o coeficiente de desvanecimento, cuja função densidade probabilidade é do tipo Rayleigh quase-estático. Ainda, I_j é a interferência total em S_j gerada pelos nós da rede LoRaWAN, detalhado na Seção II-B, e w é o ruído aditivo Gaussiano branco (AWGN, *additive white Gaussian noise*), com variância $N_0/2$ por dimensão, onde N_0 é a densidade espectral de potência de ruído por Hertz.

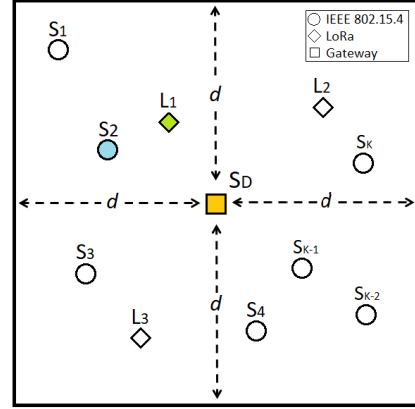


Fig. 1: Os sensores estão distribuídos uniformemente em uma área de $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$, com o destino S_D na posição central. Nesse exemplo, o nó S_2 está atuando como fonte, sofrendo interferência do nó LoRaWAN ativo denotado por L_1 .

A perda de percurso é dada por [9]

$$\chi_{ij} = \frac{G\lambda^2}{(4\pi)^2 d_{ij}^\alpha M_1 N_f}, \quad (2)$$

onde G corresponde ao ganho das antenas do transmissor e receptor, $\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{f_c}$ corresponde ao comprimento de onda, f_c é a frequência da portadora, d_{ij} é a distância entre os nós S_i e S_j , e α é o coeficiente de perda de percurso. Além disso, M_1 é a margem de enlace e N_f a figura de ruído no receptor.

Ainda, o nó *relay* S_j é escolhido de acordo com um algoritmo de seleção de *relays*, tanto para o modo de comunicação *dual-hop* quanto para o modo cooperativo. Neste trabalho, utiliza-se o algoritmo baseado em lógica *fuzzy* proposto por [8], uma vez que ele realiza um balanço entre o desempenho em termos de *throughput* e o consumo de energia.

A. Falha por Desvanecimento

Uma falha na comunicação entre dois nós S_i e S_j pode ocorrer quando a potência instantânea recebida em S_j for menor que a sensibilidade \mathcal{S}_{RX} do receptor. Portanto, uma falha devido ao desvanecimento do canal ocorre com probabilidade

$$p_{ij}^{(\text{desv})} = \Pr\{P_{ij}^{\text{inst}} < \mathcal{S}_{RX}\}, \quad (3)$$

cujas potência instantânea recebida em S_j é $P_{ij}^{\text{inst}} = P \cdot \chi_{ij} \cdot h_{ij}^2$.

B. Falha por Interferência LoRaWAN

A interferência gerada pelos nós da rede LoRaWAN, coexistindo na mesma região espacial da rede IEEE 802.15.4g, impacta diretamente no canal de comunicação. Para calcular a interferência total em um dado nó S_j foi utilizado o estudo realizado por [3] como base. Nesse experimento, dois nós IEEE 802.15.4g foram posicionados a 6,4 m um do outro em uma câmara semianecóica. O nó LoRa interferente foi posicionado a 10,5 m de distância do receptor IEEE 802.15.4g. O estudo mostra que a taxa de perda de pacotes é insignificante enquanto a potência de interferência for no máximo 6 dB maior que a potência recebida. Em outras palavras, a

probabilidade de falha de conexão entre S_i e S_j devido à interferência é

$$p_{ij}^{(\text{interf})} = \Pr\{\text{SIR}_{ij} < -6 \text{ dB}\}, \quad (4)$$

em que a *Signal-to-Interference Ratio* é $\text{SIR}_{ij} = P_{ij}^{\text{inst}}/I_j$ e a interferência total em S_j é

$$I_j = \sum_l \left(\frac{P_{\text{LoRa}} \cdot (\lambda)^2}{(4\pi)^2 \cdot (d_{lj})^\alpha} \cdot h_{lj}^2 \right), \quad (5)$$

onde P_{LoRa} é a potência de transmissão dos nós da rede LoRaWAN, considerada igual para todos os nós, de modo que o índice l pertence ao conjunto de nós interferentes.

