

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE ENERGIA

EROS LEON KOHLER

**COMUNICAÇÃO COOPERATIVA EM REDES IEEE
802.15.4G SOB INTERFERÊNCIA LORAWAN**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2020

EROS LEON KOHLER

**COMUNICAÇÃO COOPERATIVA EM REDES IEEE
802.15.4G SOB INTERFERÊNCIA LORAWAN**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Sistemas de Energia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de “Mestre em Engenharia Elétrica” – Área de Concentração: Automação e Sistemas de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme de Santi Peron

Coorientador: Prof. Dr. Glauber Gomes de Oliveira Brante

CURITIBA
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Köhler, Eros Leon

Comunicação cooperativa em redes IEEE 802.15.4g sob interferência LoRaWAN [recurso eletrônico] / Eros Leon Köhler. -- 2020.

1 arquivo eletrônico (46 f.): PDF; 1,09 MB.

Modo de acesso: World Wide Web.

Texto em inglês com resumo em português.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia. Área de Concentração: Automação e Sistemas de Energia. Linha de Pesquisa: Sistemas de Automação e Instrumentação, Curitiba, 2020.

Bibliografia: f. 45-46.

1. Sistemas de energia elétrica - Dissertações. 2. Internet das coisas. 3. Redes elétricas inteligentes. 4. Sistemas de comunicação sem fio. 5. Redes de sensores sem fio. 6. Rádio - Interferência. 7. Interconexão de redes (Telecomunicações). 8. Sistemas de transmissão de dados. 9. Redes de computação - Protocolos - Avaliação. 10. Algoritmos difusos. 11. Energia - Consumo. 12. Métodos de simulação. I. Peron, Guilherme de Santi, orient. II. Brante, Glauber Gomes de Oliveira, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Sistemas de Energia. IV. Título.

CDD: Ed. 23 -- 621.31

Biblioteca Central do Câmpus Curitiba - UTFPR
Bibliotecária: Luiza Aquemi Matsumoto CRB-9/794

TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO

A Dissertação de Mestrado intitulada "**Comunicação Cooperativa em Redes IEEE 802.15.4g sob Interferência LoRaWAN**", defendida em sessão pública pelo candidato(a) **Eros Leon Kohler**, no dia 14 de agosto de 2020, foi julgada para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração Automação e Sistemas de Energia, Linha de Pesquisa Sistemas de Automação e Instrumentação, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Guilherme de Santi Peron – Presidente - UTFPR

Prof. Dr. Marcos Eduardo Pivaro Monteiro - UTFPR

Prof. Dr. Eduardo Gonçalves de Lima - UFPR

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, 14 de agosto de 2020.

Carimbo e Assinatura do(a) Coordenador(a) do Programa

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer aos meus familiares e, principalmente, à minha esposa, pelo seu companheirismo, apoio e compreensão nessa jornada.

Agradeço ao meu orientador, Professor Guilherme Peron, pela sua dedicação e auxílio contínuo para a elaboração desse trabalho. Gostaria de registrar um agradecimento especial ao Professor Glauber Brante, que atuou como meu coorientador, pela sua colaboração, compartilhamento de conhecimento e esforço para fazer de seus alunos ótimos pesquisadores. Fica também um agradecimento para o Professor Richard Demo Souza, por toda sua contribuição revisando os trabalhos e sugerindo maneiras novas para alcançar resultados melhores.

Agradeço aos colegas do Laboratório de Sistemas de Comunicação Sem Fio, que me acompanhavam nas aulas, sejam como alunos ou professores, e sempre estavam dispostos a me ajudar e a discutir ideias durante esse processo.

Por fim, agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), um lugar onde eu me graduei e com o qual tenho uma relação muito especial, e ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia (PPGSE) pela oportunidade de participar desse programa de mestrado, possibilitando que eu seja um profissional mais completo e que possa utilizar meu conhecimento para melhoria da sociedade.

Sucesso é uma consequência e não um objetivo. (Gustave Flaubert)

RESUMO

KOHLER, Eros Leon. Comunicação Cooperativa em Redes IEEE 802.15.4g sob Interferência LoRaWAN. 46 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Sistemas de Energia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

Esta dissertação de mestrado apresenta a análise feita sobre 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*. Pretende-se avaliar o desempenho desses protocolos, de maneira que seja possível transmitir uma grande quantidade de informações durante o tempo de vida útil da rede, sem prejudicar a taxa de comunicação e, dessa forma, dimensionar a rede para consumir o mínimo de recursos necessários. Além disso, foram explorados cenários com diferentes configurações para determinar os impactos causados pela interferência de acordo com a característica de cada rede. 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*. Isso também permite que seja possível distribuir uma quantidade pelo menos 150 vezes menor de nós cooperativos para atingir o mesmo objetivo de quantidade de informação, o que implica em menos investimento em *hardware*.

Palavras-chave: IEEE 802.15.4g, LoRaWAN, cooperação, *dual-hop*

ABSTRACT

KOHLER, Eros Leon. Analysis of the Effect of Cooperation in IEEE 802.15.4g Networks under LoRaWAN Interference. 46 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Sistemas de Energia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

This master's thesis presents the analysis made on the impact of the interference generated by a LoRaWAN network coexisting in the same environment of an IEEE 802.15.4g network of interest. This work 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. It is intended to evaluate the performance of these protocols, so that it is possible to transmit a large amount of information during the lifetime of the network, without impairing the communication rate and, thus, dimensioning the network to consume the minimum of necessary resources. 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 comparing to the traditional method using the dual-hop mode. This also allows it to be possible to distribute at least 150 times fewer cooperative nodes to achieve the same amount of information objective, which means less hardware investment.

Keywords: IEEE 802.15.4g, LoRaWAN, cooperation, dual-hop

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Modelo do sistema	19
Figura 2	– Configuração da interferência LoRa	21
Figura 3	– Diagrama em blocos dos circuitos de transmissão e recepção	23
Figura 4	– Transmissão <i>Dual-hop</i>	25
Figura 5	– Transmissão cooperativa IDF.	27
Figura 6	– Variáveis linguísticas <i>fuzzy</i> X_1 , X_2 , e Y	30
Figura 7	– CDF da relação sinal interferência (SIR_{ij})	31
Figura 8	– Exemplo <i>fuzzy</i>	33
Figura 9	– <i>Throughput</i> operando nos protocolos DH e IDF	36
Figura 10	– Quantidade de informação transmitida ($\mathcal{I}_N^{(modo)}$) em DH e IDF	37
Figura 11	– Impacto da densidade de nós LoRa no <i>Throughput</i>	38
Figura 12	– Análise do <i>throughput</i> em meio menos urbano	39
Figura 13	– <i>Throughput</i> em função da potência de transmissão LoRa	40
Figura 14	– <i>Throughput</i> em função da área da rede	41
Figura 15	– $\mathcal{I}_N^{(modo)}$ com $\lambda_K = 10^{-3}$	42
Figura 16	– $\mathcal{I}_N^{(modo)}$ com $\lambda_K = 10^{-5}$	42
Figura 17	– $\mathcal{I}_N^{(modo)}$ em função de λ_L	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Tabela de regras do algoritmo <i>fuzzy</i>	29
Tabela 2	–	Parâmetros da Simulação.	35

LISTA DE SIGLAS

ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
AF	<i>Amplify-and-Forward</i>
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
BW	<i>Bandwidth</i>
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i>
CoG	<i>Center of Gravity</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
CSS	<i>Chirp Spread Spectrum</i>
DAC	<i>Digital-to-Analog Converter</i>
DH	<i>Dual-hop</i>
eMTC	<i>enhanced Machine-Type Communication</i>
HARQ	<i>Hybrid Automatic Repeat reQuest</i>
IDF	<i>Incremental Decode-and-Forward</i>
IFA	<i>Intermediate Frequency Amplifier</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IPv4	<i>Internet Protocol version 4</i>
IPv6	<i>Internet Protocol version 6</i>
LNA	<i>Low Power Amplifier</i>
LoRaWAN	<i>Long Range Wide Area Network</i>
LPWAN	<i>Low-Power Wide-Area Networks</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
MRC	<i>Maximal Ratio Combining</i>
NB-IoT	<i>Narrowband IoT</i>
PA	<i>Power Amplifier</i>
RPL	<i>Routing Protocol for LLN</i>
SC	<i>Selection Combining</i>
SDF	<i>Selective Decode-and-Forward</i>
SF	<i>Spread Factor</i>
SINR	<i>Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio</i>
SIR	<i>Signal-to-Interference Ratio</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SUN	<i>Smart Utility Network</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

K	quantidade de sensores IEEE 802.15.4g
S_i	nó fonte
S_D	nó destino
λ_K	densidade de nós IEEE 802.15.4g
λ_L	densidade de nós LoRa
x	vetor de dados transmitido
S_j	<i>relay</i>
χ_{ij}	perda de percurso no enlace $i-j$
h_{ij}	coeficiente de desvanecimento do enlace $i-j$
I_j	interferência LoRa total no <i>relay</i>
w	ruído aditivo Gaussiano branco
N_0	densidade espectral de potência de ruído por Hertz
G	ganho das antenas do transmissor e receptor
λ	comprimento de onda
f_c	frequência da portadora
d_{ij}	distância entre o nó S_i e S_j
α	coeficiente de perda de percurso
M_1	margem de enlace
N_f	figura de ruído no receptor
\mathcal{S}_{rx}	sensibilidade do receptor
p_{ij}	probabilidade de falha no enlace $i-j$
$\Pr\{.\}$	probabilidade de ocorrência de um dado evento
P_{ij}^{inst}	potência instantânea recebida em S_j
I_j	interferência total recebida pelo nó S_j
P_{LoRa}	potência de transmissão nós LoRa
l	conjunto de nós LoRa interferentes
\mathcal{P}_{ij}	probabilidade de <i>outage</i> no enlace S_i-S_j
$\mathcal{L}_i^{(modo)}$	tempo de vida da rede
n	tempo discreto
E_i	quantidade de energia restante em um nó
E_{tx}	energia consumida na transmissão
η	eficiência do dreno do amplificador de potência
P_{tx}	potência consumida pelos circuitos de transmissão
R	taxa de bit em bits/s
T_m	tamanho da mensagem transmitida
E_{rx}	energia consumida na recepção
P_{rx}	potência consumida pelos circuitos de recepção
P_{DAC}	potência consumida pelo conversor digital-analógico
P_{mix}	potência consumida pelo <i>mixer</i>
$P_{fil,tx}$	potência dos filtros de recepção
P_{syn}	potência consumida pelo sintetizador de frequência

P_{syn}	potência do sintetizador de frequência
P_{LNA}	potência consumida pelo amplificador de baixo ruído
P_{mix}	potência do <i>mixer</i>
P_{IFA}	potência do amplificador de frequência intermediário
$P_{\text{fil,rx}}$	potência dos filtros de recepção
P_{DAC}	potência do conversor analógico-digital
$\mathcal{I}_{\text{N}}^{(\text{modo})}$	a quantidade de informação transmitida durante o tempo de vida da rede
T_{m}	tamanho da mensagem transmitida
$\mathcal{T}_i^{(\text{DH})}$	<i>throughput</i> do modo DH
$\mathcal{T}_i^{(\text{IDF})}$	<i>throughput</i> do modo cooperativo
X_1	grau de pertinência da relação sinal interferência
X_2	grau de pertinência da energia residual
Y	grau de relevância do <i>relay</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	MOTIVAÇÃO	16
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	Objetivo Geral	16
1.2.2	Objetivos Específicos	16
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	17
2	MODELAGEM DO SISTEMA	18
2.1	SISTEMA DE COMUNICAÇÃO PROPOSTO	18
2.2	TIPOS DE FALHAS	19
2.2.1	Falha por Desvanecimento	19
2.2.2	Falha por Interferência LoRaWAN	20
2.2.3	Probabilidade de <i>Outage</i>	21
2.3	<i>THROUGHPUT</i> E QUANTIDADE DE INFORMAÇÃO	21
3	MODOS DE TRANSMISSÃO	24
3.1	MODO <i>DUAL-HOP</i>	24
3.2	MODO COOPERATIVO	24
3.2.1	Amplifica-e-Envia	25
3.2.2	Decodifica-e-Envia Seletivo	26
3.2.3	Decodifica-e-Envia Incremental	26
3.2.4	Protocolo IDF	26
3.3	ALGORITMO <i>FUZZY</i> DE SELEÇÃO DE <i>RELAYS</i>	27
4	RESULTADOS NUMÉRICOS	35
4.1	ANÁLISE DOS PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO	35
4.2	QUANTIDADE DE INFORMAÇÃO TRANSMITIDA EM FUNÇÃO DA DENSIDADE DE NÓS	39
5	CONCLUSÃO	44
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

A internet das coisas (IoT *Internet of Things*) representa uma evolução das comunicações sem fio. De acordo com (BERA, 2019), no ano de 2019 cerca de 27 bilhões de novos dispositivos foram ativados, o que representa 127 novos dispositivos a cada segundo. Um fator fundamental para a popularização da IoT são as redes de área ampla de baixa potência (do inglês *Low-Power Wide-Area Networks*, LPWAN), 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 (IEEE, 2003). Uma das mais importantes é a IEEE 802.15.4g, denominada SUN (do inglês *Smart Utility Network*), que opera na banda de 902-928 MHz (ORFANIDIS et al., 2017). Esse protocolo teve um grande avanço em relação a especificação original lançada em 2003, o tornando mais apropriado para aplicações *IoT*, onde o endereçamento passou a ser IPv6 ao invés de IPv4, o que simplifica o protocolo e o permite transmitir um pacote maior, saltando de 127 bytes na especificação antiga, para 2047 bytes no IEEE 802.15.4g

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 (HOELLER et al., 2019). O LoRaWAN é uma tecnologia LPWAN que utiliza um esquema de modulação proprietário CSS (*Chirp Spread Spectrum*), permitindo aumentar a robustez e o alcance do sinal com baixo consumo e taxa de transmissão (CENTENARO et al., 2016). O Wi-SUN é um padrão que define um conjunto de protocolos e a interconexão para dispositivos que utilizam transmissões de curto alcance, com baixa taxa de dados, baixa potência e baixa complexidade (IEEE, 2016).

