

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL**

LUIS HENRIQUE DE OLIVEIRA ALVES

**COMUNICAÇÃO LORA COOPERATIVA COM CODIFICAÇÃO
DE REDE**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2021

LUIS HENRIQUE DE OLIVEIRA ALVES

**COMUNICAÇÃO LORA COOPERATIVA COM CODIFICAÇÃO
DE REDE**

Network-Coded Cooperative LoRa Communication

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CPGEI) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) como requisito parcial para obtenção do título de “Mestre em Ciências”. Área de Concentração: Telecomunicações e Redes.

Orientador: Prof. Dr. João Luiz Rebelatto
Coorientador: Prof. Dr. Glauber Gomes de Oliveira Brante

CURITIBA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es).

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba



LUIS HENRIQUE DE OLIVEIRA ALVES

COMUNICAÇÃO LORA COOPERATIVA COM CODIFICAÇÃO DE REDE

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Ciências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Área de concentração: Telecomunicações E Redes.

Data de aprovação: 17 de Agosto de 2021

Prof Joao Luiz Rebelatto, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Mario De Noronha Neto, Doutorado - Instituto Federal Santa Catarina - Ifsc

Prof Richard Demo Souza, Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina (Ufsc)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 17/08/2021.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho marca mais uma etapa em minha jornada. A cada passo meu, enxergo mais e mais a importância daqueles que me dão apoio. Percebo que, não fosse a paciência e a dedicação destas pessoas, eu jamais teria alcançado qualquer vitória de que hoje me orgulho. Portanto, não tenho nada além de absoluta gratidão a todos os que contribuíram das mais variadas formas durante este importante período. Estendo, ainda, imensa gratidão a Deus por jamais se esquecer de mim.

À minha família, que com seu carinho e amparo incondicionais tem me dado o mais sólido fundamento para a vida. Devo-lhes tudo.

Aos meus orientadores, Prof. João L. Rebelatto e Prof. Glauber G. O. Brante, cujos conselhos e ensinamentos me tornaram na mais capacitada versão de mim, e que me deram as ferramentas para alcançar meus objetivos.

Ao meus co-autores, que experimentaram meus inúmeros e-mails e ainda, com tranquilidade, me ajudaram a produzir conhecimento científico relevante à nossa área.

Enfim, ao meu país, que me ofereceu o suporte financeiro para efetivar meus projetos de pesquisa através do apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

ALVES, Luis Henrique de Oliveira. **Comunicação LoRa Cooperativa com Codificação de Rede**. 2021. 59 f. Dissertação – Mestrado em Ciências pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CPGEI) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

Com a adoção generalizada de dispositivos de Internet das Coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*), torna-se necessário o desenvolvimento de novas abordagens para ajudar a reduzir os efeitos de colisões no desempenho de redes baseadas na modulação LoRa, e, mais especificamente, em LoRaWAN. Tendo esse objetivo em vista, neste trabalho investiga-se o desempenho de um esquema fundamentado no conceito de cooperação e codificação de rede (NCC, do inglês *Network Coded Cooperation*) que se denomina NCC-LoRa. Nele, dispositivos trocam mensagens entre si em uma etapa dispositivo a dispositivo (D2D, do inglês *Device to Device*) por meio da modulação chaveamento de mudança de frequência (FSK, do inglês *Frequency-Shift Keying*) à alta taxa de transmissão de bits. Os dispositivos podem, então, auxiliar-se mutuamente para melhorar a confiabilidade da comunicação com a ponte de ligação (GW, do inglês *GateWay*) comum através da combinação linear em um campo finito das mensagens de cada parceiro de cooperação. Modela-se a probabilidade de sucesso na comunicação D2D a partir de duas componentes: a probabilidade de efetiva transmissão de dados, que computa falhas advindas da troca de dados, e a probabilidade de vizinhança, que depende de fatores associados à topologia da rede. Verifica-se, então, o desempenho da rede com o protocolo NCC-LoRa sob as métricas de alcance da rede e consumo médio de corrente elétrica por ciclo de transmissão. O resultados apontam que o esquema proposto pode fornecer ganhos consideráveis nesses quesitos quando comparado com uma típica transmissão LoRa e com um esquema baseado em retransmissão de pacotes.

Palavras-chave: Codificação de rede. Comunicação cooperativa. LoRa. LoRaWAN.

ABSTRACT

ALVES, Luis Henrique de Oliveira. **Network-Coded Cooperative LoRa Communication**. 2021. 59 p. Dissertation – Master’s Degree in Science by the Graduate Program in Electrical and Computer Engineering (CPGEI) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

With the widespread adoption of Internet-of-Things (IoT) devices, new approaches to help counteract the effects of collisions in networks based on the LoRa modulation, and more specifically on LoRaWAN, are needed. With this objective in mind, this work investigates the performance of a scheme based on the concept of network coded cooperation (NCC) called NCC-LoRa. In it, devices exchange messages with each other in a Device to Device (D2D) fashion through Frequency Shift Keying (FSK) modulation under a high bit rate. The devices can then provide mutual assistance and improve communication reliability with the common Gateway (GW) by performing linear combinations over a finite field of the messages from each cooperating partner. The probability of success in the D2D communication is modeled from two components: the probability of effective data transmission, which computes failures arising from data exchange, and the neighborhood probability, which depends on factors associated with the network topology. Then, the performance of the network with NCC-LoRa is verified on the metrics of network range and average consumption of electric current per transmission cycle. The attained results show that the proposed scheme can provide considerable gains in these terms when compared to a typical LoRa transmission and to a scheme based on packet retransmission.

Keywords: Network coding. Cooperative communication. LoRa. LoRaWAN.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Variação do Tempo no Ar (ToA) em função do Fator de Espalhamento (SF) para 9 bytes de <i>payload</i> , 8 símbolos de preâmbulo, CR = 1, com modo CRC ativado e modo de cabeçalho implícito desativado.	23
Figura 2 –	Exemplo de 5 EDs transmitindo informação a um GW comum conforme a topologia estrela.	23
Figura 3 –	Realização do modelo do sistema com distribuição aleatória de EDs segundo um PPP e com a distância de cooperação, de conceito explorado na seção 4.1, demarcada em vermelho.	24
Figura 4 –	Diagrama de blocos representando a modelagem dos efeitos do canal e interferência co-SF.	26
Figura 5 –	Etapas de (a) Difusão e (b) Cooperação para efetivação de um protocolo convencional de comunicação com NCC.	30
Figura 6 –	Protocolo do esquema NCC-LoRa com a execução das etapas de (a) D2D, (b) Difusão e (c) Cooperação.	34
Figura 7 –	Exemplos da área de cooperação, definida pela intersecção de duas regiões, nos cenários de largura de SF (a) “maior que” e (b) “menor ou igual” a distância de cooperação.	36
Figura 8 –	Resultado da probabilidade de <i>outage</i> para $\rho = 10^{-4}$ EDs/m ² e $\mathcal{O}_{\text{alvo}} = 10^{-2}$	46
Figura 9 –	Probabilidades de captura e conexão para $\rho = 10^{-4}$ EDs/m ² e $\mathcal{O}_{\text{alvo}} = 10^{-2}$	47
Figura 10 –	Resultado da probabilidade de cooperação para $\rho = 10^{-4}$ EDs/m ² e $\mathcal{O}_{\text{alvo}} = 10^{-2}$	47
Figura 11 –	Resultado da probabilidade de cooperação para $\rho = 10^{-4}$ EDs/m ² e $\mathcal{O}_{\text{alvo}} = 10^{-3}$	48
Figura 12 –	Resultado da probabilidade de <i>outage</i> para $\rho = 10^{-3}$ EDs/m ² e $\mathcal{O}_{\text{alvo}} = 10^{-2}$	48
Figura 13 –	Resultado da probabilidade de <i>outage</i> para $\rho = 10^{-3}$ EDs/m ² e $\mathcal{O}_{\text{alvo}} = 10^{-3}$	49
Figura 14 –	Resultado do consumo médio de corrente elétrica para $\rho = 10^{-4}$ EDs/m ² e $\mathcal{O}_{\text{alvo}} = 10^{-2}$	50
Figura 15 –	Resultado do consumo médio de corrente elétrica para $\rho = 10^{-3}$ EDs/m ² e $\mathcal{O}_{\text{alvo}} = 10^{-3}$	50
Figura 16 –	Variação da probabilidade de cooperação em função da densidade da rede ρ para $\mathcal{O}_{\text{alvo}} = 10^{-2}$ e $P_{\text{TX}} = 11$ dBm.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Características de LoRa para banda de 125 kHz, CR = 1, 9 bytes de <i>payload</i> , 8 símbolos de preâmbulo, modo CRC ativado e de cabeçalho implícito desativado.	22
Tabela 2	– Exemplo de operações de (a) Soma e (b) Multiplicação em um campo finito GF(4).	30
Tabela 3	– Estados de operação do SX1272 da Semtech Corporation e seus consumos energéticos.	40
Tabela 4	– Consumo da modulação FSK no <i>transceiver</i> SX1272 da Semtech Corporation para uma potência de transmissão de 13 dBm, pacote de tamanho 120 bits, taxa de transmissão de 250 kbps, com uma largura banda de 250 kHz e um período de <i>ramp up</i> de transmissão de 10 μ s.	42
Tabela 5	– Parâmetros de simulação do sistema.	45
Tabela 6	– Aproximação dos resultados de alcance de rede para $\mathcal{O}_{\text{alvo}} = 10^{-2}$.	45
Tabela 7	– Aproximação dos resultados de alcance de rede para $\mathcal{O}_{\text{alvo}} = 10^{-3}$.	45

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

SIGLAS

AWGN	Ruído Gaussiano Branco Aditivo, do inglês <i>Additive White Gaussian Noise</i>
BER	Taxa de Erro de Bits, do inglês <i>Bit Error Rate</i>
BFSK	do inglês, <i>Binary Frequency-Shift Keying</i>
BLE NDP	do inglês <i>Bluetooth Low Energy Neighbor Discovery Protocol</i>
BP	Etapa de Difusão, do inglês <i>Broadcast Phase</i>
CDF	Função Distribuição Acumulada, do inglês <i>Cumulative Distribution Function</i>
CP	Etapa de Cooperação, do inglês <i>Cooperation Phase</i>
CR	Taxa de Codificação, do inglês <i>Coding Rate</i>
CRC	Verificação de Redundância Cíclica, do inglês <i>Cyclic Redundancy Check</i>
CSS	do inglês <i>Chirp Spread Spectrum</i>
D2D	Dispositivo à Dispositivo, do inglês <i>Device to Device</i>
DC	Ciclo de Trabalho, do inglês <i>Duty Cycle</i>
ED	Dispositivo Final, do inglês <i>End-Device</i>
ED-GW	Laço de comunicação entre ED e GW
FSK	Chaveamento de Mudança de Frequência, do inglês <i>Frequency-Shift Keying</i>
GDNC	Codificação de rede dinâmica generalizada, do inglês <i>Generalized Dynamic Network Coding</i>
GW	do inglês, <i>GateWay</i>
IoT	Internet das Coisas, do inglês <i>Internet of Things</i>
IP	Protocolo da Internet, do inglês <i>Internet Protocol</i>
LPWAN	Rede de Área Ampla de Baixa Potência, do inglês <i>Low-Power Wide-Area Network</i>
M2M	Máquina a Máquina, do inglês <i>Machine to Machine</i>
MDS	Separável por Distância Máxima, do inglês <i>Maximum-Distance Separable</i>
MRC	Combinação por razão máxima, do inglês <i>Maximal Ratio Combining</i>
NCC	Cooperação com Codificação de Rede, do inglês <i>Network-Coded Cooperation</i>
NCC-LoRa	LoRa com cooperação e codificação de rede
NF	Figura de Ruído, do inglês <i>Noise Figure</i>
NS	Servidor da Rede, do inglês <i>Network Server</i>
PPP	Processo de Ponto de Poisson
RSSI	Indicador da Intensidade do Sinal Recebido, do inglês <i>Receiver Signal Strength Indicator</i>
RT-LoRa	LoRa com retransmissões
SC	do inglês <i>Selection Combining</i>

SF	Fator de Espalhamento, do inglês <i>Spreading Factor</i>
SIR	Relação Sinal-Interferência, do inglês <i>Signal-to-Interference Ratio</i>
SNR	Relação Sinal-Ruído, do inglês <i>Signal-to-Noise Ratio</i>
ToA	Tempo no Ar, do inglês <i>Time-on-Air</i>

ACRÔNIMOS

LoRa	do inglês, <i>Long Range</i>
LoRaWAN	do inglês, <i>LoRa Wide-Area Network</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

\bar{N}	Número médio de dispositivos ativos na rede
$\overline{P_{RX}}$	Potência média de recepção
δ	Relação ruído-interferência mínima de recepção LoRa
η	Coefficiente de perda de percurso
\mathbf{r}	Conjunto de sinais recebidos pelo GW
\mathcal{H}_1	Probabilidade de conexão
\mathcal{N}	Variância do ruído aditivo gaussiano branco (AWGN)
\mathcal{O}_1	Probabilidade de <i>outage</i> de uma transmissão LoRa
\mathcal{O}_{D2D}	Probabilidade de <i>outage</i> na comunicação entre dispositivos (D2D)
$\mathcal{O}_{RT-LoRa}$	Probabilidade de <i>outage</i> do esquema RT-LoRa
\mathcal{O}_{alvo}	Probabilidade de <i>outage</i> alvo da rede
$\mathcal{P}_{efetiva}^{D2D}$	Probabilidade de efetiva comunicação entre dispositivos (D2D)
$\mathcal{P}_{vizin}^{D2D}$	Probabilidade de vizinhança
\mathcal{Q}_1	Probabilidade de captura
\mathcal{R}	Raio máximo da rede
\mathcal{S}_F	Fator de espalhamento
\mathcal{V}	Região circular no plano real
$\mathcal{X}_{a,b}^{\mathcal{S}_F}$	Função indicativa de colisão entre dispositivos de índices a e b em um dado SF
\mathcal{S}_{D2D}	Sensibilidade do receptor na comunicação D2D
\mathcal{S}	Sensibilidade do receptor
T_{slot}	Duração de um ciclo de transmissão
T_{TX}	Período de transmissão
μ_{co-SF}	Interferência entre EDs de mesmo SF
Ψ	Relação sinal-ruído mínima de recepção LoRa
ρ	Densidade da rede
$GF(q)$	Campo finito de ordem q
PL	Tamanho do <i>payload</i> em bytes
$\xi(\mathcal{S}_F)$	Alcance da região, ou largura do Fator de Espalhamento (SF)
A_1^{Coop}	Área de cooperação
$A_{1,aprox}^{Coop}$	Aproximação da área de cooperação
B	Largura de banda de transmissão
B_{D2D}	Largura de banda de transmissão na etapa D2D
c	Constante física da velocidade da luz
d_1^{Coop}	Distância de cooperação
d_n	Distância euclidiana do ED genérico de índice n até a GW
f_c	Frequência de portadora

$g(\cdot)$	Função de perda de percurso
h_n	Coefficiente de desvanecimento do ED de índice n
I_i	Corrente consumida enquanto o estado de operação de índice i do <i>transceiver</i> está sendo utilizado
l_{SF}	Límite superior de um SF, distância medida a partir do GW
M	Número de transmissões dentro de um mesmo ciclo de transmissão
N	Número de EDs ativos na rede
n_{pay}	Número de símbolos no <i>payload</i>
n_{pre}	Número de símbolos no preâmbulo
N_b	Número de bits em uma mensagem
$P_{\text{TX}}^{\text{D2D}}$	Potência média de recepção da etapa D2D
P_{TX}	Potência de transmissão
p_n	Pacote de paridade do dispositivo de índice n
r	Sinal recebido pelo GW
R_{D2D}	Taxa de transmissão de bits na etapa D2D
R_{NCC}	Taxa de código de rede
R_b	Taxa de transmissão de bits
s_n	Sinal transmitido pelo ED n
T_i	Duração do estado de operação de índice i do <i>transceiver</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	CONTRIBUIÇÕES	15
1.2	MOTIVAÇÃO	16
1.3	OBJETIVOS	16
1.3.1	Objetivo Geral	16
1.3.2	Objetivos Específicos	16
1.4	PUBLICAÇÕES	17
1.5	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	17
2	REVISÃO DA LITERATURA	18
3	PRELIMINARES	21
3.1	NOTAÇÃO	21
3.2	MODULAÇÃO LONG RANGE (LORA)	21
3.3	MODELO DO SISTEMA	23
3.3.1	Modelos de Perda de Percurso e Desvanecimento	25
3.3.2	Procedimento de Alocação de SF	26
3.4	PROBABILIDADE DE <i>OUTAGE</i> DE <i>UPLINK</i>	27
3.5	LORA COM RETRANSMISSÕES (RT-LORA)	28
3.6	COMUNICAÇÃO COOPERATIVA	29
3.6.1	Cooperação com Codificação de Rede (NCC)	29
3.7	COMENTÁRIOS	32
4	O ESQUEMA NCC-LORA	33
4.1	COMUNICAÇÃO ENTRE DISPOSITIVOS (D2D)	33
4.1.1	Probabilidade de Cooperação	34
4.1.1.1	Probabilidade de <i>outage</i> no enlace D2D	35
4.1.1.2	Probabilidade de vizinhança	35
4.2	COMUNICAÇÃO COM O <i>GATEWAY</i>	37
4.3	MODELO DE CONSUMO ENERGÉTICO	39
4.3.1	Esquemas LoRa Convencional e RT-LoRa	41
4.3.2	Esquema NCC-LoRa	41
4.4	COMENTÁRIOS	42
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1	CONSIDERAÇÕES DE SIMULAÇÃO	44
5.2	ALCANCE DA REDE	45
5.3	DESEMPENHO ENERGÉTICO	49
5.4	COMENTÁRIOS	51
6	COMENTÁRIOS FINAIS	54
6.1	TRABALHOS FUTUROS	55
	REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por maiores níveis de automação de processos criaram um ambiente propício ao surgimento da Internet das Coisas, do inglês *Internet of Things* (IoT). Conforme comentado por Nord *et al.* (2019), a atual abrangência implícita ao conceito de IoT é de tal grandeza que não há um consenso estabelecido na literatura sobre a categorização de suas possíveis aplicações. Entretanto, em uma concepção generalizada, IoT pode ser compreendida como uma rede de dispositivos que interagem e cooperam entre si para alcançar um objetivo comum: providenciar uma melhor qualidade e experiência de serviço (NAUMAN *et al.*, 2020). Espera-se que a proliferação de IoT gere um impacto significativo tanto na sociedade quanto na economia. Entretanto, no contexto de comunicações sem fio, implementar a visão de IoT é um grande desafio. Não apenas requiere-se prover serviço ubíquo para variados tipos de dispositivos com grande heterogeneidade de demandas, mas há também a previsão de que a adoção da IoT em larga-escala aumente a densidade experimentada nas redes (ATZORI *et al.*, 2010; RAZA *et al.*, 2017).