C. Probabilidade de Outage

Considera-se que uma *outage* na comunicação entre dois nós ocorre devido a falha por desvanecimento ou por interferência. Assumindo independência entre tais eventos, como é possível haver interseção dos mesmos probabilidade de *outage* é calculada pelo complemento da probabilidade de sucesso. Assim, levando-se em conta que a probabilidade de sucesso ocorre quando não ocorrer uma falha por desvanecimento $(1 - p_{ij}^{(\text{desv})})$ e por interferência $(1 - p_{ij}^{(\text{interf})})$, a probabilidade de *outage* no enlace S_i - S_j é dada por

$$\mathcal{P}_{ij} = 1 - \left(1 - p_{ij}^{(\text{desv})}\right) \cdot \left(1 - p_{ij}^{(\text{interf})}\right). \quad (6)$$

III. MODOS DE TRANSMISSÃO

A. Modo Dual-Hop

A transmissão em múltiplos saltos é o modo padrão de operação nas redes IEEE 802.15.4g. Neste trabalho nos restringimos ao caso *dual-hop* para simplificar a análise, a qual pode ser estendida para mais saltos sem perda de generalidade. Neste modo, a transmissão entre S_i e S_D ocorre através um *relay* S_{j^*} , em que $j^* \in \{1, \dots, K\}$ denota o índice do *relay* selecionado. Assim, S_i transmite em *broadcast* no primeiro instante de tempo, ao passo que S_{j^*} encaminha esta mensagem para S_D no segundo instante. A escolha do *relay* é feita através do algoritmo de lógica *fuzzy*, o qual será apresentado na Seção III-C.

Considerando que cada nó transmite com taxa R bits/s, o *throughput* do modo *dual-hop* é dado por

$$\mathcal{T}_i^{(\text{DH})} = \frac{R}{2} \left(1 - \prod_{j \neq i} \mathcal{P}_{ij}\right) \left(1 - \mathcal{P}_{j^*D}\right), \quad (7)$$

em que o termo $(1 - \prod_{j \neq i} \mathcal{P}_{ij})$, com $i, j \in \{1, \dots, K\}$, denota a probabilidade de que pelo menos um *relay* tenha conseguido decodificar com sucesso a mensagem enviada pela fonte.

B. Modo Cooperativo

Como forma alternativa à transmissão *dual-hop*, assumimos o protocolo cooperativo *Incremental Decode-and-Forward* (IDF) [10]. Neste esquema, S_i transmite em *broadcast* no primeiro instante de tempo e o destino, por sua vez, tenta decodificar a mensagem recebida. Em caso de sucesso na decodificação, confirmada através de um código CRC (*Cyclic Redundancy Check*), S_D envia uma mensagem de ACK

TABELA I: Tabela de regras do algoritmo *fuzzy*.

$E_j \setminus \text{SIR}_{ij}$	Ruim	Médio	Bom
Baixa	Muito Baixo	Baixo	Baixo
Média	Baixo	Médio	Alto
Alta	Médio	Alto	Muito Alto

finalizando a transmissão. Caso contrário, ocorrendo falha na decodificação, o destino requisita uma retransmissão através de uma mensagem de NACK. Assim, o *relay* que irá retransmitir a mensagem da fonte é determinado pelo algoritmo de seleção.

Dessa forma, o protocolo IDF possibilita que o *throughput* possa assumir os valores de R , se a transmissão da fonte for realizada com sucesso, $R/2$, se for necessária a cooperação, ou nulo para os demais casos. Assim, o *throughput* do nó S_i no modo cooperativo é dado por [8]

$$\mathcal{T}_i^{(\text{IDF})} = R \left(1 - \mathcal{P}_{iD}\right) + \frac{R}{2} \cdot \mathcal{P}_{iD} \left(1 - \prod_{j \neq i} \mathcal{P}_{ij}\right) \left(1 - \mathcal{P}_{j^*D}\right). \quad (8)$$

C. Algoritmo Fuzzy de Seleção de Relays

Para selecionar o *relay* responsável por encaminhar a mensagem da fonte para o destino nos dois modos de transmissão, assumimos que existe um canal de retorno do destino para os demais nós, o qual permite fazer estimativas de canal entre cada nó S_i e S_D . Assim, utilizamos o algoritmo proposto por [8], o qual utiliza lógica *fuzzy* buscando equalizar o tempo de vida da rede, com pouco prejuízo ao *throughput*.