Como o LoRaWAN e o Wi-SUN operam no espectro não licenciado e compartilham a mesma área com outros dispositivos, essas redes geram interferências umas nas outras. Neste sentido, o compartilhamento do espectro é analisado em (ZHANG et al., 2019), onde são comparadas diferentes tecnologias de IoT considerando bandas licenciadas eMTC (do inglês, *enhanced Machine-Type Communication*) e NB-IoT (do inglês, *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.

Uma análise dos impactos das interferências dos sinais LPWAN é explorada em (RAUH et al., 2018). Nesse estudo, através de simulações com processamento de imagens e medições em campo, é proposto um *framework* que define os parâmetros para um modelo de ocupação para as bandas não licenciadas abaixo de 1 GHz. Os resultados mostram que os acessos aos canais ficam restritos a algumas regiões, mapeadas a partir da frequência central, da banda e do comprimento e taxa de chegada dos pacotes no canal, que são demonstrados pelo modelo para caracterizar a ocupação dos canais em um ambiente urbano típico. Em (MIKHAYLOV et al., 2017) é feito um estudo experimental sobre a interferência entre redes LoRa. Os resultados apresentam as características de interferência dos nós LoRa e as condições para receber os pacotes corretamente, dadas as configurações de taxa de dados, modulação, potência do sinal e tamanho do pacote.

A configuração ótima para LoRaWAN sob interferência Wi-SUN é abordada em (HOELLER et al., 2019), no qual são propostos dois algoritmos de otimização para determinar a melhor configuração do LoRaWAN atendendo a um nível mínimo de confiabilidade. Sob a interferência de uma rede IEEE 802.15.4g, foi observado como um fator de espalhamento SF (*Spreading Factor*) maior não necessariamente leva a uma melhor configuração para a rede LoRaWAN. Por um lado, um SF maior implica em uma robustez maior na transmissão. Entretanto, o tempo de propagação maior deste pacote o torna mais susceptível a se sobrepor com as transmissões IEEE 802.15.4g. Em relação aos algoritmos propostos, estes oferecem uma ferramenta para explorar os balanços 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 (ORFANIDIS et al., 2017), onde a taxa de erro de pacotes foi medida em diferentes SINR (*Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*) dentro de uma câmara semi-anecoica. 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 (do inglês, *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. A comunicação cooperativa é um processo para transmitir um sinal por um nó fonte em um meio sem fio, em que um nó vizinho denominado

relay retransmite as informações da fonte para o destino. As principais vantagens dessa técnica são aumentar a confiabilidade, taxa, capacidade e cobertura das transmissões sem fio (AISHWARYA; KIRTHIGA, 2018). A comunicação cooperativa é empregada para diminuir o consumo de energia dos nós, pois ajuda na seleção de melhores enlaces de retransmissão, o que possibilita economizar energia. Ainda, a partir da seleção de *relays* as redes cooperativas possibilitam explorar a diversidade espacial, onde uma quantidade maior de sensores está disponível e se tem melhores chances de se ter um caminho com *relays* com boas condições para retransmitir a informação. Entretanto, isso faz com que a complexidade do sistema também aumente, pois é necessário coordenar de maneira eficiente a comunicação entre a fonte e os múltiplos *relays* para evitar colisões. Por exemplo, em (DZIRI et al., 2019) é feita uma análise da seleção de *relays* em um cenário IoT, mostrando que para uma alta SNR (do inglês, *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 interferências geradas por uma rede LoRaWAN em uma rede IEEE 802.15.4g, na qual se baseia o padrão Wi-SUN. As simulações são realizadas comparando o modo de comunicação por múltiplos saltos, restrito ao *dual-hop* (DH) nesta 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, considera-se que tanto *dual-hop* quanto cooperação realizam seleção de *relays* para encontrar o nó intermediário. Além disto, neste trabalho, diferente do que é utilizado normalmente em redes Wi-SUN como o protocolo RPL (*Routing Protocol for LLN*), considera-se que a seleção de *relays* é feita por um algoritmo de lógica *fuzzy* proposto em (BRANTE et al., 2013). Esse algoritmo 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 apresenta *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.

1.1 MOTIVAÇÃO

Como os dispositivos IEEE 802.15.4g operarem no espectro não licenciado, estes estão sujeitos a interferências causadas por outras redes que compartilham o meio físico. Dessa forma, é importante avaliar os efeitos que essas redes interferentes causam na comunicação. Nesse cenário, o uso de esquemas cooperativos se mostra uma estratégia interessante. Além de conseguir reduzir o consumo energético, devido à diversidade gerada pela colaboração entre seus nós, a partir da cooperação identifica-se que é possível mitigar o impacto da interferência gerada por uma rede adjacente, no caso deste trabalho, LoRaWAN.

Com esse fim são avaliados dois protocolos de comunicação, onde é medido o desempenho de cada esquema com base no *throughput* e na quantidade de informação transmitida. Propõe-se mostrar que, a partir de uma simples mudança em relação ao que é tradicionalmente aplicado, é possível ter um ganho de eficiência, permitindo que uma quantidade maior de informação seja transmitida por cada nó. Como nas redes de sensores sem fio os nós podem ser dispostos em regiões de difícil acesso, otimizar a rede para utilizar menos dispositivos pode trazer vantagens para sua manutenção, além de viabilizar a redução no valor de investimento em *hardware*.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Esta dissertação tem como objetivo avaliar o desempenho da comunicação cooperativa em relação ao esquema de comunicação tradicional *dual-hop* em uma rede IEEE 802.15.4g que sofre interferência de uma rede LoRaWAN, considerando a taxa de comunicação e quantidade de informação transmitida durante o tempo de vida útil da rede como métricas de desempenho.

1.2.2 Objetivos Específicos

- identificar os efeitos que podem gerar falhas de comunicação na rede;
- avaliar os impactos da interferência da rede LoRaWAN;
- analisar o desempenho da comunicação a partir de técnicas de cooperação e *dual-hop*;

- implementar um algoritmo para fazer a seleção dos *relays* que faça o balanço entre energia e *throughput*;
- avaliar os resultados obtidos em função dos parâmetros estabelecidos.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este documento está organizado da seguinte forma: No Capítulo 2 é feita uma descrição detalhada do modelo do sistema considerado para a simulação dos protocolos de comunicação. Primeiramente é apresentada a composição do sistema, detalhando as equações que caracterizam o sinal que está sendo propagado e como é dada a perda de percurso. Posteriormente, são descritas as condições de falha de comunicação, caracterizadas pelo desvanecimento e por interferências introduzidas por uma rede LoRaWAN atuando no mesmo ambiente. Na sequência são detalhadas as métricas utilizadas para avaliar o sistema, onde foram consideradas a quantidade de informação transmitida por um nó durante o tempo de vida da rede e a taxa de transmissão. No Capítulo 3 são apresentados os protocolos utilizados para avaliar o desempenho da rede. São apresentadas as principais características de cada protocolo e como os mesmos foram implementados nas simulações. Os resultados numéricos são apresentados no Capítulo 4. Por fim, o Capítulo 5 conclui o trabalho e indica propostas de trabalhos futuros sobre o tema.

2 MODELAGEM DO SISTEMA

Este capítulo apresenta o modelo do sistema que foi considerado para realizar as simulações do processo de comunicação em uma rede IEEE 802.15.4g sujeita à interferência de uma rede LoRaWAN. Também são detalhados os modos de falha que foram adotados para as análises da comunicação e interferência, bem como as métricas utilizadas para fazer a avaliação de cada protocolo de comunicação.

2.1 SISTEMA DE COMUNICAÇÃO PROPOSTO

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 urbana 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. Além disso, 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/ m^2 , 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 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

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

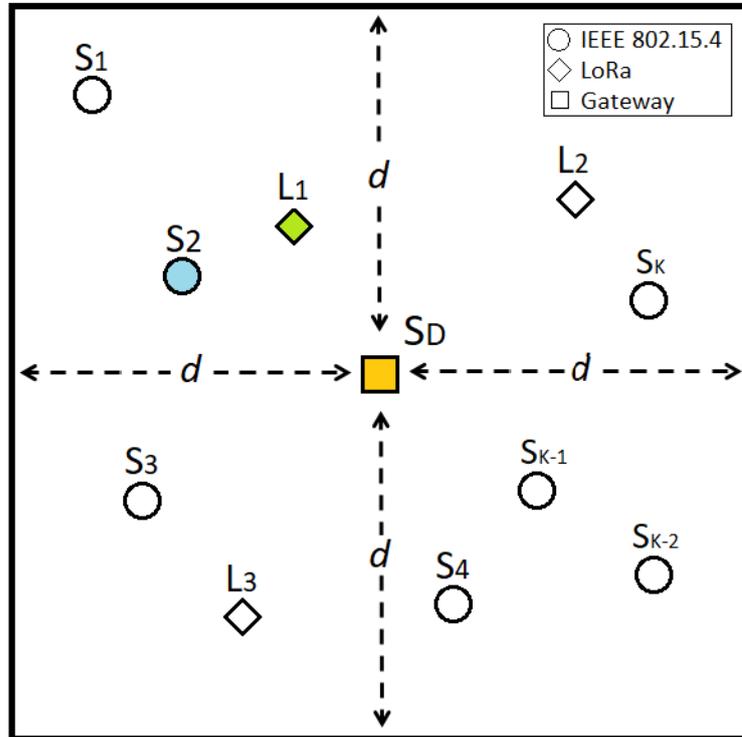
onde P é a potência de transmissão, considerada igual para todos os nós, χ_{ij} é a perda de percurso, h_{ij} representa o coeficiente de desvanecimento, cuja função densidade probabilidade é do tipo Rayleigh quase-estático. Ainda, I_j é a interferência total em S_j gerada pelos nós da rede LoRaWAN, detalhado na Seção 2.2.2, 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.

A perda de percurso é dada por (GOLDSMITH, 2005)

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

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

Figura 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 .



Fonte: Autoria própria.

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.

Ademais, 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 (BRANTE et al., 2013), detalhado na Seção 3.3, uma vez que ele realiza um balanço entre o desempenho em termos de *throughput* e o consumo de energia.