Percebe-se crescente interesse no emprego de Rede de Área Ampla de Baixa Potência, do inglês *Low-Power Wide-Area Network* (LPWAN), como meio de se introduzir um parcela do que se define como IoT (CENTENARO *et al.*, 2016). LPWANs visam acomodar dispositivos de baixo custo que requerem baixo consumo energético, havendo tolerância para uma taxa de transmissão de dados relativamente baixa. Portanto, LPWANs têm particular relevância em cenários cujos dispositivos são alimentados com baterias ou situados em locais de difícil acesso. Além disso, Raza *et al.* (2017) destaca também que LPWANs têm o potencial de suplantarem técnicas convencionais em aplicações como cidades inteligentes e comunicações Máquina a Máquina, do inglês *Machine to Machine* (M2M).

Visando satisfazer requisitos de LPWANs, a Semtech Corporation desenvolveu a tecnologia para comunicação sem fio de longo alcance denominada, do inglês, *Long Range* (LoRa). A modulação LoRa é baseada no conceito de CSS, do inglês *Chirp Spread Spectrum* (CSS), técnica pela qual os efeitos ruidosos do canal sem fio na transmissão podem ser reduzidos (REYNDERS; POLLIN, 2016). Redes que utilizam LoRa são tipicamente guiadas pelo protocolo LoRaWAN, do inglês, *LoRa Wide-Area Network* (LoRaWAN), criado pela LoRa Alliance (LORA ALLIANCE, INC., 2017). O protocolo LoRaWAN é estabelecido sobre um modelo de rede de topologia estrela. Nesse tipo de topologia, cada Dispositivo Final, do inglês *End-Device* (ED), possui

posição e mensagem únicas, realizando comunicação exclusivamente com uma ponte de ligação, ou, do inglês, *GateWay* (GW). Por sua vez, o GW é responsável pela conversão dos pacotes recebidos dos EDs para Protocolo da Internet, do inglês *Internet Protocol* (IP), e pelo posterior envio dos dados ao Servidor da Rede, do inglês *Network Server* (NS) (MAHMOOD *et al.*, 2019; HOELLER *et al.*, 2018; SANT'ANA *et al.*, 2020a).

O múltiplo acesso em LoRaWANs é baseado no protocolo ALOHA, que não possui mecanismos para evitar transmissões simultâneas oriundas de mais de um ED (HOELLER *et al.*, 2018). Nesse caso, sinais de EDs distintos poderiam causar interferência mútua quando recebidos pelo GW, em um evento denominado colisão (SUNDARAM *et al.*, 2020). Em protocolos que não impedem colisões, elas acontecem com maior frequência quando há alta densidade de dispositivos, situação prevista com a ascensão da IoT. Logo, tanto quanto o modelar do desempenho de esquemas em LoRaWANs, como realizado por Georgiou e Raza (2017), métodos que buscam mitigar ou contornar o impacto de colisões, como o proposto por Sant'Ana *et al.* (2020b), tornaram-se cruciais para garantir a aplicabilidade futura de implementações do protocolo LoRaWAN.

Apesar de não estar contemplada atualmente em LoRaWAN, uma alternativa à convencional adoção da topologia estrela é a utilização de comunicação Dispositivo à Dispositivo, do inglês *Device to Device* (D2D). Como demonstrado por Jiang *et al.* (2021), o uso de D2D pode levar a um ganho significativo no desempenho de rede. A inclusão de esquemas D2D em futuras implementações envolvendo LoRaWAN é esperada não apenas para que se realize comunicação direta entre EDs, mas também para que EDs cooperem entre si para melhorar a qualidade da comunicação no enlace ED-GW.

Apresentada inicialmente por Laneman *et al.* (2004), a comunicação cooperativa permite expandir o desempenho de sistemas com uma antena para algo similar ao de múltiplas antenas e promover maior diversidade espacial. Devido a natureza do canal sem fio, EDs podem escutar a mensagem de parceiros e auxiliá-los ao encaminhar o sinal recebido ao GW comum. A cooperação pode ser efetivada com técnicas como a simples amplificação do sinal do parceiro, no chamado *Amplify-and-Forward*, e a decodificação com posterior encaminhamento, no *Decode-and-Forward* (LANEMAN *et al.*, 2004).

Esquemas mais complexos de cooperação, como o apresentado por Ahlswede *et al.* (2000), possibilitam que os EDs informem mais de uma mensagem ao GW em uma única transmissão. Para isso, as mensagens são combinadas linearmente em um campo finito de ordem

q , $GF(q)$, resultando em uma sequência de bits singular. A técnica, denominada Cooperação com Codificação de Rede, do inglês *Network-Coded Cooperation* (NCC) (XIAO; SKOGLUND, 2010; REBELATTO *et al.*, 2012), permite melhorar mais a confiabilidade da rede (WU *et al.*, 2015). Porém, a implementação de técnicas cooperativas para redes LoRa esbarra na dificuldade associada ao processo de efetivação da cooperação. O processo cooperativo é comumente modelado por duas etapas: Etapa de Difusão, do inglês *Broadcast Phase* (BP), e Etapa de Cooperação, do inglês *Cooperation Phase* (CP). Na primeira, a informação é difundida no meio e então captada pelos EDs parceiros e pelo GW. A segunda etapa consiste na transmissão que efetiva a cooperação (LANEMAN *et al.*, 2004). Em redes LoRa, porém, o GW está frequentemente a uma distância grande dos EDs, além de os EDs estarem distantes entre si. Com isso, as mensagens transmitidas na BP podem não contribuir para a diversidade de recepção no GW, não serem recebidas adequadamente pelos parceiros de cooperação, ou ainda requerer um consumo alto para decodificação, situações que devem ser acomodadas por possíveis esquemas.

1.1 CONTRIBUIÇÕES

Estuda-se neste trabalho uma implementação de NCC para redes baseadas em LoRa. O esquema cooperativo, que doravante convencionar-se denominar NCC-LoRa, é modelado de forma que os EDs podem trocar mensagens via comunicação D2D. A partir disso, os EDs utilizam o conceito de NCC, discutido por Xiao e Skoglund (2010) e Rebelatto *et al.* (2012), para transmitir ao GW: *i*) suas mensagens individuais em uma BP e *ii*) na CP, a combinação linear num campo finito dos pacotes originados dos parceiros.

Formula-se a probabilidade de *outage* do NCC-LoRa, levando em consideração os eventos de desconexão e colisão de (GEORGIU; RAZA, 2017). Também é modelada uma aproximação da probabilidade de cooperação. Finalmente, conclui-se que o NCC-LoRa é capaz de gerar resultados superiores em termos de número de dispositivos suportados na rede e menor consumo médio de corrente elétrica por ciclo de transmissão que os sistemas concorrentes analisados: LoRa convencional e LoRa com repetição de mensagens (RT-LoRa), de (HOELLER *et al.*, 2018).

1.2 MOTIVAÇÃO

Raza *et al.* (2017) estimou que o número de dispositivos conectados em LPWANs atingiria a ordem de dezenas de bilhões dentro da década atual. Portanto, é imprescindível que se produza esquemas que sejam capazes de contornar os efeitos de colisões, visando aprimorar o desempenho de LPWANs em situações de alta densidade. Também, sabe-se de longa data (FEHSKE *et al.*, 2011) que sistemas de comunicação sem fio podem gerar um aumento significativo no impacto do ser humano no meio ambiente (SRIVASTAVA *et al.*, 2020). A necessidade da produção de novas baterias, por exemplo, requer a utilização de recursos naturais. Há, conseqüentemente, uma crescente demanda por uma maior eficiência energética em redes móveis (FEHSKE *et al.*, 2011), de forma que se possa prolongar a vida útil das baterias. Neste cenário, esquemas NCC podem representar uma alternativa viável que concomitantemente abrange ambos os desafios mencionados ao melhorar a confiabilidade na troca de informações entre dispositivos e o GW (XIAO; SKOGLUND, 2010; REBELATTO *et al.*, 2012).

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Propor um esquema Cooperativo com Codificação de Rede baseado nos conceitos de Xiao e Skoglund (2010) e Rebelatto *et al.* (2012) aplicável à redes LoRa, cujo desempenho sob as métricas de alcance da rede e consumo de corrente elétrica por ciclo de transmissão seja superior aos obtidos pelos esquemas LoRa convencional e RT-LoRa.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Analisar a probabilidade de *outage* de *uplink* do esquema proposto, levando em consideração características da topologia da rede na modelagem da probabilidade de cooperação;
- Modelar o consumo de corrente elétrica por ciclo de transmissão considerando o uso da modulação Chaveamento de Mudança de Frequência, do inglês *Frequency-Shift Keying* (FSK), com alta taxa de transmissão para a realização de uma etapa D2D;
- Averiguar o desempenho do esquema proposto através de simulações computacionais da probabilidade de *outage* e do consumo médio de corrente por ciclo de transmissão.

Compará-lo aos de esquemas concorrentes baseados em LoRa convencional e-LoRa com replicação de mensagens (RT-LoRa).

1.4 PUBLICAÇÕES

Durante o período do curso de mestrado foram elaborados dois artigos. Um dos trabalhos foi publicado em conferência nacional (ALVES *et al.*, 2020) enquanto o outro está sob revisão em periódico internacional, porém disponível em plataforma virtual de *preprint* em (ALVES *et al.*, 2021).

1.5 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

O Capítulo 2 contém uma revisão da literatura abordando a progressão recente do estado-da-arte no assunto deste trabalho. Apresenta-se no Capítulo 3 conceitos preliminares referentes ao modelo do sistema. São caracterizados os esquemas LoRa convencional e LoRa com retransmissões (RT-LoRa). O Capítulo 4 define o esquema proposto quanto sua probabilidade de *outage*, com uma aproximação para a probabilidade de cooperação, e consumo de corrente elétrica por ciclo de transmissão. Enfatiza-se nessa análise o impacto da etapa D2D. Compila-se os resultados de simulação no Capítulo 5, onde também são analisados detalhes referentes ao comportamento observado. Finalmente, o Capítulo 6 apresenta as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo contém uma breve revisão do estado da arte no tema desta dissertação. São mencionadas, inicialmente, referências que exploraram a modelagem do desempenho de redes LoRa. Cita-se, então, aquelas que propuseram técnicas visando aprimorar a qualidade do serviço da rede por métodos não-cooperativos. Por fim, trabalhos que buscam alternativas fora da topologia convencional de redes LoRa são discutidos, com enfoque nas contribuições de trabalhos que empregam técnicas baseadas na comunicação D2D.

De início, Georgiou e Raza (2017) explorou os eventos que podem causar falhas no Laço de comunicação entre ED e GW (ED-GW), ou no *uplink*, em redes LoRa. Através da geometria e análise estocástica, modelou-se a cobertura da rede em termos de duas probabilidades. A primeira, designada probabilidade de conexão, é a de que o sinal recebido no GW alcance uma Relação Sinal-Ruído, do inglês *Signal-to-Noise Ratio* (SNR), de conceito elucidado na Seção 3.4, superior ao limite de detecção, estabelecido previamente em documentação técnica (SEMTECH CORPORATION, 2019). A segunda é a que se convencionou denominar probabilidade de conexão. Em (GEORGIU; RAZA, 2017) ela foi aferida através da probabilidade de que o sinal que se deseja obter tivesse uma SNR quatro vezes maior (com 6 dB de diferença) que qualquer outro sinal recebido que utiliza o mesmo Fator de Espalhamento, do inglês *Spreading Factor* (SF), configurando interferência co-SF. A probabilidade de *outage*, então, foi aproximada pelo complemento do produto das probabilidades de conexão e captura (GEORGIU; RAZA, 2017).

Mahmood *et al.* (2019) expandiu a definição da probabilidade de conexão, incluindo a interferência inter-SF, onde sinais de dispositivos que transmitem com outros SFs produzem interferência. Foi demonstrado que a interferência inter-SF é um fator não-desprezível na probabilidade de *outage*. Entretanto, verificou-se que há uma dominância da interferência co-SF no desempenho, algo especialmente relevante no contexto de redes com alta densidade. Nesse cenário, Mahmood *et al.* (2019) também determinou que o modelo aproximado do maior interferidor de Georgiou e Raza (2017) pode ser muito otimista. Foi definido, então, que a probabilidade de captura deve ser dimensionada de forma que a soma de toda interferência seja $\delta = 6$ dB menor que o sinal que se deseja aferir (MAHMOOD *et al.*, 2019).

Visando melhorar o desempenho em redes LoRa, um modelo de replicação, ou repetição, de pacotes e múltiplas antenas foi proposto em (HOELLER *et al.*, 2018). Com essas técnicas o GW seria capaz de perceber maior diversidade, respectivamente, temporal e espacial na

recepção. Hoeller *et al.* (2018) demonstrou que há um número ótimo de repetições que minimiza a probabilidade de *outage*. O termo limitante com o aumento das réplicas é a probabilidade de captura. A interferência causada por M cópias de cada pacote de informação provocou um aumento virtual de M vezes na densidade da rede, ou no número de pacotes “no ar”. Percebeu-se também em (HOELLER *et al.*, 2018) que a mesma limitação não ocorria com o aumento do número de antenas.

Em (SANT’ANA *et al.*, 2020a), o desempenho da técnica de replicação foi melhorado ainda mais em relação ao modelo convencional pela introdução de transmissões codificadas (MONTEJO-SÁNCHEZ *et al.*, 2019). Nessa abordagem, os dispositivos deveriam compilar um determinado número de mensagens e codificá-las através de uma combinação linear dos bits de cada mensagem original. Enfim, uma única sequência de bits deveria ser transmitida para o GW. O método proposto por Sant’Ana *et al.* (2020a) foi capaz de contornar parte significativa do aumento virtual da densidade da rede introduzido na técnica de repetição de pacotes de Hoeller *et al.* (2018). Entretanto, além da necessidade de uma capacidade maior de armazenamento de dados, o esquema com codificação proposto por Sant’Ana *et al.* (2020a) pode introduzir latência na rede, visto que várias mensagens deveriam ser acumuladas antes de serem transmitidas.

Indo além da topologia convencional em estrela de LoRaWAN adotada em (GEORGIOU; RAZA, 2017; MAHMOOD *et al.*, 2019; HOELLER *et al.*, 2018; SANT’ANA *et al.*, 2020a; SANT’ANA *et al.*, 2020b), estudou-se em (JIANG *et al.*, 2021) a adoção de uma LPWAN híbrida. Nela, LoRa e a tecnologia de curto-alcance denominada ANT (DYNASTREAM INNOVATIONS INC., 2014) são integradas, tendo em vista produzir uma melhora de performance na situação de altas densidades de rede. Para viabilizar a solução de Jiang *et al.* (2021), porém, seria necessário introduzir um procedimento de agendamento de transmissões afim de manter todos os EDs sincronizados, o que adiciona complexidade e consumo energético ao esquema.

Em uma outra alternativa estudada em (BORKOTOKY *et al.*, 2019), *relays* fixos são incorporados à rede. Esses *relays* têm a função de perceber do meio as transmissões dos EDs ao GW e repassá-las novamente. Assim, garante-se maior diversidade de recepção sem demandar transmissões adicionais nos EDs, o que reduz o consumo energético. Conforme obtido em (BORKOTOKY *et al.*, 2019), a abordagem permitiu uma redução da ordem de 50% na taxa de perda de mensagens com apenas um *relay*. Assim, Borkotoky *et al.* (2019) concluiu que esse esquema é capaz de promover uma melhora na confiabilidade de uma rede LoRa com restrição de Ciclo de Trabalho, do inglês *Duty Cycle* (DC). Entretanto, a implementação dessa alternativa à topologia

estrela esbarra no custo adicional decorrente da necessária inclusão de *relays* dedicados.

Essa limitação pode ser contornada pelo uso da comunicação D2D, de validação empírica em LoRaWAN realizada por Mikhaylov *et al.* (2017). Em (MIKHAYLOV *et al.*, 2017), os EDs possuem mensagens a serem comunicadas a outros EDs. Ao invés de adotar o processo usual da topologia estrela de LoRaWAN, em que essas mensagens seriam informadas ao GW que então as repassaria aos respectivos EDs de destino, os EDs realizam transmissões diretas entre si. O procedimento produziu uma redução de até 20 vezes no tempo e energia despendidos para a transferência de dados (MIKHAYLOV *et al.*, 2017). Há, entretanto, uma preocupação quanto a privacidade e segurança de utilizar D2D.

Nesse contexto, Kim e Song (2018) propõe um mecanismo de troca de chaves entre os EDs. Assim, diante da autenticação mútua, os EDs podem garantir autenticidade e integridade da troca de informações via D2D. Com esse esquema, devido à etapa adicional de autenticação, há um acréscimo no consumo de energia dos EDs quando comparado ao modelo proposto em (MIKHAYLOV *et al.*, 2017). Kim e Song (2018) determinou, todavia, que o consumo adicional representa um aumento de apenas 5% no consumo total do procedimento de troca de informação.

Finalmente, diante do estado da arte, torna-se evidente que o emprego de D2D em redes LoRa, e mais especificamente em LoRaWAN, seria capaz de gerar grandes benefícios em termos de consumo energético e confiabilidade da rede. Este trabalho, portanto, discorre sobre um possível protocolo para viabilizar o uso de D2D para ampliar o desempenho no ED-GW. No cenário avaliado, ao invés de ter como objetivo a troca de pacotes de informação entre EDs distintos como em Mikhaylov *et al.* (2017), busca-se realizar comunicação diretamente com o GW.

3 PRELIMINARES

Neste capítulo são introduzidos diversos conceitos necessários para a boa compreensão do que é explorado nos próximos capítulos. Primeiramente, a modulação LoRa será explorada. Tanto o Tempo no Ar, do inglês *Time-on-Air* (ToA), de cada pacote quanto a taxa de transmissão de bits correspondente serão estabelecidos. Depois, o modelo do sistema é apresentado, seguido pelas definições da probabilidade de *outage* de *uplink* para uma única transmissão LoRa e para o esquema de LoRa com retransmissões (RT-LoRa). Por fim, o conceito de NCC é explorado, sendo determinada a probabilidade de *outage* obtida com a técnica.