A lógica *fuzzy* permite estabelecer diferentes níveis de abstração linguísticos, facilmente modificáveis. Com base no algoritmo proposto por [8], consideramos dois parâmetros de entrada para o nosso cenário: *i.*) SIR_{ij} , a qual permitirá escolher o *relay* menos sujeito a interferências; e *ii.*) a quantidade de energia residual de cada nó (E_j), o que permitirá distribuir o consumo de energia entre vários potenciais *relays*. Dessa forma, descrevemos a entrada SIR_{ij} em função de três funções-membro: (Ruim, Médio, Bom). Seu valor é impactado diretamente pela potência instantânea recebida P_{ij}^{inst} e pela interferência LoRaWAN (I_j). A entrada E_j é também descrita por três funções-membro: (Baixa, Média, Alta), conforme a quantidade de energia atual em cada nó.

A partir da lógica *fuzzy* obtém-se o grau de relevância de cada *relay* utilizando as funções-membro (Muito Baixo, Baixo, Médio, Alto, Muito Alto). As regras para determinação do grau de relevância são apresentadas na Tabela I, seguindo [8]. Por fim, o método do centro de gravidade é utilizado para converter o grau de relevância em um valor numérico $f(\text{SIR}_{ij}, E_j)$, de modo que cada *relay* irá aguardar um tempo $t_j \propto \frac{1}{f(\text{SIR}_{ij}, E_j)}$ antes de retransmitir. Assim, o *relay* S_{j^*} será selecionado depois do tempo $t_{j^*} = \min\{t_j\}$.

Comparado a outros algoritmos de seleção que levam apenas a qualidade do canal em relação ao destino em consideração, o algoritmo *fuzzy* busca balancear *throughput* e consumo de energia. Por exemplo, o algoritmo oportunista proposto em [11] é bastante eficiente em termos de *throughput*, visto que sempre o *relay* com melhores condições até o destino é escolhido para retransmissão. Porém, é bastante comum esta estratégia reduzir o tempo de vida da rede, uma vez que os

relays geograficamente mais próximos do destino tendem a ser constantemente escolhidos para cooperar [8].

D. Quantidade de Informação

Uma métrica bastante importante é a quantidade de informação que é transmitida durante o tempo de vida da rede. Neste trabalho considera-se como tempo de vida o tempo até o primeiro nó sensor ficar sem energia. Dado um tempo discreto n , o restante da bateria de um nó S_i é denotado por $E_i(n)$, sendo que S_i será considerado sem energia quando $E_i = 0$. Assim, o tempo de vida de um sensor S_i é definido como [8]

$$\mathcal{L}_i^{(\text{modo})} = \{n \mid E_i > 0 \wedge E_i(n+1) = 0\}, \quad (9)$$

a qual depende do modo de operação, $\text{modo} \in \{\text{DH}, \text{IDF}\}$.

Durante a transmissão, a energia consumida é dada por $E_{\text{tx}} = \frac{P/\eta + P_{\text{tx}}}{R} \cdot T_m$, em que η é a eficiência do dreno do amplificador de potência, P_{tx} é a potência consumida pelos circuitos de transmissão e T_m é o tamanho mensagem transmitida em bits. Por sua vez, a energia consumida na recepção é dada por $E_{\text{rx}} = \frac{P_{\text{rx}}}{R} \cdot T_m$, onde P_{rx} é a potência consumida pelos circuitos de recepção. Dessa forma, a cada transmissão ou recepção de algum dos nós sensores (excetuando-se S_D), são feitos os decréscimos no valor da energia E_i correspondentes a E_{tx} ou E_{rx} .