2.2 TIPOS DE FALHAS

2.2.1 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 S_{rx} do receptor. Portanto, uma

falha devido ao desvanecimento do canal ocorre com probabilidade

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

onde p_{ij} corresponde à probabilidade de falha no enlace i - j e $\Pr\{\cdot\}$ é a probabilidade de ocorrência de um dado evento. A potência instantânea (P_{ij}^{inst}) recebida em S_j é dada por

$$P_{ij}^{\text{inst}} = P \cdot \chi_{ij} \cdot h_{ij}^2. \quad (4)$$

2.2.2 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 (ORFANIDIS et al., 2017) como base. Nesse experimento, dois nós IEEE 802.15.4g foram posicionados a 6,4 m um do outro em uma câmara semi-anecoica, conforme ilustrado na Figura 2. O nó LoRa interferente foi posicionado a 10,5 m de distância do receptor IEEE 802.15.4g. O estudo foi feito utilizando vários fatores de espalhamento, larguras de banda e potências de transmissão para os nós LoRaWAN e IEEE 802.15.4g, mostrando 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

$$p_{ij}^{(\text{interf})} = \Pr\{\text{SIR}_{ij} < -6 \text{ dB}\}, \quad (5)$$

em que a relação sinal interferência (SIR, do inglês *Signal-to-Interference Ratio*) é

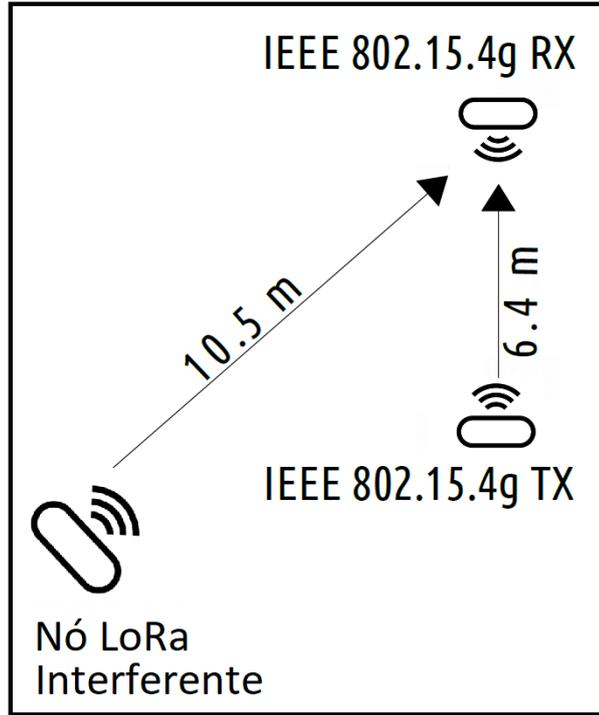
$$\text{SIR}_{ij} = P_{ij}^{\text{inst}} / I_j \quad (6)$$

e a interferência total em S_j , I_j , é dada por

$$I_j = \sum_l \left(\frac{P_{\text{LoRa}} \cdot (\lambda)^2}{(4\pi)^2 \cdot (d_{lj})^\alpha} \cdot h_{lj}^2 \right), \quad (7)$$

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.

Figura 2 – Configuração do nó LoRa interferindo na comunicação IEEE 802.15.4g



Fonte: Adaptado de (ORFANIDIS et al., 2017)

2.2.3 Probabilidade de *Outage*

Considera-se que uma *outage* na comunicação entre dois nós ocorre devido à falha por desvanecimento ou por interferência. Assumindo independência entre tais eventos, como é possível haver interseção dos mesmos, a 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 , \mathcal{P}_{ij} , é dada por

$$\mathcal{P}_{ij} = 1 - \left(1 - p_{ij}^{(\text{desv})}\right) \cdot \left(1 - p_{ij}^{(\text{interf})}\right). \quad (8)$$

2.3 THROUGHPUT E QUANTIDADE DE INFORMAÇÃO

Foram consideradas duas métricas para avaliação do desempenho do sistema, o *throughput*, que corresponde à taxa média vista pelo receptor, e a quantidade de informação que é transmitida durante o tempo de vida da rede. Neste trabalho considera-se como tempo de vida $\mathcal{L}_i^{(\text{modo})}$ 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 (BRANTE et al., 2013)

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

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

Durante a transmissão, a energia consumida, E_{tx} , é dada por

$$E_{\text{tx}} = \frac{P/\eta + P_{\text{tx}}}{R} \cdot T_{\text{m}}, \quad (10)$$

em que η é a eficiência do dreno do amplificador de potência, P_{tx} é a potência consumida pelos circuitos de transmissão, R corresponde à taxa de bit em bits/s e T_{m} é o tamanho mensagem transmitida em bits. Por sua vez, a energia consumida na recepção, E_{rx} , é dada por

$$E_{\text{rx}} = \frac{P_{\text{rx}}}{R} \cdot T_{\text{m}}, \quad (11)$$

onde P_{rx} é a potência consumida pelos circuitos de recepção.

A Figura 3 apresenta o diagrama em blocos com o modelo de consumo de energia dos circuitos de transmissão e recepção (CUI et al., 2004). Pode-se identificar os seguintes blocos de transmissão: conversor digital-analógico (DAC, do inglês *Digital-to-Analog Converter*), filtros de transmissão, *mixer*, amplificador de potência (PA, do inglês *Power Amplifier*) e sintetizador de frequência, descrito na figura como (LO). Assim, tem-se que

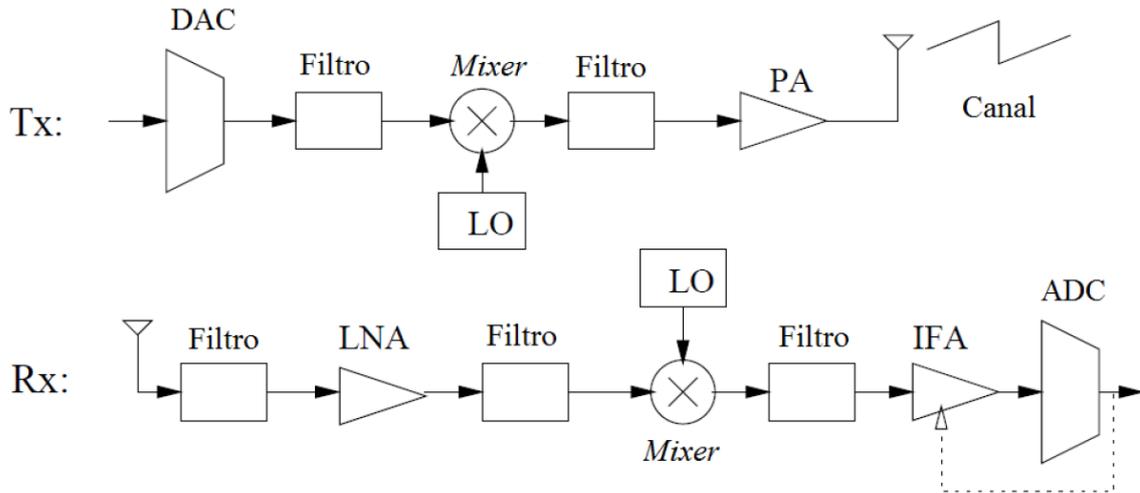
$$P_{\text{tx}} = P_{\text{DAC}} + P_{\text{mix}} + P_{\text{fil,tx}} + P_{\text{syn}}, \quad (12)$$

onde P_{DAC} é a potência consumida pelo conversor digital-analógico, P_{mix} é a potência consumida pelo *mixer*, $P_{\text{fil,tx}}$ é a potência dos filtros de recepção e P_{syn} é a potência consumida pelo sintetizador de frequência. Já no receptor, pode-se identificar os seguintes blocos: amplificador de baixo ruído (LNA, do inglês *Low Noise Amplifier*), amplificador de frequência intermediário (IFA, do inglês *Intermediate Frequency Amplifier*), filtros de recepção e conversor analógico-digital (ADC, do inglês *Analog-to-Digital Converter*). Também é ilustrado o sintetizador de frequências (LO). Assim, tem-se que

$$P_{\text{rx}} = P_{\text{syn}} + P_{\text{LNA}} + P_{\text{mix}} + P_{\text{IFA}} + P_{\text{fil,rx}} + P_{\text{DAC}}, \quad (13)$$

onde P_{syn} corresponde à potência do sintetizador de frequência, P_{LNA} é a potência consumida pelo amplificador de baixo ruído, P_{mix} é a potência do *mixer*, P_{IFA} representa a potência do amplificador de frequência intermediário, $P_{\text{fil,rx}}$ corresponde à potência dos filtros de recepção e P_{DAC} é a potência do conversor analógico-digital.

Figura 3 – Diagrama em blocos dos circuitos de transmissão e recepção



Fonte: Adaptado de (CUI et al., 2004)

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, $\mathcal{I}_N^{(\text{modo})}$, é dada pelo somatório do *throughput*, multiplicado pelo tamanho das mensagens transmitidas (T_m) e pelo tempo de vida, *i.e.*,

$$\mathcal{I}_N^{(\text{modo})} = \mathcal{L}_N^{(\text{modo})} \cdot T_m \cdot \sum_i \mathcal{T}_i^{(\text{modo})}. \quad (14)$$

3 MODOS DE TRANSMISSÃO

Neste capítulo são apresentados os dois modos de comunicação empregados, *dual-hop* e cooperativo, bem como o algoritmo de seleção de *relays* adotado para ambos os modos.

3.1 MODO *DUAL-HOP*

A transmissão em múltiplos saltos é o modo padrão de operação nas redes IEEE 802.15.4g. Neste trabalho restringe-se 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 de 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, conforme é ilustrado na Figura 4. A escolha do *relay* é feita através do algoritmo baseado em lógica *fuzzy*, o qual será apresentado na Seção 3.3.

Considerando que cada nó transmite com taxa R bits/s, o *throughput* ($\mathcal{T}_i^{(\text{DH})}$) é dado por

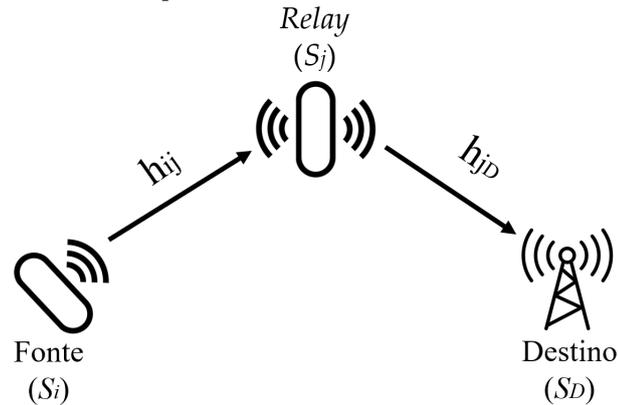
$$\mathcal{T}_i^{(\text{DH})} = \frac{R}{2} \left(1 - \prod_{j \neq i} \mathcal{P}_{ij} \right) \left(1 - \mathcal{P}_{j^*D} \right), \quad (15)$$

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. Conforme mostrado em (15), o *throughput* pode assumir valor $R/2$ ou 0, em caso de sucesso e falha, respectivamente.

3.2 MODO COOPERATIVO

A comunicação cooperativa é um sistema de transmissão no qual dispositivos compartilham suas antenas em um ambiente multiusuário (SAH; SANDHU, 2017). Assim, a ideia básica é que os dispositivos em uma rede sem fio possam se ajudar para enviar sinais para o destino de forma cooperativa. As informações de dados de cada nó são enviadas para o destino não apenas pelo nó fonte, mas também por outros nós (*relays*). Dessa forma, o processo de decodificação da mensagem pelo destino se torna mais confiável, uma vez

Figura 4 – Transmissão *Dual-hop*.



Fonte: Autoria própria.

que a probabilidade de haver um caminho com condições melhores para a transmissão é bem maior. Pode-se dizer, portanto, que o sistema de comunicação cooperativa gera um sistema MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) virtual e, por sua vez, alcança diversidade espacial (SAH; SANDHU, 2017). Uma vantagem em relação ao MIMO convencional é que não é necessário se preocupar com o espaçamento entre as antenas. O compartilhamento dos nós no sistema cooperativo é bastante importante, pois leva à economia dos recursos da rede, como consumo de energia e processamento (LIU; KWASINSKI, 2009).

Um aspecto fundamental do processo de comunicação cooperativa é o processamento do sinal recebido do nó de origem pelo *relay*. Esses diferentes esquemas de processamento resultam em diferentes protocolos de comunicação, onde a maneira como o canal é utilizado pode influenciar na eficiência da rede. Uma característica que pode ser considerada por exemplo, é a existência de um canal de retorno por parte do destino para a fonte e *relay*. Nos protocolos sem retorno os recursos do canal são divididos entre a fonte e o *relay* de uma maneira fixa (determinística). O processamento no *relay* difere de acordo com o protocolo empregado. A seguir são mostrados exemplos desses protocolos.

3.2.1 Amplifica-e-Envia

No protocolo Amplifica-e-Envia (AF, do inglês *Amplify-and-Forward*), o *relay* aplica um ganho de potência no sinal para tentar compensar os efeitos de atenuação e ruídos do canal e retransmite essa versão ampliada para o destino. Porém, ao fazer isso também amplifica o ruído aditivo. Para a decodificação, ao serem recebidos no destino, os dois sinais provenientes da fonte e do *relay* são combinados. Uma desvantagem desse protocolo é que o desempenho do sistema pode ser reduzido, devido à alta propagação de

erros por parte do *relay*.

3.2.2 Decodifica-e-Envia Seletivo

No protocolo Decodifica-e-Envia Seletivo (SDF, do inglês *Selective Decode-and-Forward*) é estabelecida uma condição para que o *relay* atue. A premissa é que o *relay* consiga detectar se a palavra estimada corresponde ou não à mensagem original vinda da fonte. Dessa forma, apenas se a decodificação estiver livre de erros o *relay* irá reencaminhar a informação ao destino.