3.1 NOTAÇÃO

Convencionou-se utilizar as seguintes notações neste trabalho: $\Pr\{X\}$ expressa a probabilidade do evento X , $\lceil x \rceil$ expressa a função de arredondamento ao número inteiro acima de x e $|X|$ é a área da região $X \in \mathbb{R}^2$. Considera-se que $\max\{\cdot\}$ é a função de máximo e $\min\{\cdot\}$ a de mínimo. Também, \boxplus e \boxtimes indicam as operações de soma e produto, respectivamente, no campo finito $\text{GF}(q)$ de ordem q . Além disso, $\mathbb{E}(\phi)$ é a esperança matemática de ϕ e $\mathcal{CN}(a,b)$ representa a distribuição normal aplicada nas dimensões real \mathbb{R} e imaginária \mathbb{I} com média a e variância b . Por fim, o símbolo \approx indica um resultado aproximado.

3.2 MODULAÇÃO LONG RANGE (LORA)

LoRa é uma técnica de modulação desenvolvida e patenteada pela empresa Semtech Corporation (SELLER, 2017). Fundamentada em CSS, LoRa é capaz de perceber, com um certo grau de eficiência, uma redução nos efeitos do ruído introduzido pelo canal sem fio (REYNOLDERS; POLLIN, 2016). Portanto, é mais adequada para aplicações onde são requeridos alto alcance de rede e consumo energético relativamente baixo (SUNDARAM *et al.*, 2020). O conjunto de parâmetros da modulação LoRa que define o ToA de cada pacote, contém (SEMTECH CORPORATION, 2019): a largura de banda de transmissão $B \in \{125, 250, 500\}$ kHz, o SF, $S_F \in \{7, \dots, 12\}$ e a Taxa de Codificação, do inglês *Coding Rate* (CR), $CR \in \{1, \dots, 4\}$.

Desses fatores, calcula-se o ToA, representado por T_{TX} , através de (SEMTECH COR-

Tabela 1 – Características de LoRa para banda de 125 kHz, CR = 1, 9 bytes de *payload*, 8 símbolos de preâmbulo, modo CRC ativado e de cabeçalho implícito desativado.

Fator de Espalhamento \mathcal{S}_F	Tempo no Ar T_{TX} (ms)	Taxa de bits R_b (kbps)	Sensibilidade do Receptor S (dBm)	SNR Mínima Ψ (dB)
7	41.22	5.47	-123.0	-6.0
8	72.19	3.13	-126.0	-9.0
9	144.38	1.76	-129.0	-12.0
10	247.81	0.98	-132.0	-15.0
11	495.62	0.54	-134.5	-17.5
12	991.23	0.29	-137.0	-20.0

Fonte: Autoria própria, baseado em (SEMTECH CORPORATION, 2019).

PORATION, 2019):

$$T_{TX} = \frac{2^{\mathcal{S}_F}}{B} (n_{pre} + n_{pay} + 4.25) \quad [s], \quad (1)$$

em que n_{pre} e n_{pay} são os números de símbolos no preâmbulo e *payload*, respectivamente. Conforme também estabelecido em documentação técnica (SEMTECH CORPORATION, 2019), n_{pay} é uma função de \mathcal{S}_F , CR e do tamanho em bytes do *payload* PL, de forma que, para transmissões com Verificação de Redundância Cíclica, do inglês *Cyclic Redundancy Check* (CRC) ativada e com modo de cabeçalho implícito desativado, tem-se:

$$n_{pay} = 8 + \max \left\{ 0, (CR + 4) \left\lceil \frac{44 + 8PL - 4\mathcal{S}_F}{4(\mathcal{S}_F - 2DE(\mathcal{S}_F))} \right\rceil \right\} \quad [\text{símbolos}], \quad (2)$$

onde $DE(\mathcal{S}_F)$ é uma função de otimização de confiabilidade para baixas taxas e assume o valor de 1 ou 0, para $\mathcal{S}_F \geq 11$ e $\mathcal{S}_F < 11$, respectivamente. Finalmente, a taxa de transmissão de bits R_b é calculada por (SEMTECH CORPORATION, 2019):

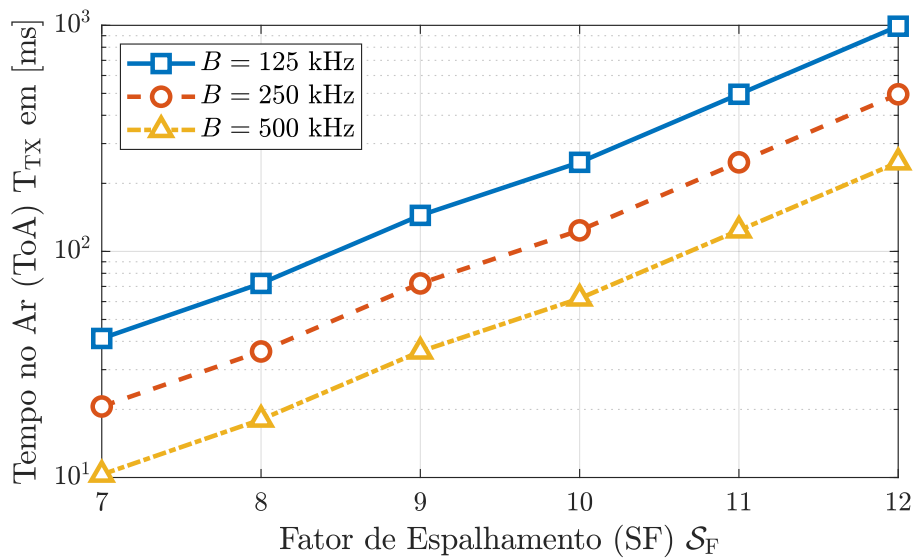
$$R_b = \mathcal{S}_F B \frac{2^{2-\mathcal{S}_F}}{(4 + CR)} \quad [\text{bits/s}]. \quad (3)$$

Como representado na Figura 1, o ToA aumenta exponencialmente com o SF. Consequentemente, a taxa de transmissão de bits é reduzida. Por sua vez, a sensibilidade do receptor S e a SNR mínima de recepção Ψ aumentam com o SF. A Tabela 1 revela os valores de S e Ψ conforme a documentação técnica do dispositivo SX1272 da Semtech (SEMTECH CORPORATION, 2019), que opera com a modulação LoRa.

LoRaWAN, criado pela LoRa Alliance, é um protocolo de comunicação que define uma arquitetura para redes estabelecidas sobre a camada física LoRa. Nele, os EDs comunicam-se exclusivamente com um GW no que se configura como topologia estrela, exemplificada pela Figura 2. Enfim, o GW informa ao NS os dados recebidos dos EDs através de um link tradicional IP (LORA ALLIANCE, INC., 2017).

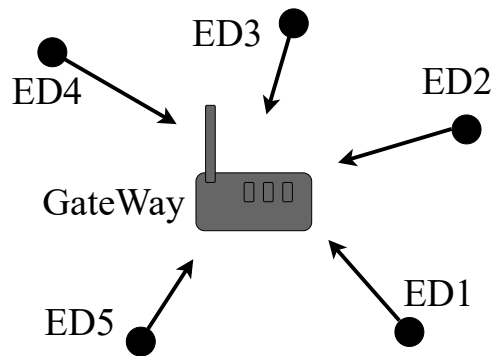
É importante mencionar que, embora o protocolo LoRaWAN seja fundamentado em LoRa, redes LoRa não necessariamente utilizam LoRaWAN. LoRa é um apenas elemento da

Figura 1 – Variação do Tempo no Ar (ToA) em função do Fator de Espalhamento (SF) para 9 bytes de *payload*, 8 símbolos de préambulo, CR = 1, com modo CRC ativado e modo de cabeçalho implícito desativado.



Fonte: Autoria própria, baseado em (SEMTECH CORPORATION, 2019).

Figura 2 – Exemplo de 5 EDs transmitindo informação a um GW conforme a topologia estrela.



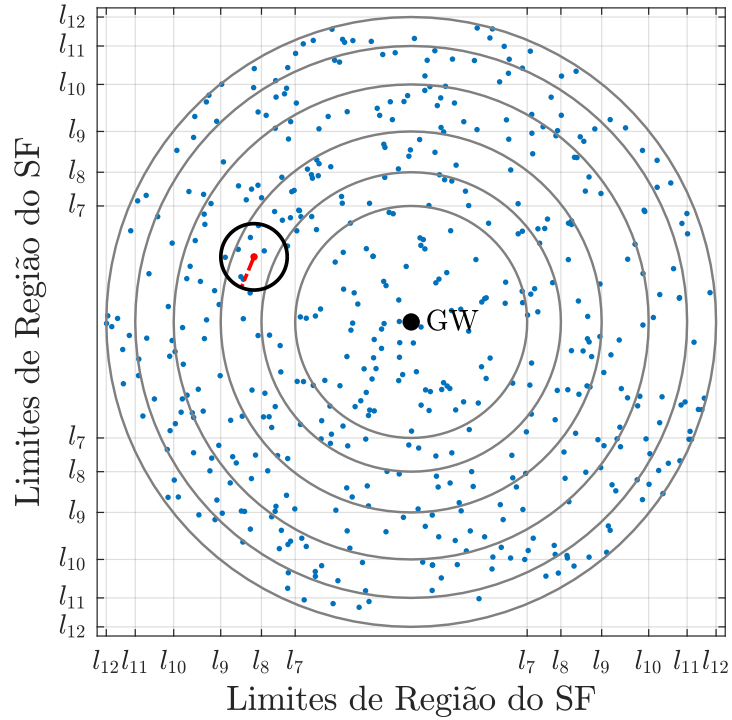
Fonte: Autoria própria.

camada física cuja operação é independente das camadas superiores do protocolo de comunicação. Apesar disso, LoRaWAN é o método mais comum de implementação de redes baseadas em LoRa.

3.3 MODELO DO SISTEMA

Adota-se nesta dissertação o cenário em que um GW está disposta no centro de uma região circular $\mathcal{V} \in \mathbb{R}^2$ de raio \mathcal{R} , como no exemplo da Figura 3. O número de EDs ativos e distribuídos uniformemente em \mathcal{V} é N , sendo os EDs indexados aleatoriamente pelo índice n , tal

Figura 3 – Realização do modelo do sistema com distribuição aleatória de EDs segundo um PPP e com a distância de cooperação, de conceito explorado na Seção 4.1, demarcada em vermelho.



Fonte: Autoria própria, adaptado de Alves *et al.* (2021).

que $\{\text{ED}_n\}_{n=1}^N$. Assume-se doravante o índice $n = 1$ para se referir a um ED genérico, sendo qualquer conclusão sobre o ED_1 possível de ser estendida para $n \leq N$ sem perda alguma de generalidade. A distância euclidiana do ED_1 ao GW é $d_1 < \mathcal{R}$. Define-se N através um Processo de Ponto de Poisson (PPP) Φ com intensidade $\rho = \bar{N}/|\mathcal{V}|$, onde \bar{N} é o número médio de EDs e $|\mathcal{V}|$ a área de \mathcal{V} tal que $|\mathcal{V}| = \pi\mathcal{R}^2$.

A comunicação em redes LoRaWAN pode ser bidirecional: os EDs transmitem ao GW e vice-versa. Entretanto, no cenário abordado neste trabalho, considera-se apenas o ED-GW, ou o *uplink*. O acesso ao canal segue o protocolo ALOHA, em que cada dispositivo transmite no instante que a mensagem se torna disponível, sem agendamento prévio com o GW (HOELLER *et al.*, 2018). Assim, os EDs são denominados dispositivos Classe-A em redes LoRaWAN (LORA ALLIANCE, INC., 2017). Aplica-se, contudo, o limite de 1% ao DC, para o maior SF. Sendo assim, o DC experimentado por um ED é dado por:

$$\varrho(\mathcal{S}_F) = \frac{T_{\text{TX}}(\mathcal{S}_F)}{T_{\text{slot}}}, \quad (4)$$

onde $T_{\text{TX}}(\mathcal{S}_F)$ é o ToA da Equação (1), com valores na Tabela 1, e T_{slot} é a duração de um ciclo de transmissão considerando o limite de 1% para $\mathcal{S}_F = 12$.

Assume-se também que a frequência de geração de novos dados à transmitir em cada ED é constante e igual para todos os dispositivos. Portanto, mesmo que o ToA diminua com SFs menores, como mostrado na Figura 1, os dispositivos compartilham da mesma duração do ciclo de transmissão T_{slot} .

3.3.1 Modelos de Perda de Percurso e Desvanecimento

Sabe-se que o canal de comunicação sem fio possui características dinâmicas aleatórias. Por essa razão, o efeito por ele incidido em ondas eletromagnéticas, vetor das transmissões em redes sem fio, torna-se imprevisível, sendo sua aferição exata impossível. Entretanto, o comportamento médio do canal pode ser averiguado pela perda de percurso, que em suma revela a dissipação da potência transmitida para uma dada distância da origem do sinal. Assim, existem vários modelos para a perda de percurso de acurácia que varia conforme características do ambiente (GOLDSMITH, 2005).

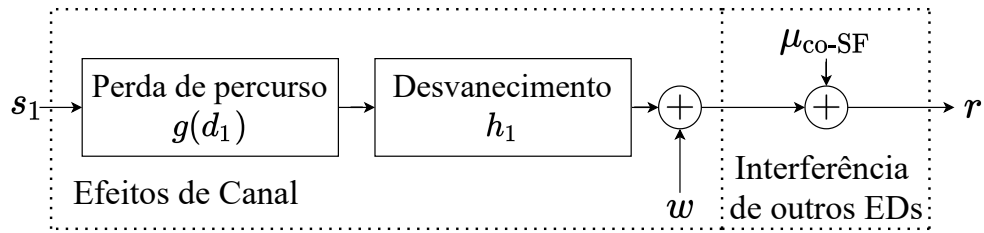
Matematicamente, a perda de percurso pode ser definida como a razão entre as potências média de recepção $\overline{P_{\text{RX}}}$ e a de transmissão do sinal, P_{TX} . Utiliza-se neste trabalho o que Goldsmith (2005) define como sendo o modelo simplificado de perda de percurso ou modelo de Friis. O benefício de tal modelo vem de sua simplicidade e utilidade para aplicações genéricas. Conforme ditado pela literatura, por exemplo em Mahmood *et al.* (2019) e Sant’Ana *et al.* (2020b), o modelo adotado é tal que:

$$g(d_1) = \frac{\overline{P_{\text{RX}}}}{P_{\text{TX}}} = \left(\frac{c}{4\pi f_c} \right)^2 (d_1)^{-\eta}, \quad (5)$$

em que $c \approx 3 \times 10^8$ m/s é a constante física da velocidade da luz, f_c é a frequência de portadora (em Hz) e $\eta \geq 2$ é o coeficiente de perda de percurso, sendo a Equação (5) válida apenas para $d_1 > 1$ m.

Enquanto o modelo da perda de percurso é capaz de estimar a média do impacto do canal sem fio no sinal transmitido, é através do modelo de desvanecimento que pode-se modelar o efeito do meio de comunicação na potência instantânea (GOLDSMITH, 2005). Novamente, existem várias formas de se computar o desvanecimento. Aqui, o fenômeno é modelado de forma que o envelope do coeficiente de desvanecimento h_1 siga a distribuição de Rayleigh, ou $h_1 \sim \mathcal{CN}(0,1)$, como no estado-da-arte (GEORGIU; RAZA, 2017; MAHMOOD *et al.*, 2019; HOELLER *et al.*, 2019). Logo, o ganho de canal $|h_1|^2$ tem distribuição exponencial (HOELLER *et al.*, 2018). Considera-se também uma potência de transmissão P_{TX} igual para todos os EDs.

Figura 4 – Diagrama de blocos representando a modelagem dos efeitos do canal e interferência co-SF.



Fonte: Autoria própria.

Enfim, dado o sinal s_1 transmitido pelo ED₁, modela-se o sinal recebido pelo GW r conforme o esquema apresentado na Figura 4, onde (HOELLER *et al.*, 2019):

$$r = \sqrt{P_{TX}g(d_1)}h_1s_1 + \underbrace{\sum_{n=2}^N \mathcal{X}_{1,n}^{SF} \sqrt{P_{TX}g(d_n)}h_ns_n}_{\mu_{co-SF}} + w \quad [\text{W}], \quad (6)$$

onde w é o Ruído Gaussiano Branco Aditivo, do inglês *Additive White Gaussian Noise* (AWGN), com média zero e variância $\mathcal{N} = -174 + \text{NF} + 10 \log_{10} B$ (dBm), sendo NF a Figura de Ruído, do inglês *Noise Figure* (NF) (GEORGIOU; RAZA, 2017). Também, $\mathcal{X}_{1,n}^{SF}$ é uma função que indica se o ED _{n} , $\forall n \neq 1$, está transmitindo ao mesmo tempo e com o mesmo SF que o ED₁. Logo, considera-se apenas a interferência entre EDs que utilizam o mesmo SF, ou interferência co-SF (MAHMOOD *et al.*, 2019), representada por μ_{co-SF} na Equação (6). Conforme Mahmood *et al.* (2019), discutido no Capítulo 2, a interferência causada por EDs de outros SFs, apesar de não-desprezível, é de menor intensidade, e, portanto, não é considerada neste trabalho.

3.3.2 Procedimento de Alocação de SF

O aumento de SF provoca uma redução na taxa de transmissão de bits enquanto aprimora a detecção dos sinais através de uma maior sensibilidade de recepção no GW, conforme discutido na Seção 3.2. Porém, conforme será explorado na Seção 4.3, SFs mais baixos produzem menos consumo de corrente elétrica (SEMTECH CORPORATION, 2019).