Assim, o tempo de vida da rede é dado por $\mathcal{L}_N^{(\text{modo})} = \min \mathcal{L}_i^{(\text{modo})}$, $i \in [1, K]$. Dessa maneira, a quantidade de informação transmitida durante o tempo de vida da rede é dada pelo somatório do *throughput*, multiplicado pelo tamanho das mensagens transmitidas e pelo tempo de vida, *i.e.*,

$$\mathcal{I}_N^{(\text{modo})} = \mathcal{L}_N^{(\text{modo})} \cdot T_m \cdot \sum_i \mathcal{T}_i^{(\text{modo})}. \quad (10)$$

IV. RESULTADOS NUMÉRICOS

Nesta seção os algoritmos são comparados considerando a mesma energia inicial para todos os nós, $E_i = 5$ J, $\forall i$. O tamanho da mensagem transmitida é $T_m = 250$ bytes e demais parâmetros de simulação seguem [12], com $P_{\text{rx}} = 99$ mW, $P_{\text{tx}} = 25$ mW, $f_c = 915$ MHz, $\alpha = 4$, $N_0 = -174$ dBm/Hz, $\eta = 0,35$, $R = 50$ kHz, $B = 10$ kHz, $G = 5$ dBi, $M_1 = 30$ dB e $N_f = 4,4$ dB. Ainda, o valor da sensibilidade do receptor utilizado foi de $S_{\text{RX}} = -110$ dBm, que corresponde ao valor especificado para o rádio CC1350 da *Texas Instruments* [13].

As simulações foram executadas por algoritmos no *Matlab* considerando a média de várias topologias aleatórias que foram sorteadas randomicamente. O número de topologias considerado varia para cada análise.

Inicialmente, foi considerada uma densidade de $\lambda_L = 5 \cdot 10^{-4}$ nós LoRa/m². O número total de nós LoRa dentro da mesma área de atuação da rede IEEE 802.15.4g é obtido pela multiplicação do valor de λ_L pela área da rede, que é de $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$. Assim, para $\lambda_L = 5 \cdot 10^{-4}$, o processo de Poisson considera que 20 nós da rede LoRaWAN, em média, estão transmitindo simultaneamente². Além disso, considera-se que todos os nós da rede LoRaWAN transmitem com a mesma potência $P_{\text{LoRa}} = 14$ dBm [3].

²Em geral, os nós de uma rede LoRaWAN operam com um ciclo de trabalho na ordem de 1%, o que implica em até 2000 nós LoRa ocupando a mesma área que a rede IEEE 802.15.4g nesta análise.

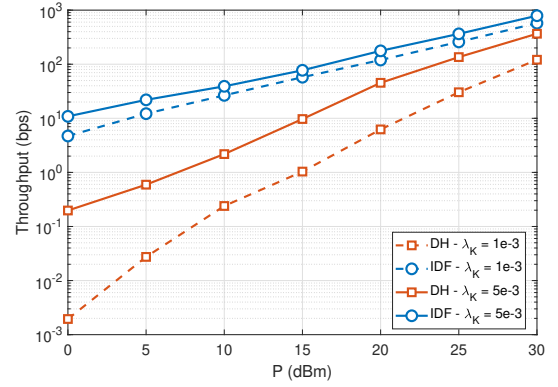


Fig. 2: *Throughput* em função da potência de transmissão dos nós IEEE 802.15.4g operando em DH e IDF, com $\lambda_L = 5 \cdot 10^{-4}$ e $\lambda_K \in \{1 \cdot 10^{-3}, 5 \cdot 10^{-3}\}$.

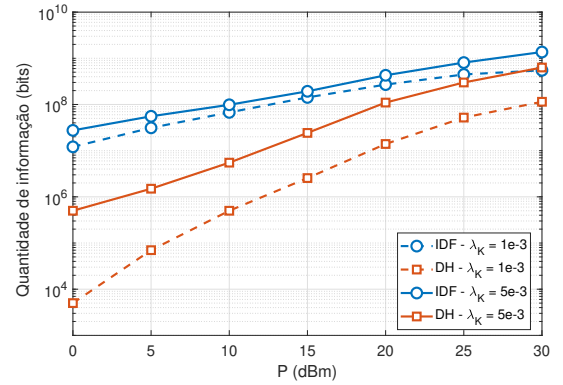


Fig. 3: Quantidade de informação transmitida em função de P , com $\lambda_L = 5 \cdot 10^{-4}$ e $\lambda_K \in \{1 \cdot 10^{-3}, 5 \cdot 10^{-3}\}$.