3.2.3 Decodifica-e-Envia Incremental

Quando existe um canal de retorno a retransmissão nem sempre é necessária. Um exemplo é o protocolo Decodifica-e-Envia Incremental (IDF, do inglês *Incremental Decode-and-Forward*). Esse protocolo explora uma realimentação por parte do destino para a fonte e o *relay*, onde é necessário possuir um canal de retorno entre o destino e os demais nós. Neste caso, dependendo da resposta do destino, a cooperação poderá ser realizada ou não (PERON, 2012).

Dadas suas características esse protocolo se mostra bastante interessante, pois permite que a energia seja economizada, uma vez que não existe a obrigatoriedade de se reenviar a informação, evitando que o *relay* seja acionado nesse processo. Dessa forma, como alternativa à transmissão *dual-hop*, neste trabalho assume-se o protocolo cooperativo IDF (LANEMAN et al., 2004).

3.2.4 Protocolo IDF

A comunicação pelo esquema IDF se dá da seguinte maneira. O nó 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 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.

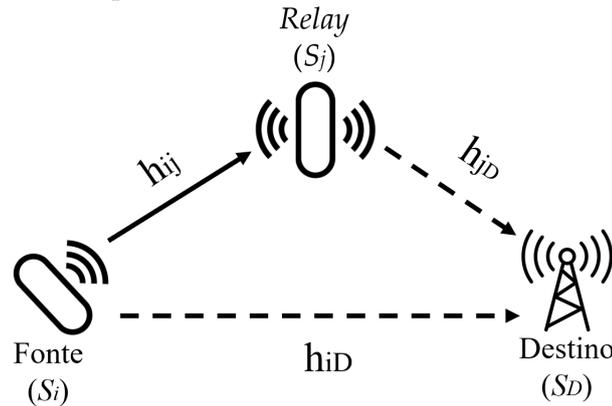
Dessa forma, o protocolo IDF possibilita que o *throughput* possa assumir os valores de R , se a transmissão da fonte for realizada com sucesso, $R/2$ se for necessária

a cooperação, ou nulo para os demais casos.¹ Assim, o *throughput* do nó S_i no modo cooperativo ($\mathcal{T}_i^{(\text{IDF})}$) é dado por (BRANTE et al., 2013)

$$\mathcal{T}_i^{(\text{IDF})} = R \left(1 - \mathcal{P}_{iD} \right) + \frac{R}{2} \cdot \mathcal{P}_{iD} \left(1 - \prod_{j \neq i} \mathcal{P}_{ij} \right) \left(1 - \mathcal{P}_{j^*D} \right). \quad (16)$$

O esquema de transmissão cooperativo é ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Transmissão cooperativa IDF.



Fonte: Autoria própria.

3.3 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, assume-se que existe um canal de retorno simétrico do destino para os demais nós ($h_{ij} = h_{ji}$), o qual permite fazer estimativas de canal entre cada nó S_i e S_D . Assim, é empregado o algoritmo proposto por (BRANTE et al., 2013), 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 (BRANTE et al., 2013), considera-se dois parâmetros de entrada para o cenário deste trabalho:

- SIR_{ij} , a qual permitirá escolher o *relay* menos sujeito a interferências;

¹ Assume-se que o destino utiliza a técnica de combinação seletiva (SC, do inglês *Selection Combining*), onde o destino seleciona apenas o sinal mais forte recebido. Uma maneira mais eficaz para fazer a seleção do sinal seria utilizar o método MRC (do inglês *Maximal Ratio Combining*), porém sua implantação implicaria em maiores modificações no *hardware* do receptor, o que não estaria diretamente pronto para se utilizar nas redes IEEE 802.15.4g.

- quantidade de energia residual de cada nó (E_j), o que permitirá distribuir o consumo de energia entre vários potenciais *relays*.

Dessa forma, é atribuído para cada nó da rede um grau de relevância $f(\text{SIR}_{ij}, E_j)$ para atuar como *relay*. Quanto maior for $f(\text{SIR}_{ij}, E_j)$, maior é a qualidade do *relay*.

A ideia principal é mapear SIR_{ij} e (E_j) nas funções membro *fuzzy* X_1 e X_2 respectivamente, usando a seguinte tabela linguística:

$$X_1 = \{\text{Ruim, Médio, Bom}\}, \quad (17)$$

$$X_2 = \{\text{Baixa, Média, Alta}\}. \quad (18)$$

A partir da lógica *fuzzy* é obtido o grau de relevância $f(\text{SIR}_{ij}, E_j)$ onde

$$Y = \{\text{Muito Baixo, Baixo, Médio, Alto, Muito Alto}\}. \quad (19)$$

Para mapear as variáveis linguísticas X_1 e X_2 em Y , e obter o grau de relevância do *relay*, é considerado um conjunto de regras *fuzzy* no formato “Se X_1 é A e X_2 é B , então Y é C ” denotado simbolicamente por “ $A \& B \rightarrow C$ ”

Regra 1: Ruim & Baixa \rightarrow Muito Baixo

Regra 2: Ruim & Média \rightarrow Baixo

Regra 3: Ruim & Alta \rightarrow Médio

Regra 4: Médio & Baixa \rightarrow Baixo

Regra 5: Médio & Média \rightarrow Médio

Regra 6: Médio & Alta \rightarrow Alto

Regra 7: Bom & Baixa \rightarrow Baixo

Regra 8: Bom & Média \rightarrow Alto

Regra 9: Bom & Alta \rightarrow Muito Alto

As regras para determinação do grau de relevância são apresentadas na Tabela 1, seguindo (BRANTE et al., 2013). Pode-se perceber que mesmo quando o nível de bateria está baixo, independente da SIR, o grau de relevância do *relay* é forçado para **Muito Baixo**

Tabela 1 – 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

Fonte: Adaptado de (BRANTE et al., 2013)

ou Baixo, buscando-se assim preservar esses *relays* para tentar aumentar a vida útil da rede.

Os elementos linguísticos podem ser descritos por uma função trapezoidal genérica da seguinte forma:

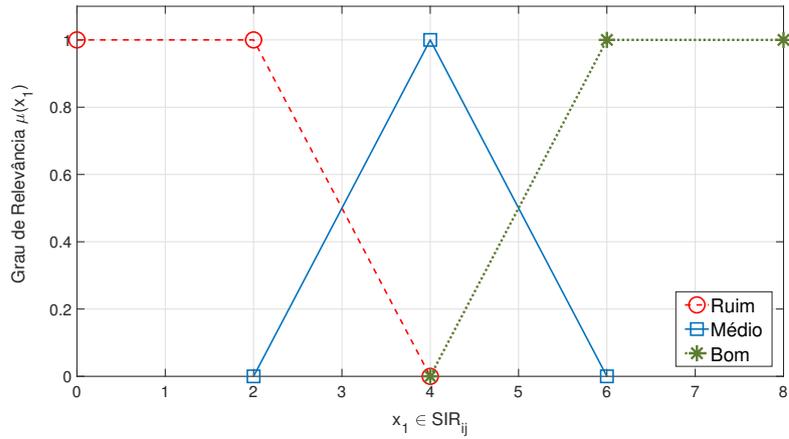
$$\text{trap}(z; a, m_1, m_2, b) = \begin{cases} \frac{z-a}{m_1-a}, & \text{if } z \in [a, m_1] \\ 1, & \text{if } x \in [m_1, m_2] \\ \frac{b-z}{b-m_2}, & \text{if } z \in [m_2, b] \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad (20)$$

onde $[a, b]$ representa o suporte e $[m_1, m_2]$ representa o núcleo do trapezoide, de forma que $a < m_1 \leq m_2 < b$. Quando $m_1 = m_2$, a função se torna uma função triangular. Nota-se que essa função trapezoidal sempre mapeia z no intervalo $[0, 1]$, o que denota o grau de relevância z , referido como $\mu(z)$. As funções membro do *fuzzy* são ilustradas na Figura 6.

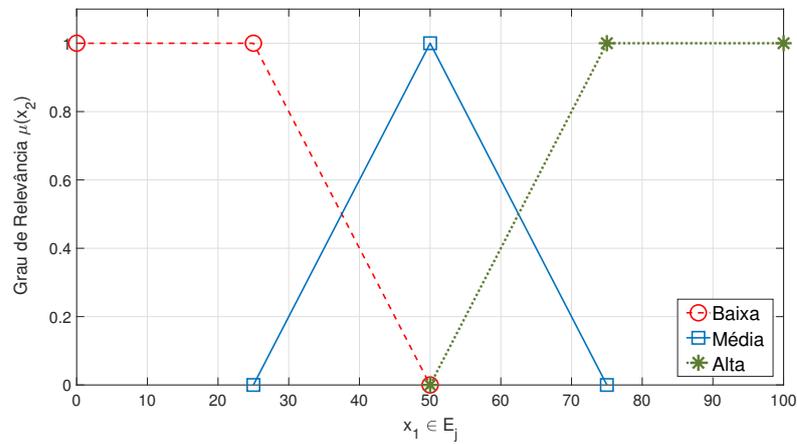
Fazendo um paralelo com a lógica booleana tradicional, considerando um elemento z , essa função é mapeada em apenas dois valores distintos: $\mu(z) = 0$ ou $\mu(z) = 1$, indicando se z pertence ou não ao conjunto booleano. Entretanto, na lógica *fuzzy* esse conceito é estendido, de forma que uma função *fuzzy* indica se z pertence ao conjunto e qual é o seu grau de relevância. Na função trapezoidal em (20) quando $m_1 \leq z \leq m_2$, pode-se afirmar que z com certeza pertence ao conjunto *fuzzy*, uma vez que $\mu(z) = 1$. Enquanto z se desvia de $[m_1, m_2]$, $\mu(z)$ diminui, indicando que z ainda pertence ao conjunto *fuzzy*, porém com um grau de relevância menor.

A relação sinal interferência tem seu valor impactado diretamente pela potência instantânea recebida P_{ij}^{inst} e pela interferência LoRaWAN (I_j). A função-membro para a SIR foi desenvolvida baseada na função de distribuição cumulativa (CDF, do inglês *Cumulative Distribution Function*). A CDF de SIR_{ij} é mostrada na Figura 7. Pode-se verificar que $\text{SIR}_{ij} = 2,2$ é o ponto médio da função de distribuição cumulativa. Assim, as funções linguísticas de X_1 são definidas como $\text{Ruim} = \text{trap}(x_1; 0, 0, 2, 4)$, $\text{Médio} =$

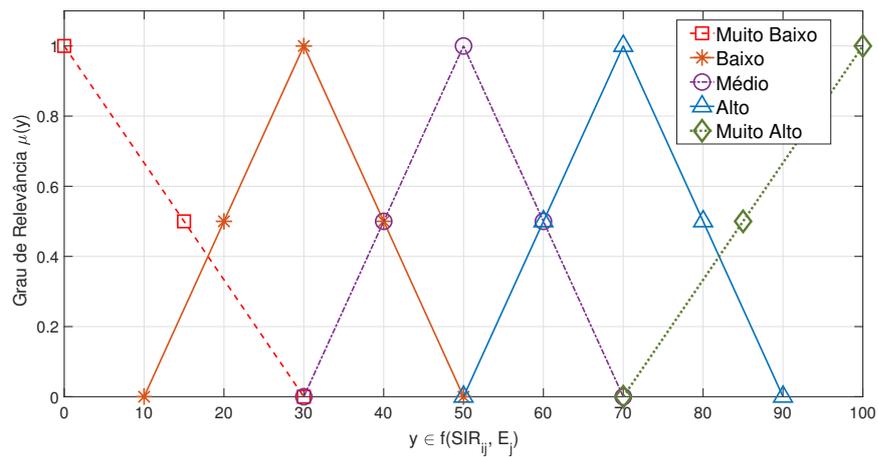
Figura 6 – Variáveis linguísticas fuzzy X_1 , X_2 , e Y .