Diante dessas considerações, adota-se um procedimento de alocação de SFs visando minimizar o consumo médio de corrente por ciclo de transmissão, enquanto mantém-se uma determinada qualidade de serviço, medida pela chamada probabilidade de *outage*. Define-se, então, \mathcal{O}_{alvo} como sendo a probabilidade de *outage* máxima permitida na rede. O ED₁ emprega o menor SF possível mantendo sua probabilidade de *outage*, para a operação com o esquema sch, abaixo da máxima \mathcal{O}_{alvo} . Ou seja, o limite superior de um dado SF é definido como

$$l_{\mathcal{S}_F} = \{d_1 | \mathcal{O}_{\text{sch}}(d_1, \mathcal{S}_F) = \mathcal{O}_{\text{alvo}}\}.$$

Outras técnicas incluem a adoção de fronteiras de SF pré-definidas, tais como em (RAZA *et al.*, 2017; HOELLER *et al.*, 2018; MAHMOOD *et al.*, 2019), e a baseada no Indicador da Intensidade do Sinal Recebido, do inglês *Receiver Signal Strength Indicator* (RSSI), de cada ED, utilizada por Cuomo *et al.* (2017). Por fim, o alcance da região de cada SF $\xi(\mathcal{S}_F)$, também referida como a largura do SF, é definida pela distância entre suas fronteiras, ou seja, $\xi(\mathcal{S}_F) = l_{\mathcal{S}_F} - l_{\mathcal{S}_F-1}$.

3.4 PROBABILIDADE DE OUTAGE DE UPLINK

Conforme o padrão da literatura (GEORGIU; RAZA, 2017; HOELLER *et al.*, 2018; SANT'ANA *et al.*, 2020a), define-se que a mensagem s_1 está em *outage* no GW na condição da ocorrência de pelo menos um de dois eventos: desconexão e interferência demasiadamente intensa de outros sinais. Adota-se as notações \mathcal{H}_1 e \mathcal{Q}_1 para as probabilidades dos eventos de *conexão* e o que se convencionou chamar de *captura*, respectivamente, relacionados aos dois eventos mencionados como condição para *outage*, nesta ordem. Além disso, considera-se que eles são eventos independentes. Então, é possível aproximar a probabilidade de *outage* de uma transmissão LoRa \mathcal{O}_1 através de (GEORGIU; RAZA, 2017; HOELLER *et al.*, 2018; MAHMOOD *et al.*, 2019; SANT'ANA *et al.*, 2020a; SANT'ANA *et al.*, 2020b):

$$\mathcal{O}_1 = 1 - \mathcal{H}_1 \mathcal{Q}_1. \quad (7)$$

A probabilidade de conexão \mathcal{H}_1 é determinada pela probabilidade de que s_1 seja recebido com uma SNR igual ou superior ao limite $\Psi(\mathcal{S}_F)$, de valores expostos na Tabela 1. A SNR instantânea de um sinal pode ser aferida através de (GOLDSMITH, 2005):

$$\text{SNR} = \frac{\text{Potência de Recepção}}{\text{Potência de Ruído do Canal}} = \frac{P_{\text{RX}}}{\mathcal{N}} = \frac{P_{\text{TX}} |h_1|^2 g(d_1)}{\mathcal{N}}. \quad (8)$$

Portanto, como $h_1 \sim \mathcal{CN}(0,1)$, a probabilidade de conexão torna-se (GEORGIU; RAZA, 2017):

$$\mathcal{H}_1 = \Pr \{ \text{SNR} \geq \Psi(\mathcal{S}_F) \} = \Pr \left\{ \frac{P_{\text{TX}} |h_1|^2 g(d_1)}{\mathcal{N}} \geq \Psi(\mathcal{S}_F) \right\} = \exp \left(- \frac{\mathcal{N} \Psi(\mathcal{S}_F)}{P_{\text{TX}} g(d_1)} \right). \quad (9)$$

Calcula-se a probabilidade de captura \mathcal{Q}_1 a partir da probabilidade de que a Relação Sinal-Interferência, do inglês *Signal-to-Interference Ratio* (SIR), para interferência co-SF $\mu_{\text{co-SF}}$ seja superior a um determinado limite de $\delta = 6$ dB. O cálculo de \mathcal{Q}_1 é, então (HOELLER *et al.*,

2018; MAHMOOD *et al.*, 2019):

$$\begin{aligned}
\mathcal{Q}_1 &= \Pr \left\{ \frac{|h_1|^2 g(d_1)}{\underbrace{\sum_{n=2}^N \mathcal{X}_{1,n}^{\mathcal{S}_F} |h_n|^2 g(d_n)}_{\mu_{\text{co-SF}}} } \geq \delta \middle| d_1 \right\} \\
&= \mathbb{E}_{|h_1|^2} \left[\Pr \left\{ \mu_{\text{co-SF}} < \frac{|h_1|^2 g(d_1)}{\delta} \middle| d_1 \right\} \right] \\
&= \int_0^\infty \exp(-z) F_{\mu_{\text{co-SF}}} \left(\frac{z g(d_1)}{\delta} \right) dz,
\end{aligned} \tag{10}$$

onde $F_{\mu_{\text{co-SF}}}$ é a Função Distribuição Acumulada, do inglês *Cumulative Distribution Function* (CDF), de $\mu_{\text{co-SF}}$, $\Pr \{a\}$ é a probabilidade do evento a e $\exp(\cdot)$ é a função exponencial.

Conforme Hoeller *et al.* (2018), a Equação (10) pode ser resolvida como:

$$\mathcal{Q}_1 = \exp \left(-4\pi\rho \Lambda(d_1) \varrho(\mathcal{S}_F) \right), \tag{11}$$

sendo que $\varrho(\mathcal{S}_F)$ vem da Equação (4) e considerando que a intensidade do PPP no protocolo ALOHA é o dobro daquela de um *slotted*-ALOHA equivalente (BERIOLI *et al.*, 2016; SANT'ANA *et al.*, 2020a). Na Equação (11), e dado que ${}_2F_1(\cdot)$ é a função hipergeométrica (DAALHUIS, 2010), tem-se também:

$$\Lambda(d_1) = \frac{(l_{\mathcal{S}_F})^2}{2} {}_2F_1 \left(1, \frac{2}{\eta}; 1 + \frac{2}{\eta}; \frac{-(l_{\mathcal{S}_F})^\eta}{\delta d_1^\eta} \right) - \frac{(l_{\mathcal{S}_F-1})^2}{2} {}_2F_1 \left(1, \frac{2}{\eta}; 1 + \frac{2}{\eta}; \frac{-(l_{\mathcal{S}_F-1})^\eta}{\delta d_1^\eta} \right). \tag{12}$$

Substituindo o resultado das Equações (11) e (9) na Equação (7), obtém-se:

$$\begin{aligned}
\mathcal{O}_1 &= 1 - \exp \left(-4\pi\rho \Lambda(d_1) \varrho(\mathcal{S}_F) - \frac{\mathcal{N}\Psi(\mathcal{S}_F)}{P_{\text{TX}} g(d_1)} \right) \\
&\approx 4\pi\rho \Lambda(d_1) \varrho(\mathcal{S}_F) + \frac{\mathcal{N}\Psi(\mathcal{S}_F)}{P_{\text{TX}} g(d_1)},
\end{aligned} \tag{13}$$

em que $1 - \exp(-x) \approx x$ para pequenos valores de x .

3.5 LORA COM RETRANSMISSÕES (RT-LORA)

Adota-se o modelo de RT-LoRa discutido por Hoeller *et al.* (2018) e Sant'Ana *et al.* (2020a) como o de referência de desempenho para esquemas extra-convencionais em redes LoRa. Neste esquema, os EDs transmitem $M \geq 1$ vezes a mesma mensagem dentro de um ciclo de transmissão T_{slot} , sendo respeitado o tempo de coerência do canal, resultando em realizações independentes para cada transmissão. Por esta razão, o DC da Equação (4) deve ser ajustado para acomodar as $M - 1$ transmissões adicionais sem exceder o limite de 1% (SANT'ANA *et al.*, 2020a).

O GW recebe as M cópias e seleciona a que apresentar a maior SNR, do inglês *Selection Combining* (SC) (GOLDSMITH, 2005). A escolha do SC se dá em função de sua praticidade e aplicabilidade no contexto de LoRaWAN (GOLDSMITH, 2005). Além disso, o SC é capaz de atingir a mesma ordem de diversidade do esquema Combinação por razão máxima, do inglês *Maximal Ratio Combining* (MRC). Nesse caso, o esquema RT-LoRa estará em *outage* quando todas as M réplicas não forem recebidas corretamente no GW, evento cuja probabilidade é dada por (GOLDSMITH, 2005; HOELLER *et al.*, 2018; SANT’ANA *et al.*, 2020a):

$$\mathcal{O}_{\text{RT-LoRa}} = (\mathcal{O}_1)^M = \left(1 - \mathcal{H}_1 \mathcal{Q}_1\right)^M, \quad (14)$$

em que \mathcal{O}_1 é a probabilidade de *outage* para uma transmissão LoRa, conforme descrito na Equação (13).

3.6 COMUNICAÇÃO COOPERATIVA

A comunicação cooperativa busca explorar o ganho de diversidade espacial que poderia ser obtido pela combinação de transmissão de origens diferentes (LANEMAN *et al.*, 2004). Esquemas cooperativos permitem a criação do que Laneman *et al.* (2004) chama de *array* virtual de antenas. A partir disso, é possível transmitir a informação de cada dispositivo múltiplas vezes. Dessa forma, os efeitos do uso de técnicas de comunicação cooperativa assemelham-se aos observados em situações em que cada dispositivo é capaz de transmitir por múltiplas antenas (LANEMAN *et al.*, 2004). A seguir, descreve-se o esquema que combina os efeitos da comunicação cooperativa de Laneman *et al.* (2004) com os de codificação de rede apresentado por Ahlswede *et al.* (2000).

3.6.1 Cooperação com Codificação de Rede (NCC)

A cooperação em redes onde há implementação de NCC ocorre através do aproveitamento da própria natureza do canal sem fio, em que as transmissões são difundidas no meio. EDs podem, então, interpretar o sinal disperso e auxiliar o dispositivo gerador da transmissão original através da combinação linear em um campo finito não-binário de ordem q , $\text{GF}(q)$, das mensagens percebidas do meio e sua mensagem individual (REBELATTO *et al.*, 2012).

Esse processo, conforme explorado por Xiao e Skoglund (2010) e Rebelatto *et al.* (2012), usualmente ocorre em duas etapas e de maneira independente em cada ED cooperante.

Tabela 2 – Exemplo de operações de (a) Soma e (b) Multiplicação em um campo finito GF(4).

\boxplus	0	1	2	3
0	0	1	2	3
1	1	0	3	2
2	2	3	0	1
3	3	2	1	0

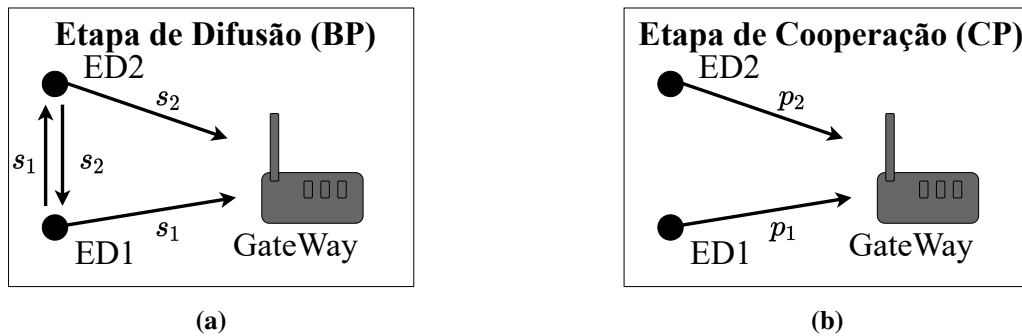
(a)

\boxtimes	0	1	2	3
0	0	0	0	0
1	0	1	2	3
2	0	2	3	1
3	0	3	1	2

(b)

Fonte: Autoria própria, adaptado de Alves *et al.* (2021).

Figura 5 – Etapas de (a) Difusão e (b) Cooperação para efetivação de um protocolo convencional de comunicação com NCC.



Fonte: Autoria própria, baseado em Rebelatto *et al.* (2012).

A primeira, em que os pacotes de informação s_n de cada ED são transmitidos por sua fonte, é denominada BP. Em seguida, efetiva-se a cooperação na CP. Nessa etapa ocorre a transmissão dos chamados pacotes de paridade p_n , que são compostos por combinações lineares sobre GF(q) dos dados oriundos dos pacotes difundidos na BP, a um destino comum.

Considera-se como exemplo o caso de dois EDs cooperando, cada um com uma mensagem própria s_m , em que $m \in \{1,2\}$, a ser conferida ao GW. Assumindo que o tamanho de s_m seja de N_b bits e que um código de rede de taxa $R_{\text{NCC}} = 1/2$ seja utilizado, o conjunto de sinais potencialmente percebidos pelo GW, \mathbf{r} , é (REBELATTO *et al.*, 2012):

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ p_1 \\ p_2 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_1 \boxplus s_2 \\ s_1 \boxplus 2 \boxtimes s_2 \end{bmatrix}^T, \quad (15)$$

em que p_m é o pacote de paridade transmitido pelo dispositivo m na CP, T indica a operação de transposição, e \boxplus e \boxtimes representam a soma e o produto no campo finito GF(4), nessa ordem, que produzem resultados tais como os das Tabelas 2(a) e 2(b). A Figura 5 exemplifica o protocolo desse cenário com dois dispositivos.

Para exemplificar a operação sobre o campo finito GF(4) definido pelas Tabelas 2(a)

e 2(b), duas seqüências geradas aleatoriamente de $N_b = 12$ bits são consideradas:

$$\begin{aligned} s_1 &= [1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0]_2 = [2 \ 3 \ 3 \ 2 \ 2 \ 2]_4 \\ s_2 &= [1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1]_2 = [3 \ 1 \ 0 \ 3 \ 2 \ 1]_4, \end{aligned}$$

em que $[\cdot]_a$ representa os dados em $\text{GF}(a)$. Note que $[\cdot]_a$ pode ser transformado em $[\cdot]_b$ para quaisquer $a, b \in \mathbb{N}$ via operação de mudança de base. Então, executando os cálculos de soma e multiplicação a cada símbolo, definidos pelas Tabelas 2(a) e 2(b), respectivamente, tem-se:

$$\begin{aligned} p_1 &= s_1 \boxplus s_2 = [2 \boxplus 3 \quad 3 \boxplus 1 \quad 3 \boxplus 0 \quad 2 \boxplus 3 \quad 2 \boxplus 2 \quad 2 \boxplus 1]_4 \\ &= [1 \ 2 \ 3 \ 1 \ 0 \ 3]_4 \\ &= [1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1]_2 \end{aligned}$$

e

$$\begin{aligned} p_2 &= s_1 \boxplus 2 \boxtimes s_2 = [2 \boxplus 2 \boxtimes 3 \quad 3 \boxplus 2 \boxtimes 1 \quad 3 \boxplus 2 \boxtimes 0 \quad 2 \boxplus 2 \boxtimes 3 \quad 2 \boxplus 2 \boxtimes 2 \quad 2 \boxplus 2 \boxtimes 1]_4 \\ &= [2 \boxplus 1 \quad 3 \boxplus 2 \quad 3 \boxplus 0 \quad 2 \boxplus 1 \quad 2 \boxplus 3 \quad 2 \boxplus 2]_4 \\ &= [3 \ 1 \ 3 \ 3 \ 1 \ 0]_4 \\ &= [1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]_2. \end{aligned}$$

Rebelatto *et al.* (2012) determina que se os coeficientes das combinações lineares forem escolhidos de forma que se estabeleça um código Separável por Distância Máxima, do inglês *Maximum-Distance Separable* (MDS), então a máxima ordem de diversidade de recepção por NCC é obtida. No exemplo acima, o GW pode recuperar a informação contida em s_1 e s_2 com qualquer par de mensagens em $\mathbf{r} = \{s_1, s_2, p_1, p_2\}$. A probabilidade de *outage* para o NCC, portanto, é averiguada através de (REBELATTO *et al.*, 2012):

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_{\text{NCC}} &= \mathcal{O}_1 \left(\mathcal{O}_1 \mathcal{O}_2^2 + 2\mathcal{O}_1 \mathcal{O}_2 (1 - \mathcal{O}_2) + \mathcal{O}_2^2 (1 - \mathcal{O}_1) \right) \\ &= 2\mathcal{O}_1^2 \mathcal{O}_2 + \mathcal{O}_1 \mathcal{O}_2^2 - 2\mathcal{O}_1^2 \mathcal{O}_2^2, \end{aligned} \tag{16}$$

onde \mathcal{O}_1 e \mathcal{O}_2 são as probabilidades de *outage* dos dispositivos cooperando. Note que \mathcal{O}_2 é obtida da Equação (13) pela simples substituição do índice 1 pelo 2.

Se for observada a situação a alta SNR, nota-se da Equação (16) que, se ambos os EDs experimentarem uma SNR média igual, a ordem de diversidade alcançada com NCC é igual a três. Esse valor é superior ao verificado com o esquema RT-LoRa equivalente, que atinge a ordem de diversidade de dois para $M = 2$ transmissões em um ciclo de transmissão, conforme demonstrado na Equação (14).

3.7 COMENTÁRIOS

Foram abordados diversos conceitos relacionados ao modelo do sistema neste capítulo. Primeiramente, estabeleceu-se brevemente a notação utilizada durante o trabalho. Em seguida, foi caracterizada a modulação LoRa, e discutiu-se os parâmetros que influenciam o ToA de cada pacote transmitido através dela. Foi exacerbada a importância do efeito do SF no ToA: o seu aumento provoca um aumento exponencial no período de transmissão. Também foram expostas equações pelas quais calculam-se o número de símbolos em um dado *payload* e a taxa de transmissão de bits.

Definida a modulação LoRa, apresentou-se o modelo do sistema. A rede foi tipificada através do protocolo LoRaWAN, com topologia estrela, e limitada a um dado DC. Depois, foram detalhados os efeitos de canal que incidem sobre a transmissão pelos modelos de perda de percurso e desvanecimento, além da interferência co-SF.

O procedimento de alocação de SF foi explicitado em seguida. Através dele, garantiu-se que qualquer dispositivo conectado à rede alcance um desempenho pré-definido com o menor SF possível para uma dada distância ao GW. A probabilidade de *outage* para uma única transmissão foi definida, então, a partir de suas probabilidades componentes: de conexão e de captura. Enquanto a primeira comporta os efeitos de canal através da SNR de recepção do sinal, a segunda incorpora a SIR causada por dispositivos que transmitem com o mesmo SF. O esquema de LoRa com retransmissões foi então apresentado, sendo destacado a necessidade de se computar transmissões adicionais no limite imposto pelo DC.