A Figura 2 mostra o *throughput* de cada modo de operação em função da potência de transmissão dos nós IEEE 802.15.4g, com densidade $\lambda_K \in \{1 \cdot 10^{-3}, 5 \cdot 10^{-3}\}$. Nesse caso, os resultados da simulação refletem a média de 200 topologias aleatórias. Como pode-se observar, o modo cooperativo permite aumentar consideravelmente o *throughput* da rede em comparação com o modo DH tradicional. A Figura 3 complementa a análise em termos da quantidade de informação transmitida pela rede. Novamente, observa-se um ganho importante de desempenho ao se adotar o modo cooperativo, permitindo transmitir até 19,3 vezes mais informação quando $\lambda_K = 1 \cdot 10^{-3}$ e 3,9 vezes quando $\lambda_K = 5 \cdot 10^{-3}$, ambos com $P = 20$ dBm.

Em seguida, consideramos um limiar $\bar{\mathcal{I}}_N$ de quantidade de informação desejado e analisamos a densidade de nós da rede IEEE 802.15.4g necessária para se chegar a esse limiar, operando com ambos os modos DH e IDF. A Figura 4(a) ilustra $\mathcal{I}_N^{(\text{modo})}$ em função de λ_K na faixa de 10^{-3} nós/m², ao passo que a Figura 4(b) considera a faixa de 10^{-5} nós/m² para λ_K . Em ambas as figuras a linha tracejada vermelha representa o limiar de $\bar{\mathcal{I}}_N = 50$ Mbits de informação estabelecido para análise. Além disso, considera-se potência de transmissão dos nós da rede IEEE 802.15.4g de $P = 20$ dBm e densidade de $\lambda_L = 5 \cdot 10^{-4}$ nós LoRa/m². Para melhorar os gráficos e

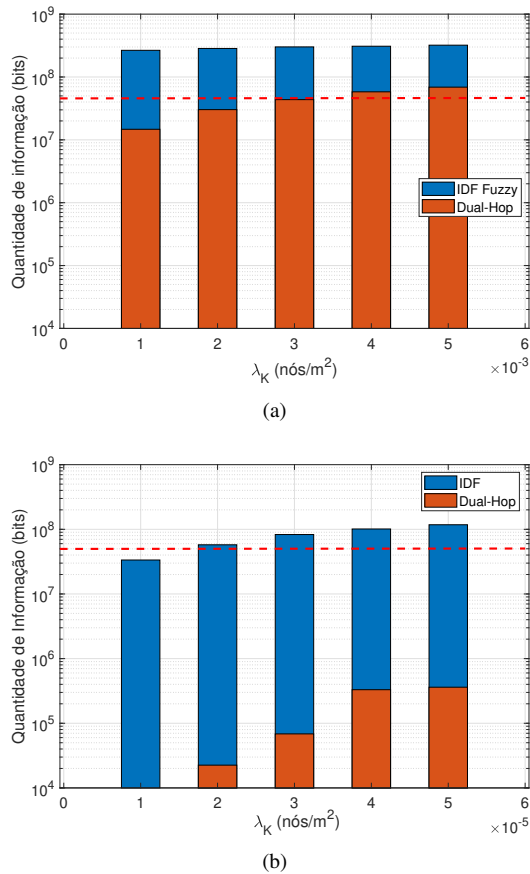


Fig. 4: Quantidade de informação transmitida em função da densidade de nós IEEE 802.15.4g, com $\lambda_L = 5 \cdot 10^{-4}$ e $P = 20$ dBm..

se obter um resultado mais satisfatório, para os cenários que avaliam a quantidade de informação foram sorteadas 10000 topologias aleatórias. Pode-se observar a partir da Figura 4(a) que a densidade mínima de nós IEEE 802.15.4g utilizando o modo DH é próxima a $3 \cdot 10^{-3}$, enquanto o modo IDF ultrapassa \bar{I}_N com $\lambda_K \approx 2 \cdot 10^{-5}$ na Figura 4(b). Isto representa que a quantidade de nós IEEE 802.15.4g necessária para atingir o limiar \bar{I}_N estabelecido é pelo menos 150 vezes menor ao considerarmos um protocolo cooperativo IDF, ao invés do modo de múltiplos saltos padrão desta tecnologia.