(a) X_1 : relação sinal interferência SIR_{ij}



(b) X_2 : energia residual E_j



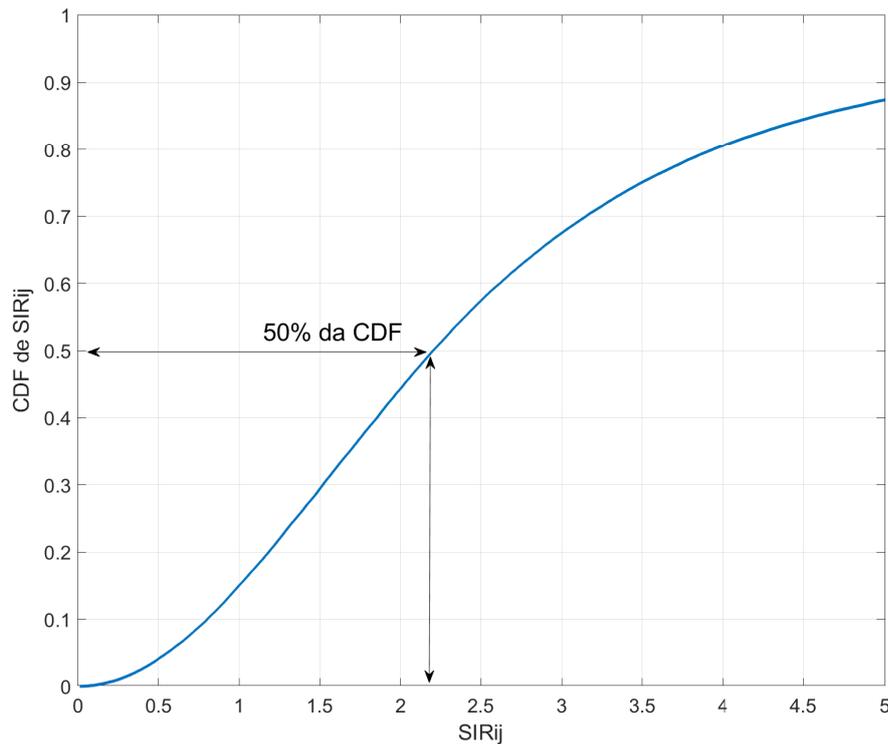
(c) Y : grau de relevância $f(\text{SIR}_{ij}, E_j)$

Fonte: adaptado de (BRANTE et al., 2013)

$\text{trap}(x_1; 2, 4, 4, 6)$, e $\text{Bom} = \text{trap}(x_1; 4, 6, 8, 8)$. A partir da Figura 7(a) pode-se observar que para $\text{SIR}_{ij} \leq 2$ a SIR é classificada como Ruim, para $\text{SIR}_{ij} \geq 6$ a SIR é classificada como

Bom, e para qualquer valor entre 2 e 6, é realizada uma combinação entre as classificações Baixa, Média e Alta, ponderadas conforme seus respectivos graus de relevância. Por exemplo, se $SIR_{ij} = 3,5$, essa variável é classificada como Ruim, com grau de relevância $\mu(x_1)=0,3$ e Média, com grau de relevância $\mu(x_1)=0,7$, sendo essas duas consideradas no processo *fuzzy*.

Figura 7 – Função de distribuição cumulativa da relação sinal interferência (SIR_{ij})



Fonte: Autoria própria

De maneira similar, a energia residual é expressada de acordo com o percentual de bateria restante e suas funções membro são ilustradas na Figura 7(b). Assume-se o ponto médio de 50% da carga da bateria, considerando que a relação entre o consumo da bateria e a potência de transmissão é linear. Logo, as expressões linguísticas de X_2 são definidas como Baixa = $\text{trap}(x_1; 0, 0, 25, 50)$, Média = $\text{trap}(x_2; 25, 50, 50, 75)$, e Alta = $\text{trap}(x_2; 50, 75, 100, 100)$. Portanto, para $E_j \leq 25$, a energia residual é classificada como baixa, para $E_j \geq 75$, a energia residual é classificada como alta e para qualquer valor entre 25 e 75, é realizada uma combinação entre as classificações Baixa, Média e Alta, ponderadas conforme seus respectivos graus de relevância.

O grau de relevância $f(SIR_{ij}, E_j)$ por sua vez é definido de 0 a 100, atribuído de acordo com as classificações para SIR_{ij} e E_j , com as expressões definidas como Muito Baixo = $\text{trap}(y; 0, 0, 0, 30)$, Baixo = $\text{trap}(y; 10, 30, 30, 50)$, Médio = $\text{trap}(y; 30, 50, 50, 70)$, Alto

= $\text{trap}(y; 50, 70, 70, 90)$, e Muito Alto = $\text{trap}(y; 70, 100, 100, 100)$, conforme mostrado na Figura 7(c).

Como exemplo, considera-se que $\text{SIR}_{ij} = 3,5$ e $E_j = 80$ para um determinado *relay* S_j . Pela Figura 7(a), a SIR é classificada como Ruim com $\mu(x_1) = 0,3$ e Médio com $\mu(x_1) = 0,7$, que são representados por:

$$X_1 = \{(\text{Ruim}, 0.3), (\text{Médio}, 0.7)\}, \quad (21)$$

e a energia residual, conforme a Figura 7(b), é classificada como Alta, com grau de relevância de 1,0, sendo representada por:

$$X_2 = \{(\text{Alta}, 1.0)\}. \quad (22)$$

O grau de relevância nesse exemplo é dado pela combinação dos dois pares Ruim-Alta e Médio-Alta, que de acordo com a Tabela 1 resulta em Médio e Alto respectivamente, e o grau de relevância de cada uma dessas combinações será dado pelo menor grau de relevância do par $\text{SIR}_{ij} - E_j$. Assim, nesse exemplo:

$$\begin{aligned} Y &= \{(\text{Ruim} - \text{Alta}, \min\{0,3; 1,0\}), (\text{Médio} - \text{Alta}, \min\{0,7; 1,0\})\} \\ &= \{(\text{Médio}; 0,3), (\text{Alto}; 0,7)\}. \end{aligned} \quad (23)$$

Por fim, o método do centro de gravidade (do inglês *Center of Gravity, CoG*) 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 $t_{j^*} = \min\{t_j\}$. A versão discreta do COG é definida como (PEDRYCZ; GOMIDE, 1998)

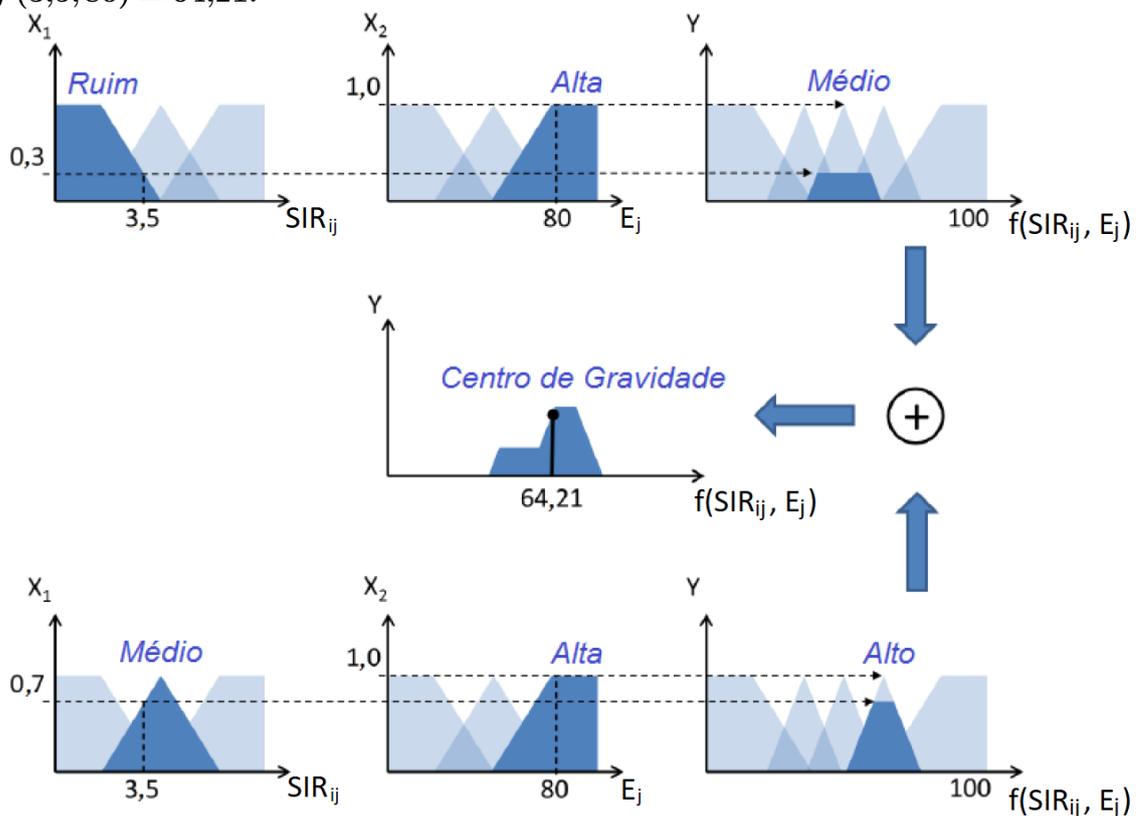
$$\text{CoG} = \frac{\sum [y \cdot \mu(y)]}{\sum \mu(y)}, \quad (24)$$

que nesse exemplo é $f(3,5; 80) = 64,21$.

A Figura 8 ilustra o processo *fuzzy*, onde a operação superior corresponde ao par *Ruim-Alta* e a inferior ao *Médio-Alta*. Depois, os termos de Y , $(\text{Médio}, 0,3)$ e $(\text{Bom}, 0,7)$, representados pelas áreas escuras nas partes superior e inferior respectivamente, são combinadas para formar a saída *fuzzy* ilustrada pelo centro da Figura 8.

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 (BLETSAS et al.,

Figura 8 – Exemplo da operação *fuzzy* para um *relay* com $SIR_{ij} = 3,5$ e $E_j = 80$. Nesse exemplo a relação sinal interferência é classificada como $x_1 = \{(\text{Ruim}; 0,3), (\text{Médio}; 0,7)\}$ e a energia residual classificada como $x_2 = \{(\text{Alta}; 1,0)\}$. O grau de relevância é dado pela combinação dos pares Ruim-Alta (representados no topo da figura) e Médio-Alta (representado na parte inferior da figura), resultando em $y = \{(\text{Médio}; 0,3), (\text{Alto}; 0,7)\}$. Então, os dois termos de y são combinados para formar a saída *fuzzy* no centro da figura. Finalmente o resultado numérico da operação é dado pelo centro da gravidade da área obtida em Y , que nesse exemplo é $f(3,5; 80) = 64,21$.



Fonte: Adaptado de (BRANTE et al., 2013)

2006) 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 (BRANTE et al., 2013).

4 RESULTADOS NUMÉRICOS

Neste capítulo os algoritmos são comparados considerando a mesma energia inicial para todos os nós, $E_i = 5 \text{ J}$, $\forall i$. O tamanho da mensagem transmitida é $T_m = 250$ bytes e demais parâmetros de simulação seguem (PERON et al., 2018), conforme demonstrado na Tabela 2¹.

Tabela 2 – Parâmetros da Simulação.

Parâmetros	Valores
Potência de Recepção	$P_{rx} = 99 \text{ mW}$
Potência de Transmissão	$P_{tx} = 25 \text{ mW}$
Frequência da portadora	$f_c = 915 \text{ MHz}$
Coefficiente de perda de percurso	$\alpha = 3,2$
Densidade espectral de potência do ruído	$N_0 = -174 \text{ dBm/Hz}$
Eficiência do dreno do amplificador de potência	$\eta = 0,35$
Taxa de Comunicação	$R = 50 \text{ kbps}$
Banda	$BW = 10 \text{ kHz}$
Ganho	$G = 5 \text{ dBi}$
Margem de enlace	$M_1 = 30 \text{ dB}$
Figura de ruído	$N_f = 4,4 \text{ dB}$

Fonte: Adaptado de (PERON et al., 2018)

Ainda, o valor da sensibilidade do receptor utilizado foi de $S_{rx} = -110 \text{ dBm}$, que corresponde ao valor especificado para o rádio CC1350 da *Texas Instruments* (TI, 2020).