Por fim, foi apresentado o modelo de cooperação e codificação de rede discutido por Rebelatto *et al.* (2012). Nele, dispositivos auxiliam uns aos outros através da combinação linear dos dados contidos nos pacotes de informação de cada parceiro. Assim, foi mostrado que é possível alcançar uma maior ordem de diversidade sem requerer uma transmissão adicional no ED-GW. Esse procedimento de combinação linear no campo finito $GF(q)$ foi demonstrado detalhadamente por um exemplo.

Os conceitos apresentados neste capítulo formam uma base suficiente para a análise realizada nos próximos capítulos. A seguir, será apresentado o modelo de LoRa com cooperação e codificação de rede estudado neste trabalho. Serão examinados modelos da probabilidade de *outage* desse esquema e do consumo energético medido pela corrente média por ciclo de transmissão.

4 O ESQUEMA NCC-LORA

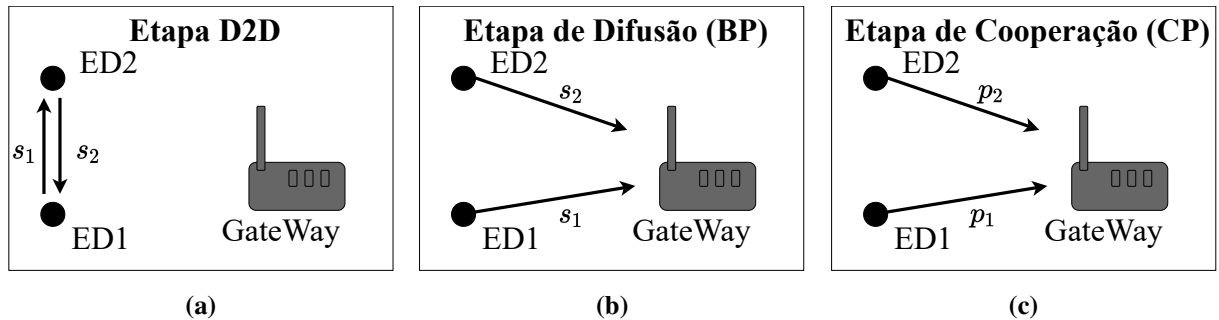
De modo geral, este capítulo trata do esquema LoRa com cooperação e codificação de rede (NCC-LoRa) avaliado nesta dissertação. Recapitula-se nos próximos parágrafos a problemática da implementação de NCC em redes LoRa, além dos motivos da adição de uma etapa adicional ao protocolo descrito na Seção 3.6.1. Também será justificado o uso da modulação FSK na etapa D2D. Então, serão definidos os procedimentos do NCC-LoRa, como disposto na Figura 6, e a probabilidade de *outage* do esquema. Em seguida, apresenta-se uma aproximação para a probabilidade de cooperação baseada nas características de topologia da rede, a partir da consideração de que a cooperação só é estabelecida entre dispositivos que empregam o mesmo SF. Enfim, o modelo de consumo médio de corrente por ciclo de transmissão é apresentado e caracterizado para os esquemas LoRa, RT-LoRa e NCC-LoRa.

4.1 COMUNICAÇÃO ENTRE DISPOSITIVOS (D2D)

Conforme apresentado na Seção 3.2, a modulação LoRa fundamenta-se num inerente equilíbrio (“*trade-off*”) entre imunidade ao ruído, que aumenta o alcance da rede, e a taxa de transmissão de bits (REYNDERS; POLLIN, 2016). A ferramenta pela qual efetiva-se esse *trade-off* são os SFs de transmissão. Devido ao maior ToA, os dispositivos e o GW requerem ativar seus modos operacionais de recepção por um período exponencialmente maior com aumentos de SF, como exposto na Figura 1 e na Tabela 1. A ativação prolongada da antena e demais elementos dos circuitos de recepção provoca um aumento igualmente exponencial no consumo de energia ao se elevar o SF.

A efetivação da cooperação e codificação de rede exige que pacotes de informação sejam trocados entre os dispositivos parceiros, como explorado na Seção 3.6.1. Porém, apesar de ser possível a implementação direta de um protocolo NCC convencional, via modulação LoRa, o consumo experimentado por EDs mais distantes do GW seria significativamente mais alto que os vistos nos EDs que utilizam SFs menores, cenário insustentável dado o propósito das LPWANs. Assim, como alternativa, estuda-se aqui a introdução de uma etapa D2D efetivada por modulação FSK com alta taxa de transmissão de dados ao protocolo NCC, como revelado na Figura 6(a). Ao contrário de LoRa, cujas taxas de transmissão para $B = 125$ kHz estão na Tabela 1, o uso de FSK possibilita a adoção de taxas como 250 kbps, dezenas de vezes maior que as obtidas

Figura 6 – Protocolo do esquema NCC-LoRa com a execução das etapas de (a) D2D, (b) Difusão e (c) Cooperação.



Fonte: Autoria própria, adaptado de Alves *et al.* (2021).

com LoRa (SEMTECH CORPORATION, 2019).

Outro benefício do uso de FSK na comunicação D2D é a pré-existência dos mecanismos para sua implementação em *transceivers* convencionais LoRa, como o SX1272 desenvolvido pela Semtech Corporation (SEMTECH CORPORATION, 2019). Não são necessárias quaisquer adições ao *hardware* dos EDs. Assim, a adoção generalizada de um protocolo de NCC torna-se viável através de uma simples atualização *online* de *firmware*, algo que, por sua vez, também é uma possibilidade padrão em redes baseadas em LoRaWAN (LORA ALLIANCE, INC., 2017).

Ainda outro efeito de FSK com altas taxas é a redução da interferência da etapa D2D nas transmissões do ED-GW. Considerando o uso de FSK com taxa de dados de 250 kbps, para $M = 2$ transmissões LoRa em um ciclo de transmissão do ED-GW, o ToA de uma mensagem de PL = 9 bytes, que representa $N_b = 120$ bits dada a formatação de pacote para tamanho fixo na modulação FSK (SEMTECH CORPORATION, 2019), seria de aproximadamente 0.6% do ToA das etapas BP e CP, no menor ToA alcançável por LoRa, $T_{TX} (S_F = 7, B = 125 \text{ kHz}) = 44.22$ ms, como na Tabela 1.

4.1.1 Probabilidade de Cooperação

Denomina-se a probabilidade de correta comunicação D2D como probabilidade de cooperação. Ela pode ser aferida através de duas componentes. A primeira é a que compila a probabilidade de efetiva transferência de dados. Essa probabilidade depende, de forma genérica, de características da modulação empregada (GOLDSMITH, 2005). A segunda é a probabilidade de que existam EDs na vizinhança do ED₁ dentro do alcance da comunicação D2D, que doravante é referida como apenas probabilidade de vizinhança. A seguir define-se matematicamente ambos os conceitos.

4.1.1.1 Probabilidade de *outage* no enlace D2D

Visando manter uma característica genérica, define-se a probabilidade de efetiva comunicação no enlace D2D como apenas o complemento da probabilidade de sua falha:

$$\mathcal{P}_{\text{efetiva}}^{\text{D2D}} = 1 - \mathcal{O}_{\text{D2D}}. \quad (17)$$

O formato genérico da Equação (17) permite acomodar as diferentes formas de se aferir a probabilidade de *outage* e dos diferentes parâmetros oriundos da modulação utilizada na etapa D2D (GOLDSMITH, 2005). Explicita-se em mais detalhes a metodologia e os valores utilizados na avaliação numérica realizada neste trabalho no Capítulo 5.

4.1.1.2 Probabilidade de vizinhança

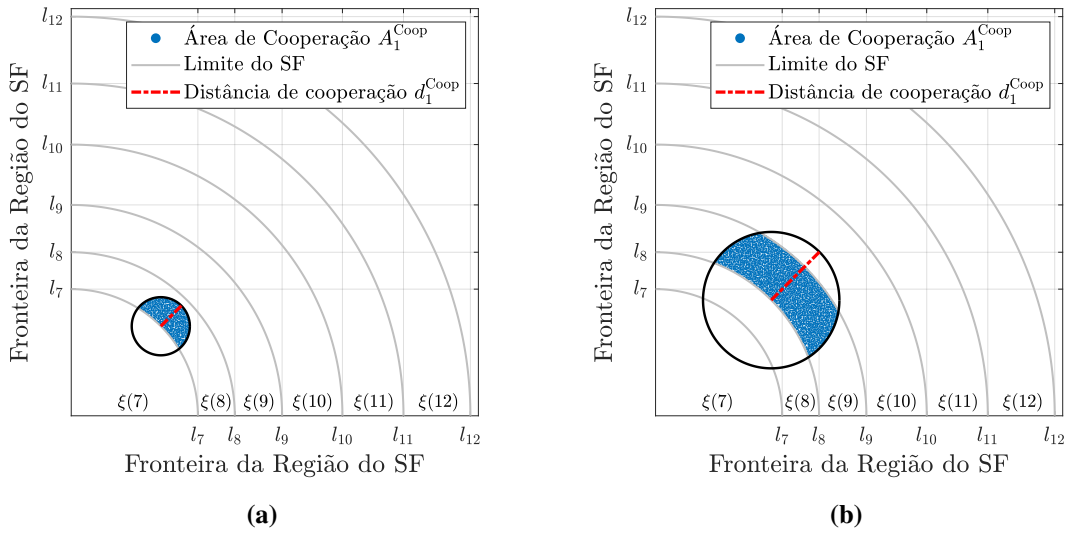
A probabilidade de que um ED encontre um parceiro para cooperar $\mathcal{P}_{\text{vizin}}^{\text{D2D}}$ depende da distância de cooperação e da área de cooperação. A distância de cooperação d_1^{Coop} é a distância máxima onde é possível estabelecer a comunicação D2D. Ela pode ser aferida como aquela em que as transmissões do ED₁ podem ser percebidas com uma potência média de recepção igual à sensibilidade de recepção, definida na documentação técnica. Considerando o modelo de perda de percurso apresentado na Seção 3.3.1, tem-se:

$$\begin{aligned} 10 \log_{10} g(d_1^{\text{Coop}}) &= S_{\text{D2D}}(\text{dBm}) - P_{\text{TX}}^{\text{D2D}}(\text{dBm}), \\ d_1^{\text{Coop}} &= \left(\frac{c}{4\pi f_c} \right)^{\frac{2}{\eta}} 10^{-\frac{S_{\text{D2D}} - P_{\text{TX}}^{\text{D2D}}}{10\eta}} \quad [\text{m}]. \end{aligned} \quad (18)$$

Como definido por Laneman *et al.* (2004), devido à natureza aleatória do canal sem fio, a cooperação, inclusive, pode ser benéfica quando a distância entre os EDs for maior que distância entre o GW e cada um dos parceiros. Portanto, NCC pode ser aplicado pelos EDs mais próximos do GW, com $S_F = 7$.

Para os parâmetros da modulação FSK $S_{\text{D2D}} = -82$ dBm, $P_{\text{TX}}^{\text{D2D}} = 13$ dBm (SEMTECH CORPORATION, 2019), e $f_c = 868$ MHz e $\eta = 2.7$ (GEORGIOU; RAZA, 2017), a distância de cooperação é de $d_1^{\text{Coop}} \approx 230$ m. Assume-se que os EDs cooperam apenas entre os que empregam o mesmo SF. Isso é feito para que se simplifique a formulação da probabilidade de *outage*. Assim, a área de cooperação A_1^{Coop} é obtida pela área da intersecção entre a região circular de raio d_1^{Coop} centrada no ED₁ e a região anular de aplicação do SF utilizada pelo mesmo ED. Essas regiões e A_1^{Coop} são exemplificadas na Figura 7.

Figura 7 – Exemplos da área de cooperação, definida pela intersecção de duas regiões, nos cenários de largura de SF (a) “maior que” e (b) “menor ou igual” a distância de cooperação.



Fonte: Autoria própria, adaptado de Alves *et al.* (2021).

Como a área de cooperação depende da distância do ED₁ ao GW d_1 , da distância de cooperação d_1^{Coop} e dos limites dos SFs l_{SF} , o processo de aferição de seu valor é de alta complexidade. A área de cooperação varia ponto-a-ponto segundo essas variáveis. Entretanto, seu valor para qualquer ponto pode ser obtido através de simulações computacionais. Como alternativa, pode-se obter uma aproximação para A_1^{Coop} ao se separar a análise em dois cenários de interação entre a largura da região do SF ξ (\mathcal{S}_F) e a distância de cooperação d_1^{Coop} .

No cenário em que a largura do SF é maior que a distância de cooperação, exemplificado na Figura 7(a), a área de cooperação pode ser aproximada por um semi-círculo de raio d_1^{Coop} :

$$A_{1a,\text{aprox}}^{\text{Coop}} = \frac{\pi}{2} (d_1^{\text{Coop}})^2 \quad [\text{m}^2]. \quad (19)$$

Note que a aproximação na Equação (19) perde qualidade quando o ED₁ se afasta das fronteiras do SF. Entretanto, considerando que esse cenário é irrelevante no processo de alocação de SFs, apresentado na Seção 3.3.2, a aproximação é útil na determinação do alcance da rede e das fronteiras dos SFs em geral.

Já na instância de $\xi(\mathcal{S}_F) \leq d_1^{\text{Coop}}$, aproxima-se a área de cooperação por um retângulo cujas dimensões são a largura do SF e o dobro da distância de cooperação:

$$A_{1b,\text{aprox}}^{\text{Coop}} = 2d_1^{\text{Coop}} \xi(\mathcal{S}_F) \quad [\text{m}^2]. \quad (20)$$

Diante das Equações (19) e (20), a área de cooperação A_1^{Coop} pode ser aproximada

através da aplicação da função de mínimo $\min\{\cdot\}$ de ambos os cenários:

$$A_{1,\text{approx}}^{\text{Coop}} = \min\left\{A_{1a,\text{aprox}}^{\text{Coop}}, A_{1b,\text{aprox}}^{\text{Coop}}\right\} = \min\left\{\frac{\pi}{2}(d_1^{\text{Coop}})^2, 2d_1^{\text{Coop}}\xi(\mathcal{S}_F)\right\} \quad [\text{m}^2], \quad (21)$$

A validade da aproximação da Equação (21) no contexto estudado neste trabalho é demonstrada na Seção 5.2 através da comparação com os valores obtidos por simulação computacional da probabilidade de cooperação. Enfim, define-se a probabilidade de vizinhança como a probabilidade de que pelo menos um ED esteja dentro da área de cooperação do ED₁, além dele mesmo. Isso pode ser calculado a partir da análise de um PPP estocástico apresentada por Daley e Vere-Jones (1998), que gera:

$$\mathcal{P}_{\text{neigh}}^{\text{D2D}} = 1 - \exp\left(-\rho A_1^{\text{Coop}}\right) \approx 1 - \exp\left(-\rho A_{1,\text{aprox}}^{\text{Coop}}\right). \quad (22)$$

Finalmente, a probabilidade de cooperação pode ser obtida do produto das probabilidades apresentadas nas Equações (17) e (22):

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_1^{\text{Coop}} &= \mathcal{P}_{\text{effective}}^{\text{D2D}} \mathcal{P}_{\text{neigh}}^{\text{D2D}} \\ &= (1 - \mathcal{O}_{\text{D2D}}) \left[1 - \exp\left(-\rho A_1^{\text{Coop}}\right)\right]. \end{aligned} \quad (23)$$

Note que a probabilidade de cooperação $\mathcal{P}_1^{\text{Coop}}$ depende não apenas de parâmetros da modulação adotada para efetivar a comunicação D2D, mas também de características do ED-GW. Os fatores do ED-GW que afetam essa probabilidade estão relacionados à topologia estrela da rede. Em específico, por ser considerado que a cooperação só pode ser estabelecida entre dispositivos que compartilham do mesmo SF, o desempenho da comunicação D2D no NCC-LoRa depende do procedimento de alocação de fronteiras dos SFs apresentado na Seção 3.3.2.

4.2 COMUNICAÇÃO COM O GATEWAY

O proposto NCC-LoRa permite que os EDs utilizem o conceito de NCC para melhorar a qualidade de comunicação no ED-GW após uma troca de pacotes de informação através da comunicação D2D, como descrito na Figura 6. Caso a etapa D2D falhe ou não haja dispositivos na vizinhança do ED₁, o ED sob NCC-LoRa passa a operar analogamente ao esquema RT-LoRa apresentado na Seção 3.5. Tal mudança pode ser implementada na prática pela substituição por zero dos coeficientes lineares da operação no campo finito $\text{GF}(q)$, operação discutida na Seção 3.6.1, na criação do pacote de paridade. Entretanto, é importante frisar que o número de transmissões no ED-GW permanece em $M = 2$ mesmo se houver falha na etapa D2D.

A partir dessas considerações, determina-se a probabilidade de *outage* do NCC-LoRa pelo complemento da probabilidade de cooperação da Equação (23):

$$\begin{aligned}\mathcal{O}_{\text{NCC-LoRa}} &= \mathcal{P}_1^{\text{Coop}} \mathcal{O}_{\text{NCC}} + (1 - \mathcal{P}_1^{\text{Coop}}) \mathcal{O}_{\text{RT-LoRa}} \\ &= \mathcal{O}_1^2 - \mathcal{P}_1^{\text{Coop}} (\mathcal{O}_1^2 + 2\mathcal{O}_1^2 \mathcal{O}_2^2 - 2\mathcal{O}_1^2 \mathcal{O}_2 - \mathcal{O}_1 \mathcal{O}_2^2),\end{aligned}\quad (24)$$

em que \mathcal{O}_1 e \mathcal{O}_2 são as probabilidades de *outage* para os dispositivos cooperantes (note que \mathcal{O}_2 pode ser obtido da Equação (13) pela substituição de $n = 1$ por $n = 2$, sem qualquer perda), $\mathcal{O}_{\text{RT-LoRa}}$ é a probabilidade de *outage* do esquema RT-LoRa da Seção 3.5, \mathcal{O}_{NCC} vem da Equação (16) e $\mathcal{P}_1^{\text{Coop}}$ é a probabilidade de cooperação definida matematicamente na Seção 4.1.1. Note que a Equação (24) pode ser aproximada no regime de alta SNR, ou quando os EDs estão aproximadamente à mesma distância do GW $d_1 \approx d_2$, ao considerar $\mathcal{O}_1 \approx \mathcal{O}_2$, de forma que:

$$\mathcal{O}_{\text{NCC-LoRa}} \approx \mathcal{O}_1^2 - \mathcal{P}_1^{\text{Coop}} (\mathcal{O}_1^2 - 3\mathcal{O}_1^3 + 2\mathcal{O}_1^4). \quad (25)$$

Portanto, a ordem de diversidade de recepção do esquema NCC-LoRa varia entre dois e três de acordo com a probabilidade de cooperação, obtidas conforme a diversidade percebida nos modos RT-LoRa e NCC, respectivamente. Também observa-se da Equação (24) que quanto menor for a probabilidade de se estabelecer cooperação, mais próximo tende o desempenho do NCC-LoRa ao do RT-LoRa.