Por fim, a Figura 5 mostra $\mathcal{I}_N^{(\text{modo})}$ em função de λ_L para um densidade fixa $\lambda_K = 5 \cdot 10^{-4}$ nós IEEE 802.15.4g/m², a partir da qual é possível observar o impacto da interferência da rede LoRAWAN. Neste exemplo, o modo IDF é capaz de ultrapassar $\bar{I}_N = 50$ Mbits em todos os casos, o que só acontece com o modo DH enquanto $\lambda_L \leq 2 \cdot 10^{-4}$.

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi analisado o impacto do modo cooperativo IDF em uma rede de sensores IEEE 802.15.4g sujeita à interferência de uma rede LoRAWAN coexistindo no mesmo ambiente geográfico. Observou-se que o IDF permite transmitir de 4 a 20 vezes mais informação durante o tempo de vida útil da rede. Isso possibilita distribuir uma quantidade pelo

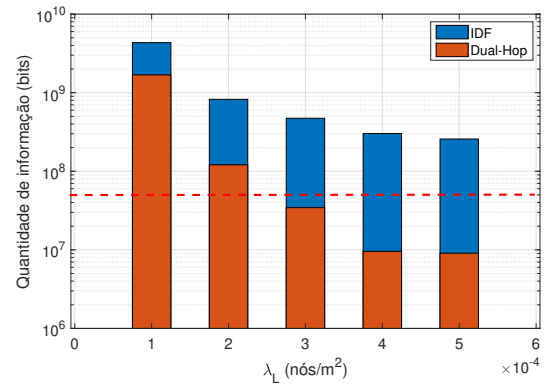


Fig. 5: Quantidade de informação transmitida em função da densidade de nós da rede LoRaWAN, com $\lambda_K = 5 \cdot 10^{-4}$ e $P = 20$ dBm.

menos 150 vezes menor de nós cooperativos para atingir o mesmo objetivo de quantidade de informação que o modo DH, o que poderia viabilizar uma redução significativa de custos de *hardware*.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Bera. (2019) 80 Insightful Internet of Things Statistics (Infographic). [Online]. Available: <https://safeatlast.co/blog/iot-statistics/>
- [2] “IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks,” *IEEE Std 802.15.4-2020 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2015)*, pp. 1–800, 2020.
- [3] C. Orfanidis, M. Feeney, and J. P. Gunningberg, “Investigating interference between LoRa and IEEE 802.15.4g networks,” in *IEEE 13th Int. Conf. on Wireless and Mobile Computing, Netw. and Commun. (WiMob)*, Oct 2017, pp. 1–8.
- [4] A. Hoeller, R. D. Souza, H. Alves, O. L. Alcaraz López, S. Montejo-Sánchez, and M. E. Pellenz, “Optimum LoRaWAN Configuration Under Wi-SUN Interference,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 170936–170948, 2019.
- [5] M. Centenaro, L. Vangelista, A. Zanella, and M. Zorzi, “Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 23, no. 5, pp. 60–67, 2016.
- [6] L. Zhang, Y. Liang, and M. Xiao, “Spectrum Sharing for Internet of Things: A Survey,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 26, no. 3, pp. 132–139, 2019.
- [7] A. Dziri, M. Terre, and N. Nasser, “Performance Analysis of Relay Selection for IoT Networks over Generalized K Distribution,” in *15th Int. Wireless Commun. Mobile Computing Conf. (IWCMC)*, 2019, pp. 1411–1415.
- [8] G. Brante, G. de Santi Peron, R. D. Souza, and T. Abrão, “Distributed Fuzzy Logic-Based Relay Selection Algorithm for Cooperative Wireless Sensor Networks,” *IEEE Sensors J.*, vol. 13, no. 11, pp. 4375–4386, 2013.
- [9] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005.
- [10] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell, “Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062–3080, Dec 2004.
- [11] A. Bletsas, A. Khisti, D. P. Reed, and A. Lippman, “A simple Cooperative diversity method based on network path selection,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 24, no. 3, pp. 659–672, March 2006.
- [12] G. Peron, G. Brante, R. D. Souza, and M. E. Pellenz, “Physical and mac cross-layer analysis of energy-efficient cooperative mimo networks,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 66, no. 5, pp. 1940–1954, 2018.
- [13] T. Instruments. (2020) SimpleLink™ 32-bit Arm Cortex-M3 multiprotocol Sub 1 GHz & 2.4 GHz wireless MCU with 128kB Flash.