4.1 ANÁLISE DOS PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO

O desempenho dos protocolos de comunicação foi avaliado conforme os valores do *throughput* e quantidade de informação transmitida ($\mathcal{I}_N^{(\text{modo})}$) obtidos em diferentes cenários. 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 $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$, quando não explicitado. Assim, para $\lambda_L = 5 \cdot 10^{-4}$, o processo de Poisson considera que 20 nós da rede LoRaWAN, em média, estão transmitindo simultaneamente. Em geral, os nós de uma rede LoRaWAN operam com um ciclo de trabalho na ordem de 1%², o que

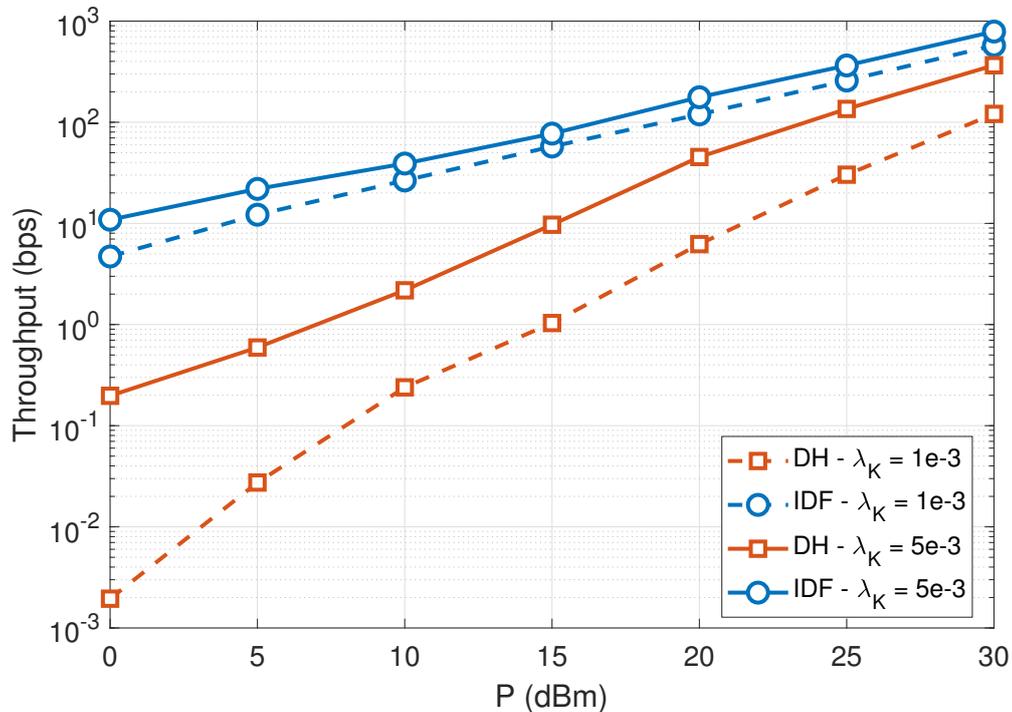
¹Nas simulações foi utilizado o valor de banda de 10 kHz, porém outros valores podem ser considerados sem variação qualitativa nos resultados obtidos, uma vez que o trabalho utilizado como base (ORFANIDIS et al., 2017) considera todas as bandas possíveis para o LoRa e Wi-SUN.

²Segundo a especificação da Anatel (ANATEL, 2017) o *duty cycle* pode ser de até 2%, porém para efeitos de simulação foi considerado o valor de 1%.

implica em até 2000 nós LoRa ocupando a mesma área que a rede IEEE 802.15.4g nesta análise. Além disso, considera-se que todos os nós da rede LoRaWAN transmitem com a mesma potência $P_{\text{LoRa}} = 14$ dBm (ORFANIDIS et al., 2017).

A Figura 9 mostra o *throughput* de cada modo de operação em função da potência de transmissão dos nós IEEE 802.15.4g, com densidade $\lambda_K \in \{1 \cdot 10^{-3}, 5 \cdot 10^{-3}\}$. Como pode-se observar, o modo cooperativo permite aumentar consideravelmente o *throughput* da rede em comparação com o modo DH tradicional. Por exemplo, com $P = 20$ dBm o *throughput* do IDF é 3,9 vezes maior que o do DH com $\lambda_K = 5 \cdot 10^{-3}$ e 19,2 vezes maior com $\lambda_K = 1 \cdot 10^{-3}$.

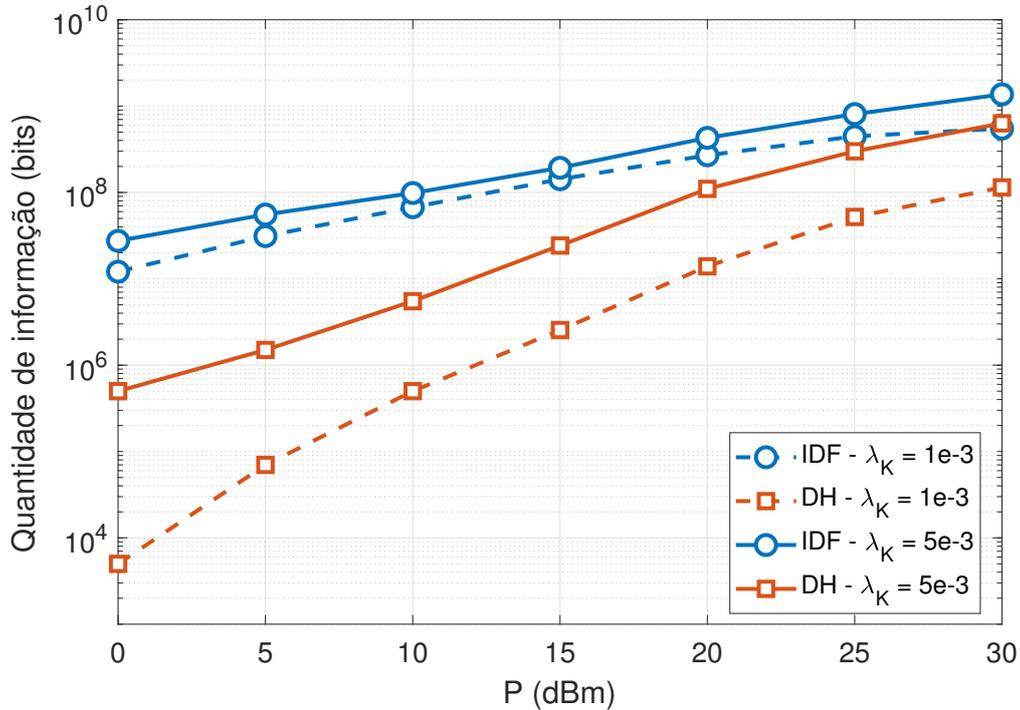
Figura 9 – *Throughput* em função da potência de transmissão dos nós IEEE 802.15.4g operando em DH e IDF, com $\lambda_L = 5 \cdot 10^{-4}$ e $\lambda_K \in \{1 \cdot 10^{-3}, 5 \cdot 10^{-3}\}$.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 10 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. A menor diferença se observa quando a potência é de 30 dBm e $\lambda_K = 6 \cdot 10^{-3}$, onde a comunicação cooperativa é 1,75 mais eficiente. Para $\lambda_K = 1 \cdot 10^{-3}$ o esquema cooperativo é 1,8 mais eficiente, quando a potência é de 35 dBm.

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

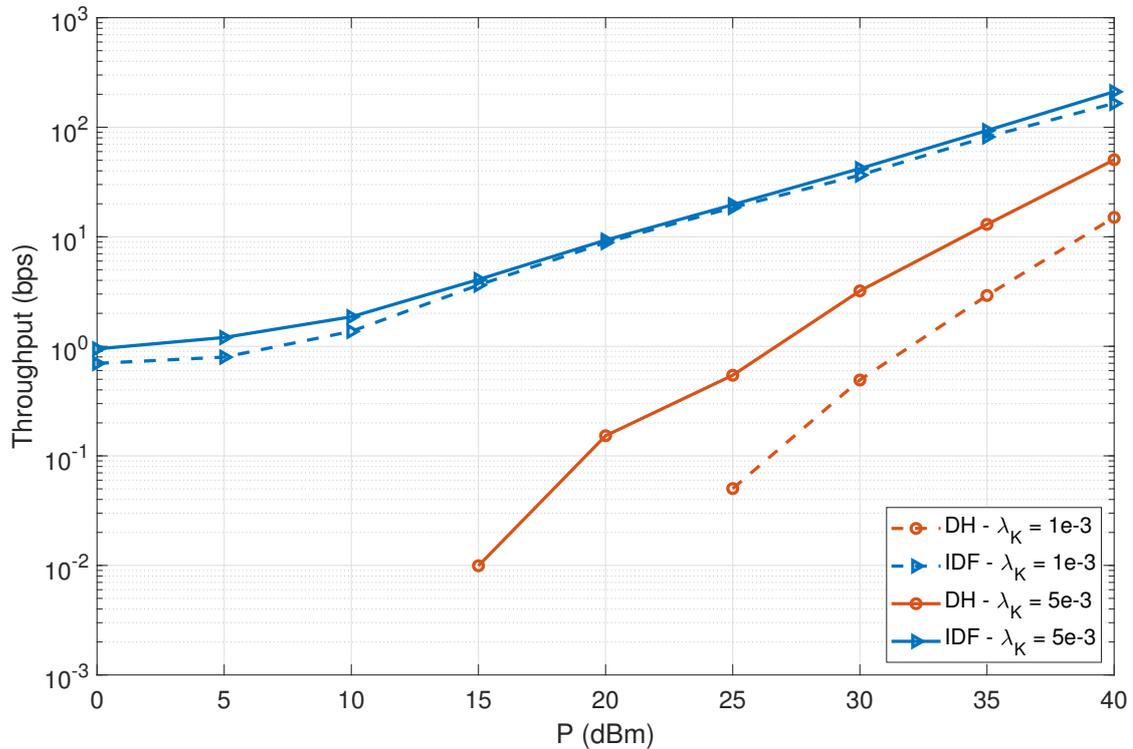


Fonte: Autoria própria.

Para avaliar os efeitos da interferência dos nós LoRa no *throughput* a densidade de nós foi aumentada de $\lambda_L = 5 \cdot 10^{-4}$ para $\lambda_L = 5 \cdot 10^{-3}$. A fim de comparação, os demais parâmetros não foram alterados. Pode-se observar na Figura 11 que, para o protocolo DH, é necessário aumentar a potência de transmissão para 15 dBm para conseguir encaminhar a mensagem. Novamente pode-se observar um desempenho melhor do protocolo IDF em relação ao DH, principalmente para os valores de potência mais baixas, onde a menor diferença entre eles identificada quando a potência é de 40 dBm com densidade $\lambda_K = 6 \cdot 10^{-3}$, sendo o IDF 4,1 vezes mais eficiente. Quando são comparados os valores obtidos com a Figura 9 percebe-se que o aumento da densidade dos nós LoRa gerou uma queda do *throughput* no protocolo IDF de 33 bps para 0,9 bps na potência mais baixa e de 20 Mbps para 211 bps para a potência mais alta, devido à maior interferência.

As análises mencionadas anteriormente consideram um ambiente urbano, com alto valor do coeficiente de perda de percurso ($\alpha = 3,2$). A Figura 12 mostra o desempenho dos protocolos em um ambiente menos urbano, com $\alpha = 2,5$. Pode-se observar que um coeficiente menor implica em uma maior interferência da rede LoraWAN, sendo que para conseguir transmitir utilizando o protocolo DH é necessário aumentar a potência para

Figura 11 – *Throughput* em função da potência de transmissão dos nós IEEE 802.15.4g operando em DH e IDF, com $\lambda_L = 5 \cdot 10^{-3}$ e $\lambda_K \in \{1 \cdot 10^{-3}, 5 \cdot 10^{-3}\}$.



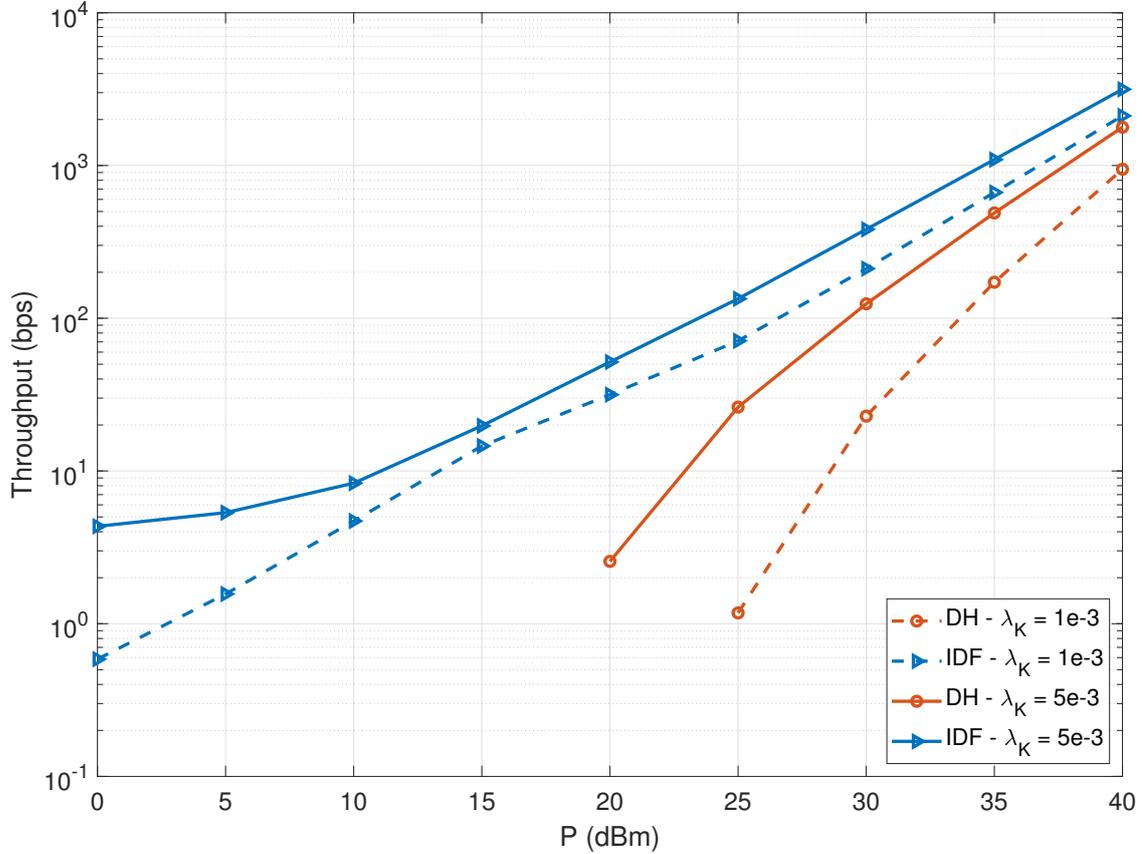
Fonte: Autoria própria.

pelo menos 20 dBm, diferente do que foi observado na Figura 9. Quando é comparado o desempenho do protocolo IDF, no meio menos urbano o *throughput* chega a cair 7,7 vezes para as potências mais baixas e 6,5 vezes para a potência mais alta quando comparado com o meio urbano.