É importante destacar que o GW realiza tentativas de decodificação independentes em todos os pacotes recebidos \mathbf{r} nas etapas envolvendo o ED-GW: BP (s_1 e s_2) e CP ($p_1 = s_1 \boxplus s_2$ e $p_2 = s_1 \boxplus 2 \boxtimes s_2$). Cada pacote de informação e de paridade passa pelos procedimentos usuais de decodificação LoRa após os sinais serem adequadamente tratados de acordo com o seu SF. Em seguida, o GW comunica ao NS o conteúdo contido nas transmissões através de um enlace baseado em IP, que pode obter as mensagens dos EDs cooperantes ED_1 e ED_2 de quaisquer dois pacotes em \mathbf{r} .

Sendo assim, a implementação de um protocolo NCC-LoRa tal como descrito na Figura 6 seguiria todos os parâmetros e definições usuais de transmissão por LoRa. Seriam necessários apenas a adição dos procedimentos referentes à codificação de rede, além do estabelecimento prévio de um mecanismo de descoberta de vizinhos. Esse último poderia ser efetivado através de um protocolo semelhante ao BLE NDP, do inglês *Bluetooth Low Energy Neighbor Discovery Protocol* (BLE NDP), discutido por Luo *et al.* (2021).

Destaca-se também que a implementação de NCC-LoRa requiriria aumentar o nível de *overhead* da rede. O *overhead* pode ser definido como o conjunto de procedimentos, transmissões

e dados a serem trocados antes da efetiva comunicação da mensagem primária. É possível argumentar, porém, que o aumento de *overhead* não é significativo. Os EDs podem simplesmente adicionar um bit informando ao GW se aquela transmissão se trata de um pacote de informação (BP) ou de paridade (CP). Uma outra sequência curta de bits poderia identificar com qual ED o ED₁ estaria cooperando para que o processo de recuperação das mensagens de *r* pudesse ser feito adequadamente.

Os coeficientes de codificação utilizados na combinação linear dos pacotes de informação não precisariam ser informados ao GW, visto que Rebelatto *et al.* (2012) argumenta que os coeficientes são comumente fixos e previamente estabelecidos e armazenados nos entes da rede. Entretanto, os EDs precisariam ter uma capacidade maior de armazenamento de informações para execução do protocolo NCC-LoRa aqui discutido. Seria necessário acumular tanto mais um pacote contendo a mensagem do ED parceiro, quanto os mecanismos necessários para a efetivação das combinações presentes no modo NCC (coeficientes lineares e programação mais extensa do *firmware*).

Como já discutido brevemente na Seção 4.1, as transmissões da etapa D2D requerem um ToA muito menor que as transmissões nas etapas BP e CP (a etapa D2D ocupa menos de 0.6% do ToA total no protocolo NCC-LoRa). Portanto, o efeito dessa etapa no DC pode ser desprezado sem grandes prejuízos à correta modelagem do desempenho do sistema. Não obstante, por utilizar $M = 2$ transmissões em um ciclo de duração restrita pelo limite de 1% no DC, verifica-se uma redução na probabilidade de captura da Equação (11), o que afeta o desempenho dos esquemas NCC-LoRa e RT-LoRa.

4.3 MODELO DE CONSUMO ENERGÉTICO

Em um cenário de alta densidade de rede, espera-se que a maior probabilidade de cooperação leve mais EDs a utilização do modo NCC do protocolo NCC-LoRa, ao invés do modo RT-LoRa. Apesar disso levar a uma maior ordem de diversidade de recepção, espera-se que haja um maior consumo energético. Isso se dá em razão da necessidade da troca das mensagens através da etapa D2D, como estabelecido na Figura 6(a).

Dada a importância de se manter um nível baixo de consumo em LoRaWANs, torna-se fundamental analisar como a necessidade de uma transmissão adicional afeta o consumo total do esquema NCC-LoRa discutido neste trabalho. Nos próximos parágrafos, discorre-se de maneira detalhada a respeito da métrica de avaliação do consumo energético. Serão apresentados modelos

Tabela 3 – Estados de operação do SX1272 da Semtech Corporation e seus consumos energéticos.

Índice do Estado i	Descrição	Duração T_i	Consumo de Corrente I_i
1	<i>Sleep</i>	Equação (27)	100 nA
2	<i>Standby</i>	250 ms	1.5 mA
3	Síntese de frequência de transmissão	60 ms	4.5 mA
4	Transmissão	Equação (1)	22 mA ($P_{TX} = 0$ dBm) 32 mA ($P_{TX} = 11$ dBm)

Fonte: Adaptado de (SEMTECH CORPORATION, 2019).

para os esquemas NCC-LoRa, RT-LoRa e o que se convencionou denominar LoRa convencional, que é uma única transmissão a partir da modulação LoRa seguindo os mecanismos discutidos no modelo do sistema apresentado na Seção 3.3.

Adota-se neste trabalho a métrica de consumo utilizada por Casals *et al.* (2017) e Sant’Ana *et al.* (2020a), onde avalia-se a corrente média por ciclo de transmissão. Os valores de duração e corrente de cada modo de operação do *transceiver* SX1272 desenvolvido pela empresa Semtech Corporation para transmissões LoRa foram extraídos das Tabelas 6, 7 e 10 da documentação técnica (SEMTECH CORPORATION, 2019) e transcritos aqui na Tabela 3.

Modela-se o consumo dos esquemas avaliados, afim de produzir um menor consumo energético, de forma que as M transmissões de cada ED ocorrem consecutivamente e dentro do mesmo intervalo de transmissão. Dessa forma, minimiza-se a passagem desnecessária por estados de operação do *transceiver* não relacionados diretamente com a transmissão. Destaca-se novamente que NCC-LoRa e RT-LoRa experimentam $M = 2$, enquanto que o LoRa convencional opera com $M = 1$. Consequentemente, é possível obter a corrente média por ciclo de transmissão a partir das durações T_i e corrente consumida I_i em cada estado de operação por (SANT’ANA *et al.*, 2020a):

$$I_{\text{avg}}(M) = \frac{1}{T_{\text{slot}}} \left[MT_4 I_4 + \sum_{i=1}^3 T_i I_i \right] \quad [\text{A}], \quad (26)$$

Calcula-se, portanto, a corrente média de cada esquema aplicando os valores relevantes na Equação (26). Destaca-se também que a duração do período de “*Sleep*” ($i = 1$ na Tabela 3) é obtido por (SANT’ANA *et al.*, 2020a):

$$T_1 = T_{\text{slot}} - MT_4 - \sum_{i=1}^3 T_i \quad [\text{s}]. \quad (27)$$

A seguir define-se o modelo de consumo para cada esquema avaliado.

4.3.1 Esquemas LoRa Convencional e RT-LoRa

No LoRa convencional, há apenas uma transmissão por ciclo de transmissão. Note, entretanto, que, como a duração do ciclo de transmissão é fixo e compartilhado por todos os esquemas avaliados, o DC efetivo experimentado no esquema LoRa convencional é metade daquele observado no NCC-LoRa e RT-LoRa. Enfim, é possível calcular a corrente média aplicando $M = 1$ nas Equações (26) e (27).

Considera-se que o esquema RT-LoRa opera, genericamente, com M transmissões em um ciclo de transmissão. Logo, seu consumo energético é modelado por:

$$I_{\text{avg}}^{\text{RT-LoRa}} = I_{\text{avg}}(M) \quad [\text{A}]. \quad (28)$$

em que $I_{\text{avg}}(M)$ vem da Equação (26). No contexto deste trabalho, visando manter uma comparação justa com o NCC-LoRa discutido nas páginas anteriores deste capítulo, o esquema RT-LoRa opera com $M = 2$.

4.3.2 Esquema NCC-LoRa

No ED-GW, o esquema NCC-LoRa produz o mesmo consumo energético que o RT-LoRa da Equação (28). Entretanto, a etapa D2D deve ser considerada em seu modelo de consumo. É importante notar, entretanto, que o *transceiver* SX1272 não utiliza exatamente os mesmos circuitos internos para efetivar comunicação através das modulações LoRa e FSK.

Já que a etapa D2D envolve a troca mútua de dados, modela-se seu consumo de forma que o *transceiver* realiza uma transmissão e uma recepção. A duração dos estados de operação com a modulação FSK varia conforme uma gama de parâmetros. Entre eles estão: a potência de transmissão $P_{\text{TX}}^{\text{D2D}}$, a taxa de transmissão de bits R_{D2D} , a largura da banda B_{D2D} e o denominado período de *ramp up* de transmissão. Os valores adotados por este trabalho estão disponíveis na Tabela 4, cujos dados foram extraídos das Tabelas 6 e 7 da documentação técnica do *transceiver* considerado (SEMTECH CORPORATION, 2019).

Enfim, modela-se o consumo da transmissão com modulação FSK por:

$$I_{\text{avg}}^{\text{D2D}} = \frac{1}{T_{\text{slot}}} \sum_{i=1}^6 T_i^{\text{FSK}} I_i^{\text{FSK}} \quad [\text{A}], \quad (29)$$

onde os valores de duração T_i^{FSK} e corrente I_i^{fsk} estão na Tabela 4. Finalmente, a corrente média

Tabela 4 – Consumo da modulação FSK no *transceiver* SX1272 da Semtech Corporation para uma potência de transmissão de 13 dBm, pacote de tamanho 120 bits, taxa de transmissão de 250 kbps, com uma largura banda de 250 kHz e um período de *ramp up* de transmissão de 10 μ s.

Índice do Estado i	Descrição	Duração T_i^{FSK}	Consumo de Corrente I_i^{FSK}
1	<i>Sleep</i>	$T_{\text{slot}} - \sum_{i=2}^6 T_i^{\text{FSK}}$ [s]	100 nA
2	<i>Standby</i>	250 μ s	1.5 mA
3	Síntese de frequência de transmissão	60 μ s	4.5 mA
4	Transmissão	499.5 μ s	28 mA
5	Mudança de transmissão para recepção	50 μ s	4.5 mA
6	Recepção	543 μ s	11.2 mA

Fonte: Adaptado de (SEMTECH CORPORATION, 2019).

de transmissão do esquema NCC-LoRa pode ser aferida por:

$$\begin{aligned}
 I_{\text{avg}}^{\text{NCC-LoRa}} &= \mathcal{P}_{\text{neigh}}^{\text{D2D}} \left[I_{\text{avg}}^{\text{D2D}} + I_{\text{avg}}(2) \right] + \left[1 - \mathcal{P}_{\text{neigh}}^{\text{D2D}} \right] I_{\text{avg}}(2) \\
 &= I_{\text{avg}}(2) + \underbrace{\mathcal{P}_{\text{neigh}}^{\text{D2D}} I_{\text{avg}}^{\text{D2D}}}_{\mathcal{I}} \quad [\text{A}],
 \end{aligned} \tag{30}$$

em que \mathcal{I} indica o consumo adicional do NCC-LoRa em relação ao consumo do RT-LoRa equivalente. Note que, de fato, quanto maior a probabilidade de vizinhança, da Equação (22), que, conseqüentemente, aumenta também a probabilidade de cooperação da Equação (23), maior será o consumo do esquema NCC-LoRa. Portanto, há um *trade-off* entre o consumo e o desempenho em termos de *outage* que é inerente ao protocolo proposto.

4.4 COMENTÁRIOS

Este capítulo tratou de introduzir o esquema cooperativo com codificação de rede e comunicação D2D para redes LoRa denominado NCC-LoRa. De início, foi estabelecido o motivo para se incluir uma etapa D2D adicional ao procedimento convencional de NCC: o consumo de recepção da troca de pacotes de informação esperado para dispositivos mais distantes do GW, que utilizam SF maiores, seria muito alto, potencialmente inviabilizando a adoção do NCC.

Modelou-se, então, a probabilidade de sucesso na comunicação D2D, determinada através da probabilidade de cooperação. Para tanto, foi considerado que ela é uma função das probabilidades de comunicação D2D efetiva e de vizinhança. Essa última foi aproximada através da análise de dois cenários da relação entre a largura do SF utilizado pelo ED e sua distância de cooperação, calculada a partir do modelo de perda de percurso, da sensibilidade do receptor e da potência de transmissão.

A probabilidade de *outage* do esquema NCC-LoRa foi então definida a partir da consideração que os dispositivos poderiam recair ao esquema RT-LoRa equivalente, com duas

transmissões, caso a etapa D2D falhasse. Apresentou-se, em seguida, uma breve discussão a respeito dos processos adicionais requeridos para a implementação de um protocolo baseado em NCC-LoRa. Foi argumentado que o acréscimo no *overhead* da rede poderia ser desprezado em razão do pequeno número de alterações requeridas para efetivar a NCC, porém destacou-se também que há, sim, a necessidade de existir maior capacidade de armazenamento nos EDs.

A partir de dados extraídos da documentação técnica do *transceiver* SX1272 da Semtech Corporation (SEMTECH CORPORATION, 2019), foi apresentado o modelo de consumo energético considerado neste trabalho. Caracterizou-se a corrente média por ciclo de transmissão dos esquemas LoRa convencional e RT-LoRa a partir de dados referentes à modulação LoRa. Ao NCC-LoRa, porém, adicionou-se também o consumo provocado pela etapa D2D adicional envolvida no protocolo. Salientou-se, por fim, que, apesar do consumo do NCC-LoRa ser maior que o do RT-LoRa, há uma melhora na confiabilidade das transmissões.

Esse *trade-off* entre desempenho e consumo, porém, pode ser contornado através do modelo de alocação de SF discutido na Seção 3.3.2. Isso porque é possível esperar que os EDs utilizando NCC-LoRa consigam manter SFs menores que os que empregam RT-LoRa por distâncias maiores em relação ao GW. No próximo capítulo, essa relação é avaliada detalhadamente por simulações computacionais. Então, será possível concluir se há um lucro a ser obtido pela adoção do NCC-LoRa.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Detalha-se neste capítulo os resultados de simulações computacionais e da análise dos modelos de probabilidade de *outage* dos esquemas NCC-LoRa, apresentado no Capítulo 4, e RT-LoRa e LoRa convencional (que representa uma única transmissão em LoRaWAN) revelados no Capítulo 3. Em seguida avalia-se esses esquemas quanto ao seu consumo energético. Discute-se, por fim, as consequências e implicações dos resultados apresentados.

5.1 CONSIDERAÇÕES DE SIMULAÇÃO

Adota-se neste trabalho o método Monte Carlo para aferir o desempenho dos esquemas avaliados. Nesse método, realiza-se múltiplas instâncias independentes e estocásticas de simulação computacional, sendo o resultado final extraído da média dos valores de cada rodada. O número de amostras de resultados de simulação adotado neste capítulo é de 10^6 para cada variável aleatória. Exceto se explicitamente mencionado, adota-se os parâmetros de rede descritos na Tabela 5. Além disso, convencionou-se usar “(an)” e “(sim)” para se referir aos resultados obtidos através dos modelos analíticos e via simulação computacional, respectivamente.

Da Tabela 8 da documentação técnica (SEMTECH CORPORATION, 2019), o *transceiver* SX1272 da Semtech Corporation gera uma Taxa de Erro de Bits, do inglês *Bit Error Rate* (BER), de 0.1% para $B_{D2D} = 250$ kHz e $S_{D2D} = -92$ dBm. Dessa forma, adotando um modelo pessimista para a probabilidade de *outage* tal que se apenas um bit da mensagem de $N_b = 120$ bits sofrer erro de decodificação, tem-se $\mathcal{O}_{D2D} = 1 - [1 - \text{BER}]^{N_b} \approx 11.3\%$. O valor de $N_b = 120$ bits vem de um *payload* de $PL = 9$ bytes e outros 6 bytes referentes à formatação de pacote de tamanho fixo, apresentado na documentação técnica (SEMTECH CORPORATION, 2019). Neste trabalho, porém, considera-se, seguindo a curva de BER da modulação, do inglês, *Binary Frequency-Shift Keying* (BFSK) (GOLDSMITH, 2005), uma adição de 10 dB à sensibilidade do receptor, de forma que $S_{D2D} = -92 + 10 = -82$ dBm, resultando em uma BER de aproximadamente 10^{-4} , que leva à probabilidade de efetiva comunicação no laço D2D de $\mathcal{O}_{D2D} \approx 1.2\%$. Adota-se outro pior cenário para o NCC-LoRa: a distância entre os parceiros de cooperação é sempre a maior possível, ou $d_2 = \min \left\{ d_1 + d_1^{\text{Coop}}, l_{SF} \right\}$.

Por fim, limita-se a potência de transmissão P_{TX} para 11 dBm para ficar em concordância com as referências que avaliam o consumo energético de plataformas baseadas no *transceiver*

Tabela 5 – Parâmetros de simulação do sistema.

Parâmetro	Variável	Valor	Referência Bibliográfica
Máximo Ciclo de Trabalho		1%	(SANT'ANA <i>et al.</i> , 2020a)
Taxa de Codificação	CR	1	(GEORGIU; RAZA, 2017)
Tamanho do <i>payload</i>	PL	9 bytes	(HOELLER <i>et al.</i> , 2018)
Largura de banda do ED-GW	B	125 kHz	(CASALS <i>et al.</i> , 2017)
Largura de banda do laço D2D	B_{D2D}	250 kHz	
Coefficiente de perda de percurso	η	2.7	(GEORGIU; RAZA, 2017)
Frequência de portadora	f_c	868 MHz	(HOELLER <i>et al.</i> , 2018)
Potência de transmissão (LoRa e RT-LoRa)	P_{TX}	11 dBm	(CASALS <i>et al.</i> , 2017)
Potência de transmissão (NCC-LoRa)	P_{TX}^{D2D}	{0, 11} dBm	
Potência de transmissão (D2D)	P_{TX}^{D2D}	13 dBm	(SEMTECH CORPORATION, 2019)
Figura de ruído	NF	6 dB	(HOELLER <i>et al.</i> , 2018)
SIR mínima de recepção	δ	6 dB	(HOELLER <i>et al.</i> , 2018)
Sensibilidade de recepção (FSK)	S_{D2D}	-82 dBm	(SEMTECH CORPORATION, 2019)
Probabilidade de <i>outage</i> no link D2D	\mathcal{O}_{D2D}	1.2%	
Número de transmissões por ciclo	M	2	

Fonte: Autoria própria, adaptado de Alves *et al.* (2021).

SX1272 considerado neste trabalho (CASALS *et al.*, 2017; SANT'ANA *et al.*, 2020a). A despeito disso, o uso de $P_{TX} \geq 11$ dBm foi testado, não sendo averiguado quaisquer alterações significativas que justifiquem mudanças na análise e conclusões extraídas dos resultados retratados nos próximos parágrafos.

5.2 ALCANCE DA REDE

São apresentados nesta seção os resultados referentes ao desempenho de *outage* dos esquemas avaliados, que em última instância ditam o alcance da rede \mathcal{R} conforme o procedimento de alocação de SFs explicitado na Seção 3.3.2. As Tabelas 6 e 7 sumarizam e aproximam os resultados obtidos.

Tabela 6 – Aproximação dos resultados de alcance de rede para $\mathcal{O}_{alvo} = 10^{-2}$.

Densidade da rede (EDs/m ²)	LoRa Convencional (m)	RT-LoRa (m)	NCC-LoRa (m)
10^{-4}	433	993	1239
10^{-3}	138	316	398

Fonte: Autoria própria.

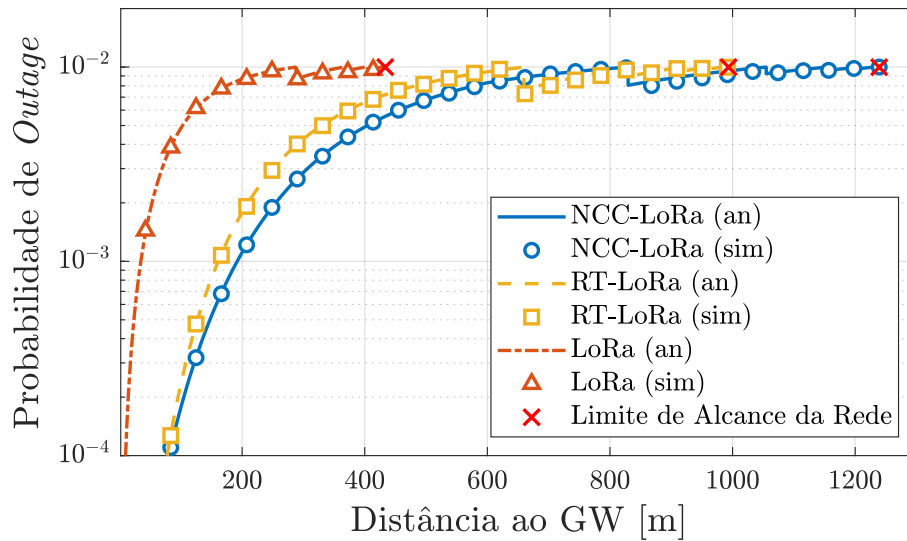
Tabela 7 – Aproximação dos resultados de alcance de rede para $\mathcal{O}_{alvo} = 10^{-3}$.

Densidade da rede (EDs/m ²)	LoRa Convencional (m)	RT-LoRa (m)	NCC-LoRa (m)
10^{-4}	137	550	794
10^{-3}	43	175	269

Fonte: Autoria própria.

As Figuras 8 e 12 exibem a probabilidade de *outage* para os casos de densidade de rede $\rho = \{10^{-4}, 10^{-3}\}$ EDs/m², nessa ordem. Na Figura 8, o cenário menos denso é avaliado.

Figura 8 – Resultado da probabilidade de *outage* para $\rho = 10^{-4}$ EDs/m² e $\mathcal{O}_{\text{alvo}} = 10^{-2}$.



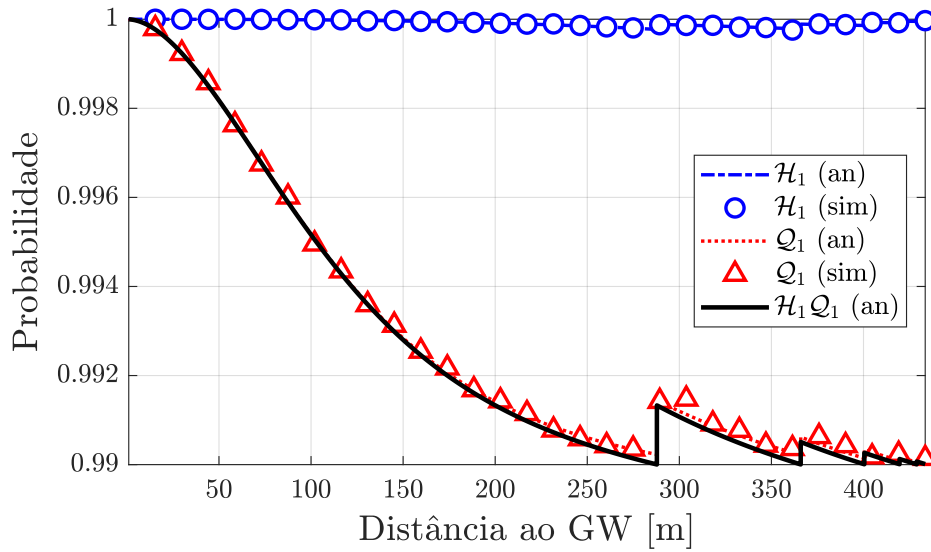
Fonte: Autoria própria.

Nota-se, de início, que ambos os esquemas RT-LoRa e NCC-LoRa permitiram alcances de rede \mathcal{R} muito maiores que o verificado com LoRa convencional. Isso ocorreu em razão da grande vulnerabilidade de transmissões convencionais em LoRaWAN à interferência de outros dispositivos (colisões), pela utilização de um múltiplo acesso baseado em ALOHA puro (HOELLER *et al.*, 2018). Como pode ser observado na Figura 9, houve uma predominância no efeito das colisões no desempenho do sistema, medido pela probabilidade de captura \mathcal{Q}_1 da Equação (11). Essa situação era esperada, tendo em vista o objetivo de avaliar um esquema que melhore o desempenho em redes LoRa com alta densidade.

O ganho de alcance de rede gerado pelo uso do RT-LoRa de Hoeller *et al.* (2018) foi de 129% em relação ao LoRa convencional. Entretanto, o NCC-LoRa promoveu melhora ainda maior, com um alcance da rede quase 25% acima do verificado com o RT-LoRa. Isso indica, portanto, que, dentre os esquemas avaliados, o NCC-LoRa gerou a maior proteção contra os efeitos das colisões. Notou-se, porém, distâncias d_1 em que o RT-LoRa obteve uma probabilidade de *outage* menor que o NCC-LoRa. Todavia, o intuito do projeto da rede é que se mantenha uma qualidade de serviço mínima ao menor SF possível, sendo a probabilidade de *outage* exata a um d_1 qualquer irrelevante para o propósito avaliado.

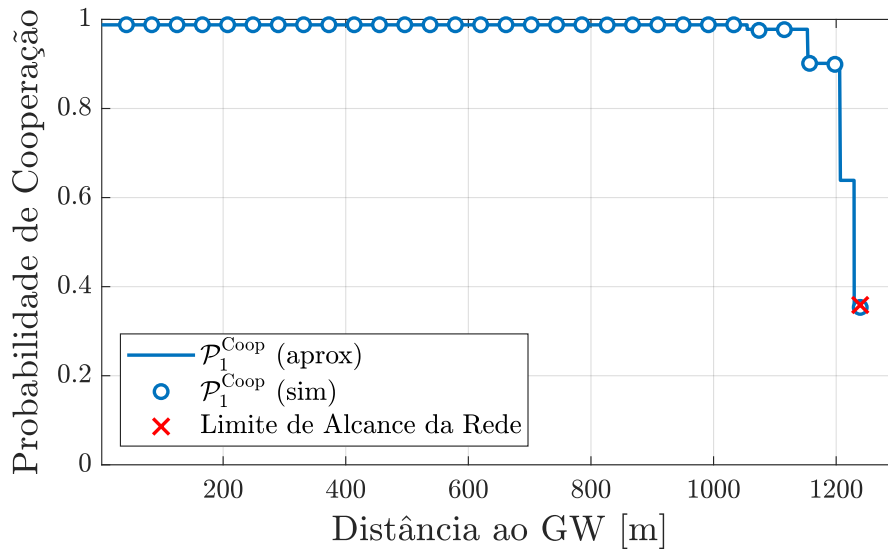
Também, diante do cenário apresentado na Figura 10, raramente houve necessidade dos EDs sob o esquema NCC-LoRa utilizarem o modo RT-LoRa, podendo eles usufruírem do ganho de diversidade promovido pelo modo NCC. Novamente, isso pode ser interpretado como um produto da relativamente alta densidade da rede sendo considerada. Porém, observa-se

Figura 9 – Probabilidades de captura e conexão para $\rho = 10^{-4}$ EDs/m² e $\mathcal{O}_{\text{alvo}} = 10^{-2}$.



Fonte: Autoria própria.

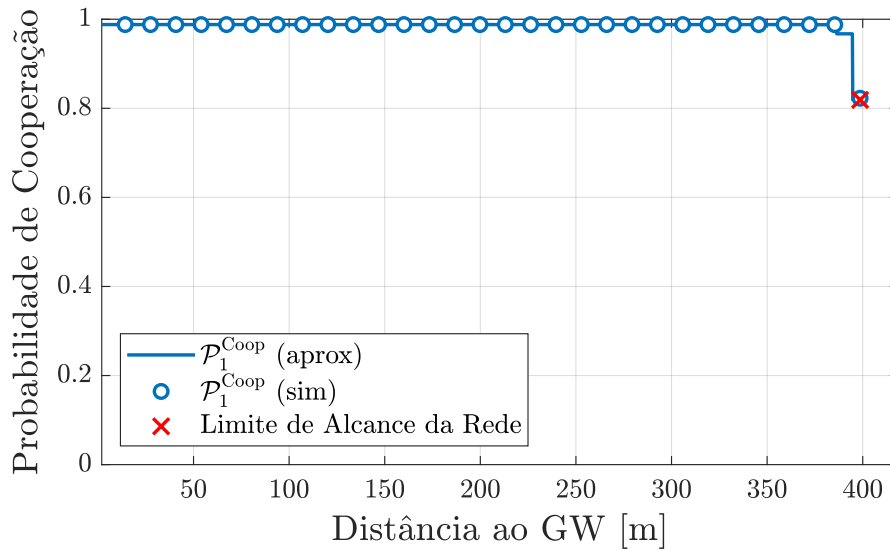
Figura 10 – Resultado da probabilidade de cooperação para $\rho = 10^{-4}$ EDs/m² e $\mathcal{O}_{\text{alvo}} = 10^{-2}$.



Fonte: Autoria própria.

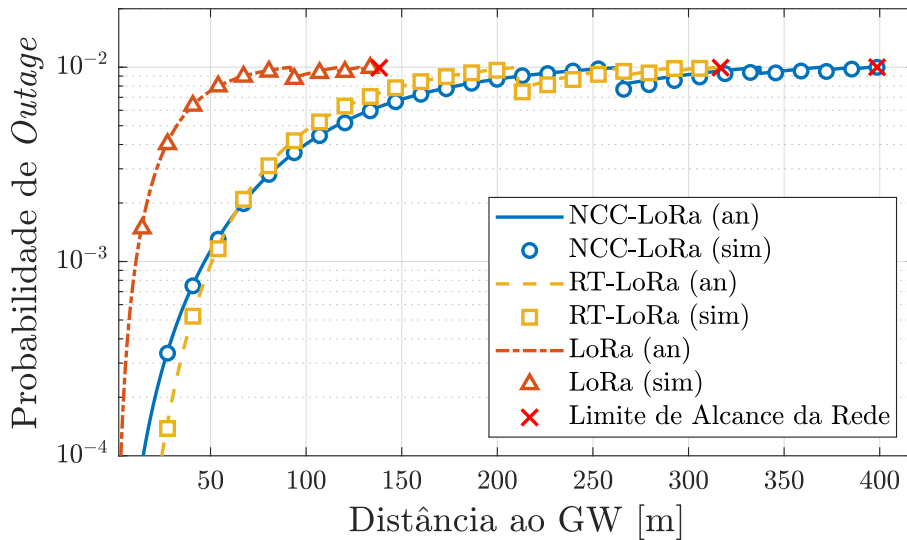
da Figura 10 que os EDs tiveram maior dificuldade de cooperar quanto mais próximos estivessem do limite da rede $\mathcal{R} = l_{\mathcal{S}_F}$. Extrapolava-se que esse comportamento foi verificado devido à decrescente largura de SF experimentada nos SFs maiores. Verificou-se nas simulações que $\xi(\mathcal{S}_F) < 100$ m para $\mathcal{S}_F \geq 9$. Isso reduziu a área de cooperação quando $\mathcal{S}_F \geq 9$, afetando, conseqüentemente, a probabilidade de cooperação. Ao ser aumentada a densidade da rede para $\rho = 10^{-3}$ EDs/m², com resultados na Figura 11, observou-se uma menor redução da P_1^{Coop} nos limites da rede, corroborando a explicação anterior. Outra conclusão possível das Figuras 10 e 11

Figura 11 – Resultado da probabilidade de cooperação para $\rho = 10^{-4}$ EDs/m² e $\mathcal{O}_{\text{alvo}} = 10^{-3}$.



Fonte: Autoria própria.

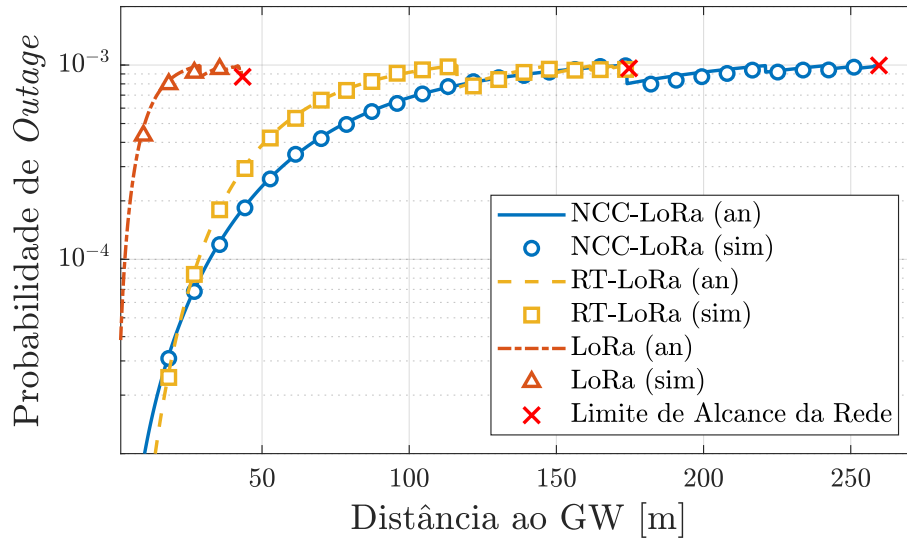
Figura 12 – Resultado da probabilidade de outage para $\rho = 10^{-3}$ EDs/m² e $\mathcal{O}_{\text{alvo}} = 10^{-2}$.



Fonte: Autoria própria.

é que a aproximação da área de cooperação apresentada na Equação (21) produziu resultados, exibidos nas Figuras 10 e 11 pelas curvas com a indicação “(aprox)”, que são adequados para os cenários analisados. Frisa-se novamente, porém, que $A_{1,\text{aprox}}^{\text{Coop}}$ perde precisão fora dos limites dos SFs e quando $\xi(\mathcal{S}_F) \gg d_1^{\text{Coop}}$. Com a densidade maior de dispositivos, apesar de todos os esquemas terem experimentado uma redução significativa no alcance da rede \mathcal{R} , como clarificado pela Figura 12, verificou-se um ganho de aproximadamente 26% do NCC-LoRa sobre o RT-LoRa, ligeiramente maior que no cenário anterior.

Figura 13 – Resultado da probabilidade de *outage* para $\rho = 10^{-3}$ EDs/m² e $\mathcal{O}_{\text{alvo}} = 10^{-3}$.



Fonte: Autoria própria.

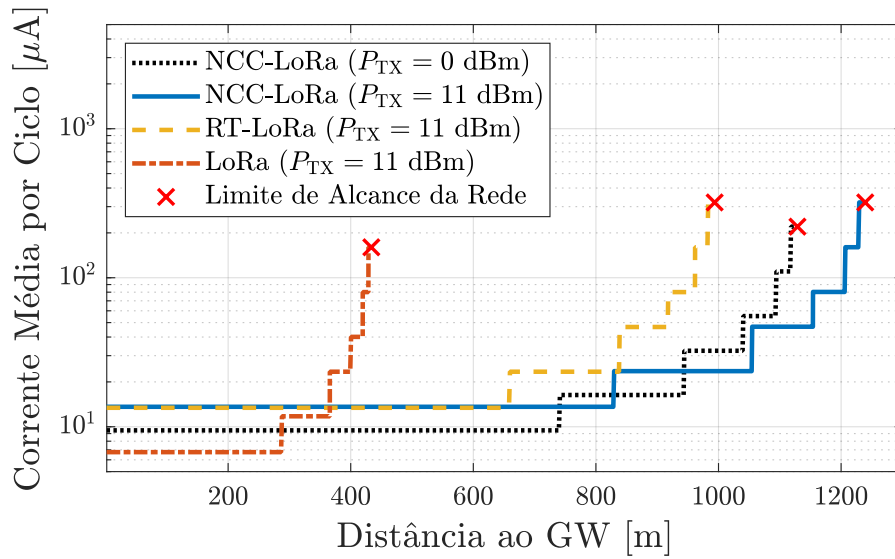
Devido à maior diversidade de recepção observada no esquema NCC-LoRa, o ganho no alcance de rede sobre o RT-LoRa aumentou para aproximadamente 53% ao considerar um cenário de probabilidade de *outage* alvo mais rigoroso, onde $\mathcal{O}_{\text{alvo}} = 10^{-3}$ com $\rho = 10^{-3}$ EDs/m². Como pode ser observado na Figura 13, o NCC-LoRa possibilitou, ainda, que a rede atingisse um alcance mais de 5 vezes maior que o LoRa convencional.