Em uma outra análise, é avaliada a interferência gerada pela rede LoRaWAN variando o valor de potência de transmissão dos nós. Nesse cenário considera-se que o valor de potência dos nós IEEE 802.15.4g é fixo em $P = 20$ dBm, enquanto a potência dos dispositivos LoRa varia na faixa de $P_{LoRa} = 2$ dBm a $P_{LoRa} = 14$ dBm. Pode-se observar na Figura 13 que conforme é aumentada a potência do nó LoRa interferente, tem-se uma diminuição no *throughput*.

Para avaliar o desempenho da rede conforme o tamanho da sua área, foram realizadas simulações variando a região onde os sensores foram dispostos em áreas quadradas de lado igual a 150 m até 350 m. Nesse cenário a densidade dos nós IEEE 802.15.4g foi $\lambda_K = 1 \cdot 10^{-3}$ e a densidade de nós LoRa foi $\lambda_L = 5 \cdot 10^{-4}$. Quando não mencionado, os valores dos demais parâmetros seguem o que está especificado na Tabela 2. Pode-se observar na Figura 14 que a potência de transmissão está diretamente

Figura 12 – Análise do *throughput* em meio menos urbano, com $\alpha = 2,5$, $\lambda_L = 5 \cdot 10^{-4}$ e $\lambda_K \in \{1 \cdot 10^{-3}, 5 \cdot 10^{-3}\}$



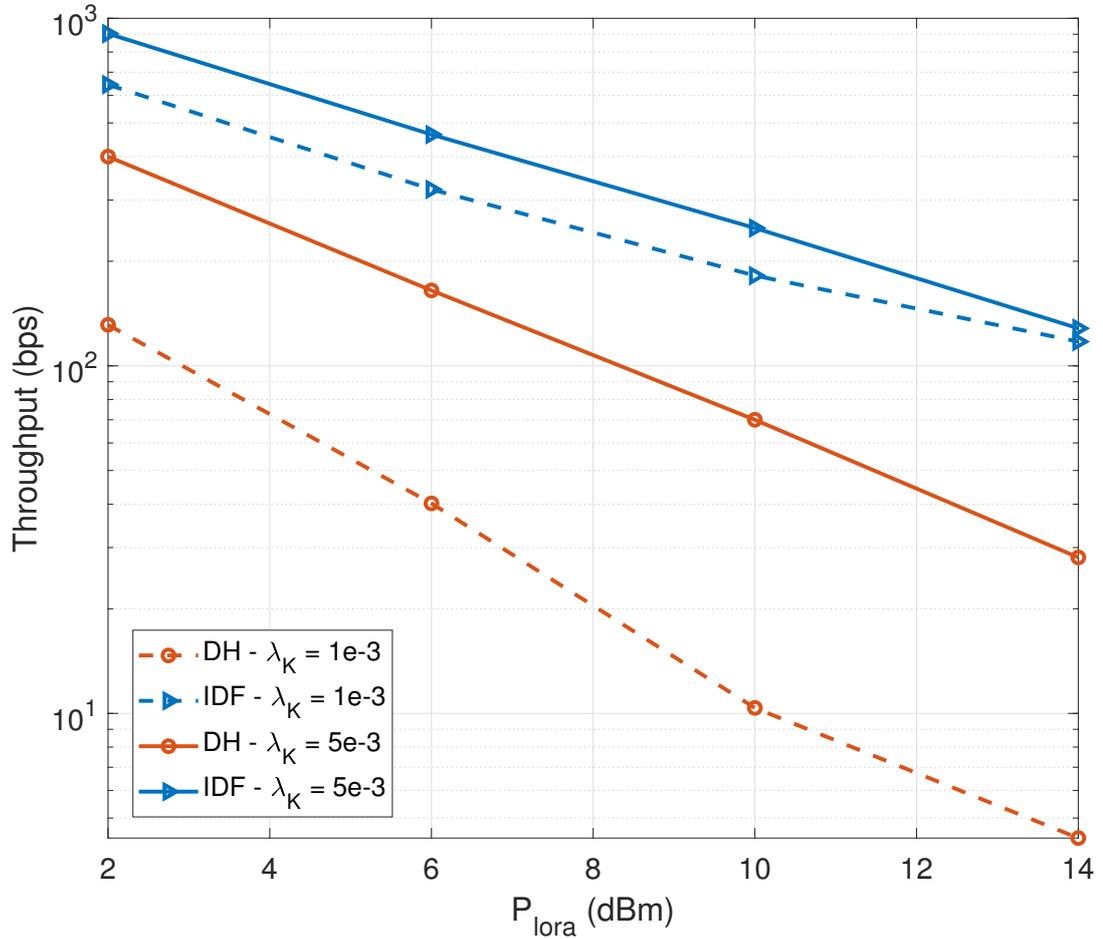
Fonte: Autoria própria.

relacionada com a área da rede, ou seja, o aumento da área exerce uma maior influência que a redução da concentração dos nós LoRa. Por exemplo, para se obter um *throughput* de 30 bps no protocolo IDF é necessário uma potência de 5 dBm quando o lado é igual a 150 m, 15 dBm para lado igual a 250 m e 20 dBm quando o lado é 350 m. No caso do DH, para se obter o mesmo *throughput* a potência precisaria ser aproximadamente 21,5 dBm, 27,5 dBm e 31 dBm para os lados de 150 m, 250 m e 350 m respectivamente.

4.2 QUANTIDADE DE INFORMAÇÃO TRANSMITIDA EM FUNÇÃO DA DENSIDADE DE NÓS

Como forma de comparação dos protocolos, foi considerado um limiar $\bar{\mathcal{I}}_N$ de quantidade de informação desejado e analisa-se 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 13 – *Throughput* em função da potência de transmissão LoRa, com $\lambda_L = 5 \cdot 10^{-4}$ e $\lambda_K \in \{1 \cdot 10^{-3}, 5 \cdot 10^{-3}\}$

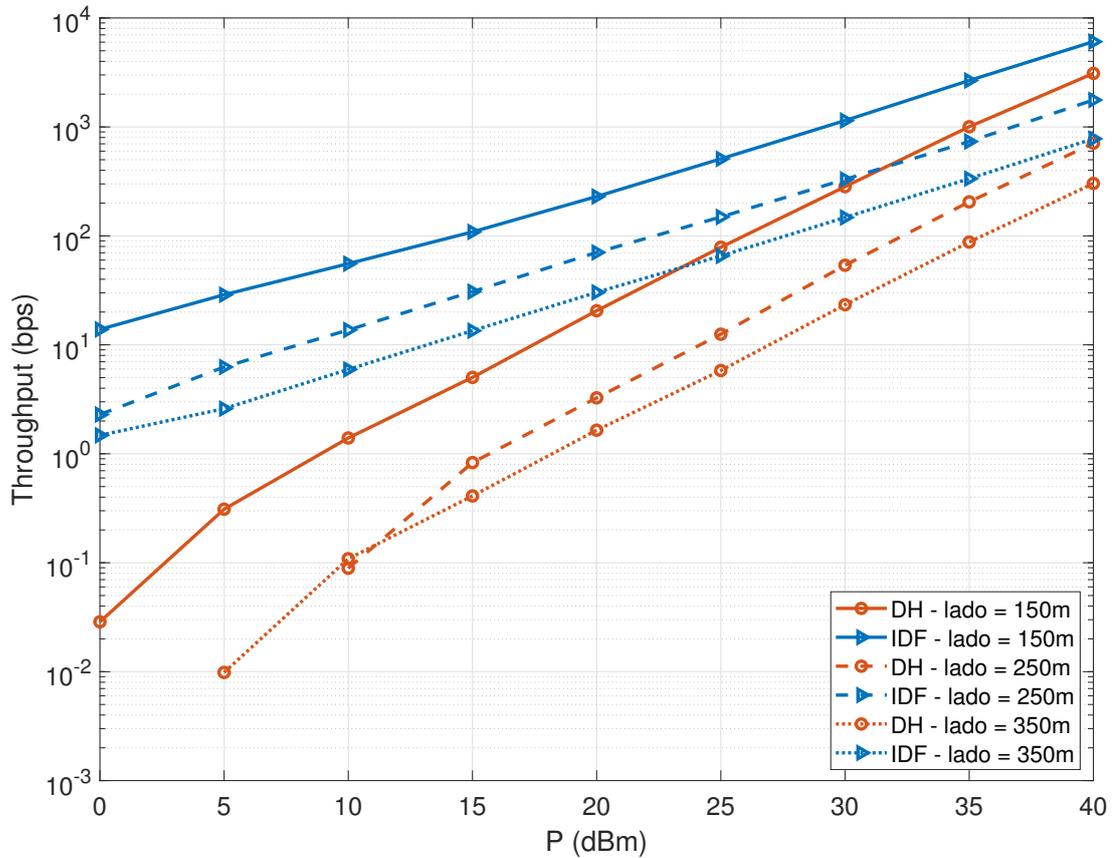


Fonte: Autoria própria.

Figura 15 ilustra $\mathcal{I}_N^{(\text{modo})}$ em função de λ_K na faixa de 10^{-3} nós/m², ao passo que a Figura 16 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. Pode-se observar a partir da Figura 15 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 $\bar{\mathcal{I}}_N$ com $\lambda_K \approx 2 \cdot 10^{-5}$ na Figura 16. Isto representa que a quantidade de nós IEEE 802.15.4g necessária para atingir o limiar $\bar{\mathcal{I}}_N$ estabelecido é pelo menos 150 vezes menor ao se considerar um protocolo cooperativo IDF, ao invés do modo de múltiplos saltos padrão desta tecnologia.

Por fim a Figura 17 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, com $P = 20$ dBm, a partir da qual é possível

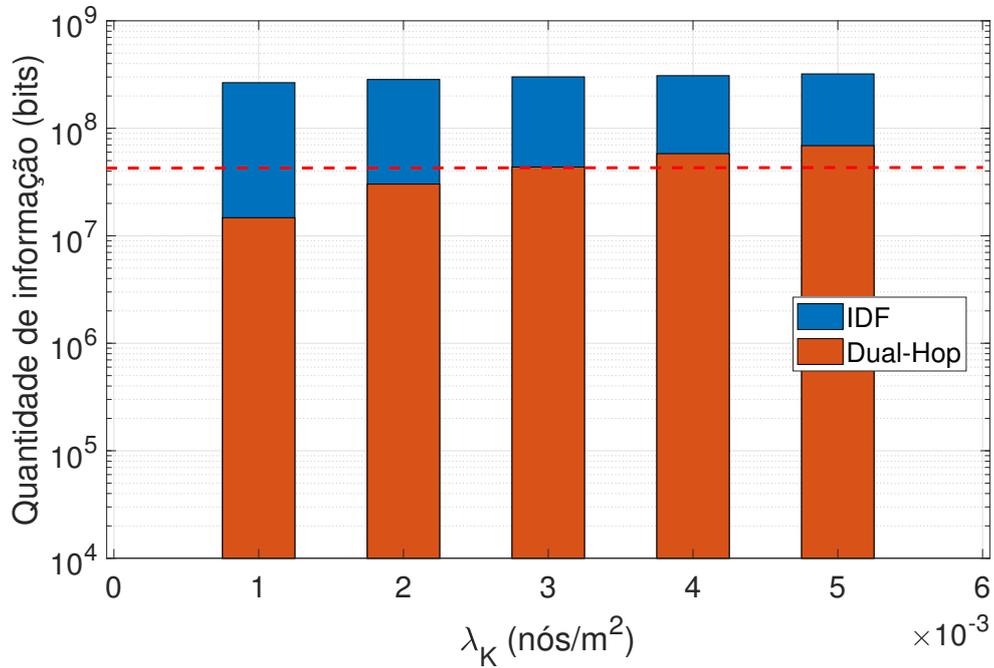
Figura 14 – *Throughput* em função da área da rede, com $\lambda_L = 5 \cdot 10^{-4}$ e $\lambda_K = 1 \cdot 10^{-3}$



Fonte: Autoria própria.

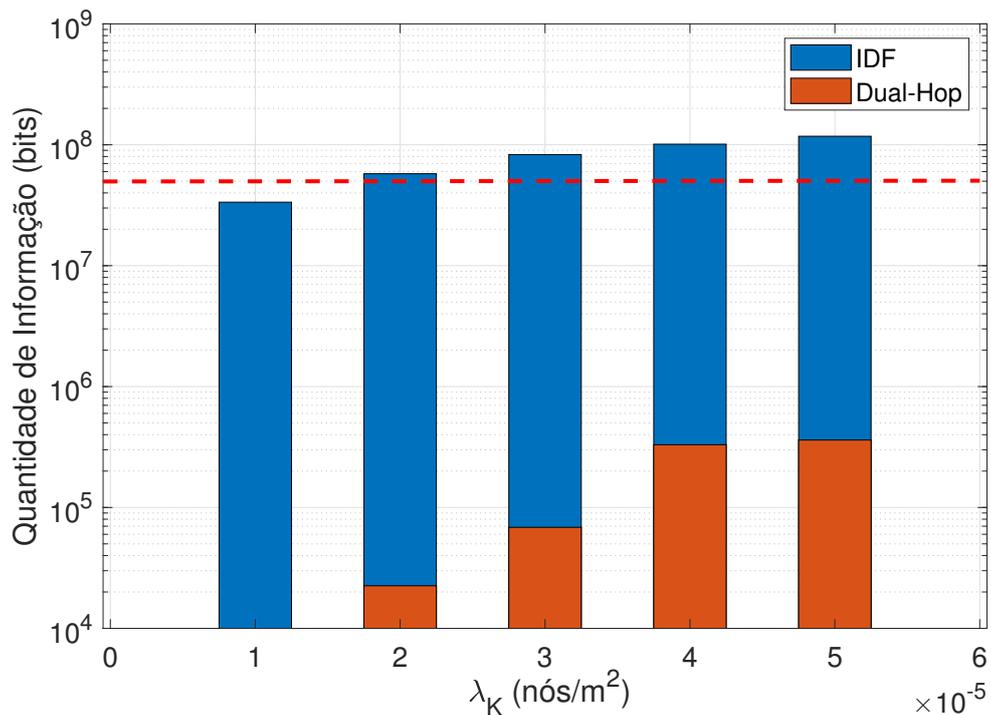
observar o impacto da interferência da rede LoRaWAN. Neste exemplo, o modo IDF é capaz de ultrapassar $\bar{\mathcal{I}}_N = 50$ Mbits em todos os casos, porém conforme a densidade de nós LoRa vai aumentando o desempenho deste protocolo piora, visto que o grau de interferência causado pela rede LoRaWAN é muito maior. Já no esquema DH, somente é possível transmitir o limiar estabelecido enquanto $\lambda_L \leq 2 \cdot 10^{-4}$.

Figura 15 – Quantidade de informação transmitida com densidade $\lambda_L = 5 \cdot 10^{-4}$ e $\lambda_K \in \{1 \cdot 10^{-3}, 5 \cdot 10^{-3}\}$



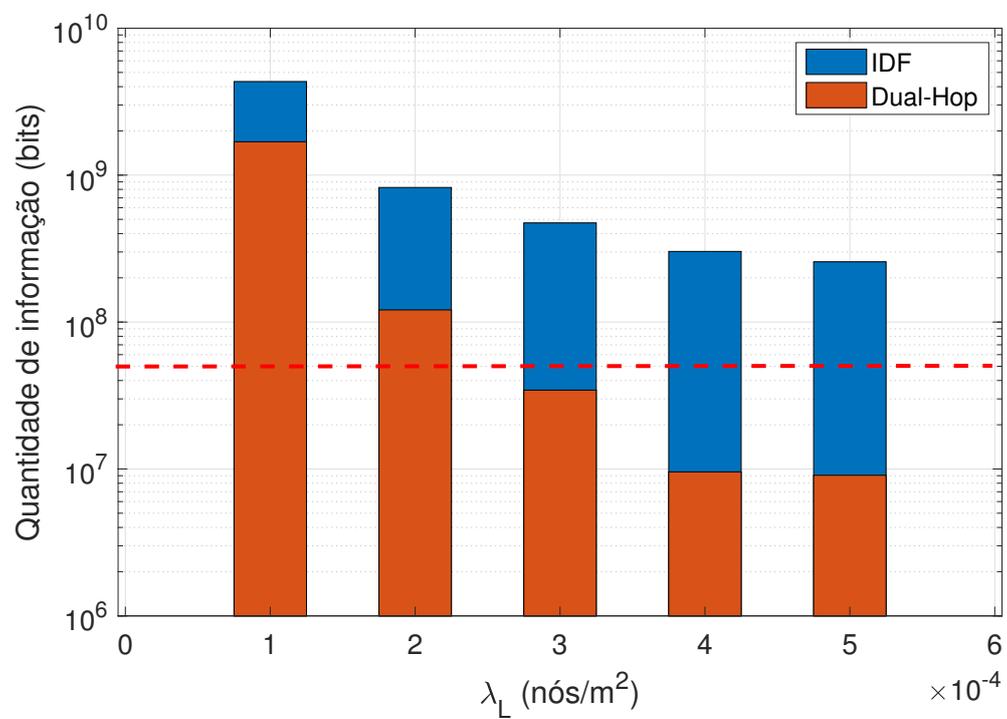
Fonte: Autoria própria.

Figura 16 – Quantidade de informação transmitida com densidade $\lambda_L = 5 \cdot 10^{-4}$ e $\lambda_K \in \{1 \cdot 10^{-5}, 5 \cdot 10^{-5}\}$



Fonte: Autoria própria.

Figura 17 – Quantidade de informação transmitida em função da densidade de nós da rede LoRaWAN, com $\lambda_K = 5 \cdot 10^{-4}$ e $P = 20$ dBm.



Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÃO

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. Buscou-se avaliar diferentes aspectos na configuração da rede, reproduzindo ambientes mais urbanizados e menos urbanizados. Também foi simulado o impacto do aumento da densidade de nós interferentes, com diferentes potências de transmissão e variações no tamanho da área a qual os sensores estavam dispostos. O protocolo IDF foi avaliado comparando seu desempenho com o protocolo *dual-hop*, utilizando como métricas o *throughput* e a quantidade de informação transmitida durante o tempo de vida da rede. Observou-se que o IDF consegue entregar um *throughput* até 19,2 vezes maior. Consequentemente, isso permite que seja possível transmitir uma maior quantidade de informação durante o tempo de vida útil da rede, podendo esse valor ser até 20 vezes maior quando comparado com o DH. Isso possibilita distribuir uma quantidade pelo 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*.

Como proposta para trabalhos futuros, esse estudo poderia ser estendido para analisar um cenário *multi-hop*, uma vez que o IEEE 802.15.4g opera nesse modo. Visando maximizar a quantidade de informação transmitida, poderia ser verificada a possibilidade de se otimizar o número de saltos e avaliar os protocolos de roteamento, além da análise de camada física feita por esse trabalho. Outra proposta seria avaliar os efeitos de sombreamento adicionado à interferência. Em ambientes menos urbanos, comum em muitos sistemas de telemetria de energia ou água, por exemplo, a topologia do ambiente pode ter um impacto significativo na comunicação, de modo que o sombreamento é capaz de capturar essas características, expandindo assim a análise feita aqui nessa dissertação. Também poderia ser considerado o uso de técnicas de retransmissão que não implicam em cooperação, como o HARQ (do inglês, *Hybrid Automatic Repeat reQuest*). Cabe ressaltar que técnicas de retransmissão são comuns em redes sem fio, de modo que a otimização da quantidade de retransmissões se torna então importante, tendo vista que um maior número de retransmissões aumenta a robustez (aumentando consequentemente o *throughput*), mas também aumenta o consumo de energia. Dessa forma, é necessário otimizar as técnicas de HARQ para o cenário em questão.

REFERÊNCIAS

- AISHWARYA, M.; KIRTHIGA, S. Relay assisted cooperative communication for wireless sensor networks. In: **2018 Second International Conference on Advances in Electronics, Computers and Communications (ICAEECC)**. 2018. p. 1–6.
- ANATEL. **Resolução nº680**. 2017. Disponível em: <https://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2017/936-resolucao-680>.
- BERA, A. **80 Insightful Internet of Things Statistics (Infographic)**. 2019. Disponível em: <https://safeatlast.co/blog/iot-statistics/>.
- BLETSAS, A.; KHISTI, A.; REED, D. P.; LIPPMAN, A. A simple Cooperative diversity method based on network path selection. **IEEE J. Sel. Areas Commun.**, v. 24, n. 3, p. 659–672, March 2006. ISSN 1558-0008.
- BRANTE, G.; PERON, G. de S.; SOUZA, R. D.; ABRÃO, T. Distributed Fuzzy Logic-Based Relay Selection Algorithm for Cooperative Wireless Sensor Networks. **IEEE Sensors J.**, v. 13, n. 11, p. 4375–4386, 2013. ISSN 1530-437X.
- CENTENARO, M.; VANGELISTA, L.; ZANELLA, A.; ZORZI, M. Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios. **IEEE Wireless Commun.**, v. 23, n. 5, p. 60–67, 2016.
- CUI, S.; GOLDSMITH, A. J.; BAHAI, A. Energy-efficiency of mimo and cooperative mimo techniques in sensor networks. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 22, n. 6, p. 1089–1098, 2004.
- DZIRI, A.; TERRE, M.; NASSER, N. Performance Analysis of Relay Selection for IoT Networks over Generalized K Distribution. In: **15th Int. Wireless Commun. Mobile Computing Conf. (IWCMC)**. 2019. p. 1411–1415.
- GOLDSMITH, A. **Wireless Communications**. Cambridge University Press, 2005.
- HOELLER, A.; SOUZA, R. D.; ALVES, H.; LÓPEZ, O. L. A.; MONTEJO-SÁNCHEZ, S.; PELLEZZI, M. E. Optimum LoRaWAN Configuration Under Wi-SUN Interference. **IEEE Access**, v. 7, p. 170936–170948, 2019.
- IEEE. **IEEE standard for information technology - telecommunications and information exchange between systems - local and metropolitan area networks specific requirements part 15.4: Wireless medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications for low-rate wireless personal area networks (lr-wpans)**. October 2003. 1-670 p.
- IEEE. **IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks**. April 2016. 1-709 p.

- LANEMAN, J. N.; TSE, D. N. C.; WORNELL, G. W. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior. **IEEE Trans. Inf. Theory**, v. 50, n. 12, p. 3062–3080, Dec 2004. ISSN 1557-9654.
- LIU, A. K. W. S. K. J. R.; KWASINSKI, A. **Cooperative Communications and Networking**. Cambridge University Press, 2009.
- MIKHAYLOV, K.; PETÄJÄJÄRVI, J.; JANHUNEN, J. On LoRaWAN scalability: Empirical evaluation of susceptibility to inter-network interference. In: **2017 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)**. 2017. p. 1–6.
- ORFANIDIS, C.; FEENEY, L. M.; JACOBSSON, M.; GUNNINGBERG, P. Investigating interference between LoRa and IEEE 802.15.4g networks. In: **IEEE 13th Int. Conf. on Wireless and Mobile Computing, Netw. and Commun. (WiMob)**. 2017. p. 1–8.
- PEDRYCZ, W.; GOMIDE, F. **An Introduction to Fuzzy Sets: Analysis and Design**. 1998.
- PERON, G. **Método Distribuído Multiobjetivo de Seleção de Relays em Redes Cooperativas Sem Fio Utilizando Lógica Fuzzy**. 2012. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012.
- PERON, G.; BRANTE, G.; SOUZA, R. D.; PELLEZZI, M. E. Physical and mac cross-layer analysis of energy-efficient cooperative mimo networks. **IEEE Trans. Commun.**, v. 66, n. 5, p. 1940–1954, 2018.
- RAUH, S.; ROBERT, J.; SCHADHAUSER, M.; HEUBERGER, A. LPWAN occupancy model parameter identification for license exempt sub-GHz frequency bands. In: **2018 11th German Microwave Conference (GeMiC)**. 2018. p. 111–114.
- SAH, N.; SANDHU, N. Analysis of effect of distance of relay node in cooperative communication. In: **2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)**. 2017. p. 2647–2649.
- TI, T. I. **SimpleLink™ 32-bit Arm Cortex-M3 multiprotocol Sub 1 GHz & 2.4 GHz wireless MCU with 128kB Flash**. 2020.
- ZHANG, L.; LIANG, Y.; XIAO, M. Spectrum Sharing for Internet of Things: A Survey. **IEEE Wireless Commun.**, v. 26, n. 3, p. 132–139, 2019.