5.3 DESEMPENHO ENERGÉTICO

Esta seção trata da avaliação do desempenho dos esquemas NCC-LoRa, RT-LoRa e LoRa convencional no quesito do consumo energético. A avaliação é feita via análise matemática do modelo de corrente média por ciclo de transmissão apresentado na Seção 4.3. Os valores obtidos estão dispostos nas Figuras 14 e 15 para cenários diferentes de probabilidade de *outage* alvo e densidade da rede. Destaca-se novamente a importância do método de alocação de SFs adotado neste trabalho (vide a Seção 3.3.2) para a determinação do desempenho energético de cada esquema. Através dele, garante-se que o menor SF possível possa ser utilizado para transmitir confiavelmente, dada uma probabilidade de *outage* alvo. Assim, é possível reduzir o consumo de todos os esquemas ao mínimo.

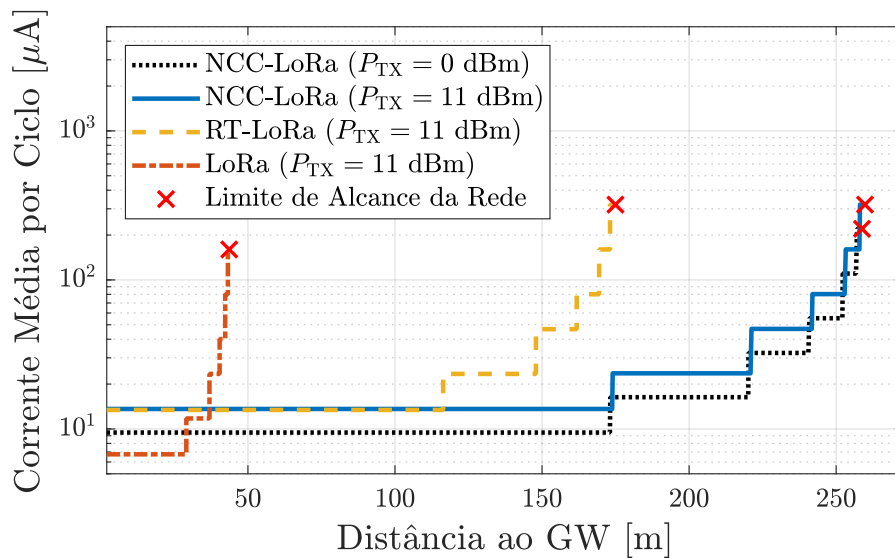
A Figura 14 mostra que, para um dado SF e a mesma potência de transmissão $P = 11$ dBm, o esquema LoRa convencional produziu o menor consumo energético. Isso ocorreu pois o esquema realiza apenas uma transmissão no ED-GW. Concomitantemente, o NCC-LoRa

Figura 14 – Resultado do consumo médio de corrente elétrica para $\rho = 10^{-4}$ EDs/m² e $\mathcal{O}_{\text{alvo}} = 10^{-2}$.



Fonte: Autoria própria.

Figura 15 – Resultado do consumo médio de corrente elétrica para $\rho = 10^{-3}$ EDs/m² e $\mathcal{O}_{\text{alvo}} = 10^{-3}$.



Fonte: Autoria própria.

apresentou o maior consumo. A adição de uma etapa D2D inevitavelmente gerou uma maior corrente média por ciclo de transmissão quando compara-se o consumo por SF.

É importante evidenciar, entretanto, que a rede com NCC-LoRa pôde estender os limites dos menores SFs para distâncias muito maiores que as que puderam ser obtidas com os outros esquemas. Como o consumo energético sobe exponencialmente com o aumento de SFs, essa característica proporcionou uma ampla região onde o NCC-LoRa manteve um consumo energético menor até que o obtido com LoRa convencional. Isso pode ser observado na Figura 14

para $d_1 > 660$ m, a partir de onde o NCC-LoRa tornou-se o esquema mais eficiente.

Também percebe-se da Figura 14 uma alternativa possível para que o NCC-LoRa consuma menos energia que o RT-LoRa a um mesmo SF: diminuir a potência de transmissão P_{TX} . No caso, foi testada essa hipótese ao configurar o esquema NCC-LoRa para utilizar $P_{TX} = 0$ dBm. Ainda assim, a rede com NCC-LoRa obteve um alcance maior que o daquela com RT-LoRa. Há, porém, uma perda de 8.92% em \mathcal{R} em relação ao cenário-base com $P_{TX} = 11$ dBm. A relativamente pequena perda de alcance de rede ocorre, novamente, em decorrência da predominância do efeito de colisões na probabilidade de *outage* do esquema (vide a Figura 9). Como a probabilidade de captura tem maior impacto no desempenho do esquema, a redução da P_{TX} , cujo efeito mede-se apenas na probabilidade de conexão da Equação (9), tem consequências diminutas no alcance da rede. Essa conclusão pode ser observada de maneira ainda mais clara na Figura 15, onde aumentou-se a densidade da rede para $\rho = 10^{-3}$ EDs/m² e aplicou-se uma probabilidade de *outage* alvo de $\mathcal{O}_{alvo} = 10^{-3}$. A perda de alcance da curva de $P_{TX} = 0$ dBm para a de $P_{TX} = 11$ dBm, nessa situação, foi menor que 1%.

Pode-se observar, ainda da Figura 14, que existiram intervalos de distância ao GW em que o NCC-LoRa com $P_{TX} = 11$ dBm teve maior eficiência energética que o com $P_{TX} = 0$ dBm. Entre $741 \leq d_1 \leq 830$ m, por exemplo, o NCC-LoRa com maior potência de transmissão estendeu o $S_F = 7$ e manteve uma corrente média por ciclo de transmissão inferior ao com potência mais baixa.

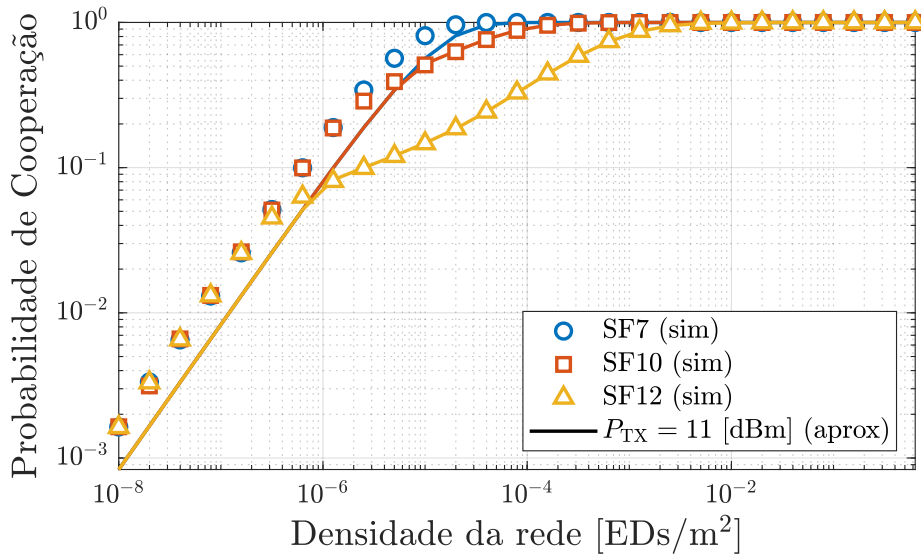
5.4 COMENTÁRIOS

Neste capítulo foram apresentados os resultados de simulação computacional dos esquemas NCC-LoRa, RT-LoRa e LoRa convencional. Foram analisados esses esquemas quanto seus desempenhos de *outage*, aferido através de comparações entre os alcances das redes, e energético.

Quanto à análise do alcance da rede, foi possível observar que o NCC-LoRa superou o desempenho de ambos RT-LoRa e LoRa convencional. Examinando os resultados, averiguou-se que o esquema proposto proporciona maior imunidade ao efeito de colisões que os demais.

Notou-se, também, que, nas condições de alta densidade de rede consideradas, houveram poucas instâncias em que os EDs sob o protocolo NCC-LoRa tiveram de recorrer ao modo RT-LoRa. Isso se deu em razão da alta probabilidade de cooperação em grande parte da extensão da rede. Os EDs mais próximos do alcance máximo da rede, entretanto, foram os que

Figura 16 – Variação da probabilidade de cooperação em função da densidade da rede ρ para $\mathcal{O}_{\text{alvo}} = 10^{-2}$ e $P_{\text{TX}} = 11$ dBm.



Fonte: Autoria própria.

experimentaram maior dificuldade para encontrar parceiros de cooperação, em razão da baixa largura da região de SFs mais altos. Dado que esse efeito pôde ser combatido com um aumento na densidade da rede, convém analisar o comportamento da probabilidade de cooperação em função da densidade da rede.

Como explicitado na Figura 16, a probabilidade de cooperação não varia uniformemente entre os SFs. Há, porém, um limite de densidade de rede em que todos os dispositivos tendem a utilizar o modo NCC. Da Figura 16, esse limite se deu, aproximadamente, em $\rho = 10^{-3}$ EDs/m², para o conjunto de parâmetros da Tabela 5. Apesar de experimentar quedas intensas no valor absoluto de alcance da rede, o NCC-LoRa tende a produzir uma maior diversidade de recepção a altas densidades, melhorando seu desempenho em relação ao RT-LoRa. Isso foi também ratificado na discussão realizada neste capítulo.

Da mesma Figura 16 percebe-se os efeitos da perda de qualidade da aproximação da área de cooperação apresentada na Equação (21) na probabilidade de cooperação, particularmente quando $\rho \leq 10^{-6}$ EDs/m². Conforme discutido neste capítulo, as colisões são o principal fator impactante na probabilidade de *outage* quando a rede experimenta alta densidade de EDs. Ao reduzir-se ρ , o desempenho dos dispositivos passa a depender mais da probabilidade de conexão \mathcal{H}_1 , descrita na Equação (9). Nesse caso, a largura das regiões dos SFs aumenta, provocando a diferença visível na Figura 16. Note, porém, que os resultados apresentados na Figura 16 representam a probabilidade de cooperação para um ED no centro da região do SF, pior cenário

para a aproximação da Equação (21).

Observou-se, em seguida, o comportamento do consumo energético de cada esquema. O NCC-LoRa, apesar de ter requerido a maior corrente média por ciclo de transmissão em cada SF individualmente, foi capaz de manter SFs menores até distâncias maiores dos EDs até o GW. Então, discutiu-se a possibilidade de se reduzir a potência de transmissão P_{TX} afim de contornar o consumo adicional causado pela transmissão D2D. Disso, foi observado a existência de regiões em que o esquema operando com maior potência de transmissão ainda foi capaz de ter maior eficiência energética, devido ao procedimento de alocação de SF.

Serão apresentadas, no seguinte capítulo, as conclusões finais a respeito desta dissertação. Serão relacionados os objetivos específicos lançados no Capítulo 1 com os resultados obtidos neste capítulo, além de uma breve revisão sobre os assuntos discutidos previamente.

6 COMENTÁRIOS FINAIS

Avaliou-se neste trabalho um esquema cooperativo com codificação de rede para implementação em redes LoRa, particularmente em LoRaWAN, denominado NCC-LoRa. Nele, dispositivos trocam informações em uma etapa D2D e auxiliam-se uns aos outros na comunicação com o GW comum. Para tanto, os dispositivos realizam combinações lineares em um campo finito dos dados de cada mensagem dos parceiros de cooperação. Caso verifique-se falha na etapa D2D, o esquema opera de maneira análoga ao esquema baseado em retransmissões de mensagem. Modelou-se, desses conceitos, a probabilidade de *outage* de *uplink* para o esquema proposto. Em específico, foi apresentada uma aproximação para a probabilidade de cooperação, que assumiu-se ocorrer apenas entre dispositivos que utilizam o mesmo SF na realização da comunicação no ED-GW.

Também, estabeleceu-se o equacionamento do consumo médio de corrente elétrica por ciclo de transmissão conforme as especificações da documentação técnica e das particularidades de cada esquema avaliado. Para o NCC-LoRa, foi proposto um cálculo do consumo da etapa D2D com base em dados de uma modulação FSK à alta taxa de transmissão de bits. Para incluir o cenário de falha na comunicação entre dispositivos, incluiu-se a probabilidade de cooperação no modelo de consumo energético.

Discutiu-se, ainda, diversos pontos a relevantes à implantação do esquema NCC-LoRa. Verificou-se, inclusive, a necessidade de maior capacidade de armazenamento nos dispositivos da rede. Apesar disso, conclui-se que a adoção de NCC-LoRa não deve requerer extensivas alterações de *hardware*. Isso porque constatou-se a preexistência de elementos requeridos pelo protocolo avaliado em dispositivos típicos de redes LoRaWAN.

Diante dos resultados de simulação computacional através do método de Monte Carlo, respaldou-se a análise matemática do NCC-LoRa realizada neste trabalho. Foi atestado, portanto, que a adoção do conceito de NCC de Xiao e Skoglund (2010) e de Rebelatto *et al.* (2012) produziu resultados positivos tanto no alcance da rede quanto no consumo de energia dos dispositivos.

Em suma, conclui-se que o esquema avaliado pode representar um importante mecanismo para melhorar o desempenho de redes LoRa em situações de alta densidade de rede, situação prevista com a ascensão de IoT. Além disso, por não requerer processos adicionais de sincronização em escala de rede, apenas entre os dispositivos cooperantes, o NCC-LoRa

pode ser uma alternativa aos complexos esquemas *multi-hop* e baseados em agendamento de transmissão presentes na literatura. Finalmente, mediante os promissores resultados de eficiência energética vistos neste trabalho, a implementação de NCC-LoRa pode auxiliar na redução do crescente impacto ambiental oriundo de processos associados a redes de comunicação móveis. Não obstante, cita-se a seguir possíveis extensões da análise realizada neste trabalho.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Entre os trabalhos futuros, destaca-se a possibilidade de realizar cooperação entre mais de dois dispositivos, baseado no conceito de Codificação de rede dinâmica generalizada, do inglês *Generalized Dynamic Network Coding* (GDNC), discutido por Rebelatto *et al.* (2012). A dificuldade, nesse caso, estaria associada ao protocolo de troca de mensagens entre todos os dispositivos cooperantes e na modelagem da probabilidade de que todos possam se comunicar entre si.

Como averiguado nos resultados desta dissertação, existem regiões onde esquemas com maior potência de transmissão produzem menor consumo energético. A avaliação de um mecanismo de controle adaptativo de potência, portanto, seria uma oportunidade de ampliar ainda mais a eficiência do esquema NCC-LoRa retratado nestas páginas.

Outra possível extensão do que foi estudado neste trabalho seria adotar um modelo que considera interferência e cooperação entre dispositivos que utilizam SFs diferentes. Nesse caso, o modelo de probabilidade de *outage* considerado neste trabalho precisaria ser readequado para incluir a interferência inter-SF. Entretanto, a formulação da probabilidade de cooperação poderia ser simplificada, visto que a área de cooperação passaria a ser circular com raio equivalente a distância de cooperação até os limites do alcance da rede.

Por fim, sugere-se também uma análise em escala ainda maior. Poderia ser considerado o caso em que os EDs possam encontrar parceiros fora do alcance do GW comum. Caso esses parceiros estejam dentro do alcance da rede de outros GWs, desde que conectadas ao mesmo NS, então ainda seria possível associar os pacotes de paridade e recuperar as mensagens transmitidas, obtendo o ganho de diversidade gerado pelo NCC.

REFERÊNCIAS

- AHLWEDE, R.; CAI, N.; LI, S.-Y. R.; YEUNG, R. W. Network information flow. **IEEE Transactions on Information Theory**, v. 46, n. 4, p. 1204–1216, 2000.
- ALVES, L. H. O.; REBELATTO, J. L.; BRANTE, G.; SOUZA, R. D. Successive Interference Cancellation-aided NOMA in URLLC with time and frequency diversity. *In: XXXVIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT 2020)*. Florianópolis, Brasil: [s.n.], 2020.
- ALVES, L. H. O.; REBELATTO, J. L.; SOUZA, R. D.; BRANTE, G. Network-Coded Cooperative LoRa network with D2D communication. **arXiv preprint arXiv:2107.02712**, 2021. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2107.02712>. Acesso em: 07 jul. 2021.
- ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. The Internet of Things: A survey. **Computer Networks**, v. 54, n. 15, p. 2787–2805, 2010. ISSN 1389-1286. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128610001568>. Acesso em: 01 jul. 2021.
- BERIOLI, M.; COCCO, G.; LIVA, G.; MUNARI, A. Modern random access protocols. **Foundations and Trends® in Networking**, v. 10, n. 4, p. 317–446, 2016. ISSN 1554-057X. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1561/1300000047>. Acesso em: 23 jul. 2021.
- BORKOTOKY, S. S.; SCHILCHER, U.; BETTSTETTER, C. Cooperative relaying in LoRa sensor networks. *In: 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–5. ISSN 1930-529X.
- CASALS, L.; MIR, B.; VIDAL, R.; GOMEZ, C. Modeling the energy performance of LoRaWAN. **Sensors**, v. 17, n. 10, 2017. ISSN 1424-8220. Disponível em: <http://www.mdpi.com/1424-8220/17/10/2364>. Acesso em: 12 jul. 2021.
- 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 Communications**, v. 23, n. 5, p. 60–67, 2016.
- CUOMO, F.; CAMPO, M.; CAPONI, A.; BIANCHI, G.; ROSSINI, G.; PISANI, P. EXPLoRa: Extending the performance of LoRa by suitable spreading factor allocations. *In: IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–8. ISBN 9781538638392.

DAALHUIS, A. B. O. Hypergeometric function. *In*: OLVER, F. W. J.; LOZIER, D. W.; BOISVERT, R. F.; CLARK, C. W. (Ed.). **NIST Handbook of Mathematical Functions**. 1. ed. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2010. cap. 15, p. 383–402. ISBN 978-0-521-19225-5.

DALEY, D. J.; VERE-JONES, D. **An Introduction to the Theory of Point Processes**. New York, NY, USA: Springer, 1998. (Springer Series in Statistics). ISBN 978-1-4757-2001-3.

DYNASTREAM INNOVATIONS INC. **ANT Message Protocol and Usage**. [*S.l.*], 2014. Rev. 5.1. Disponível em: <http://thisisant.com/resources/ant-message-protocol-and-usage>. Acesso em: 03 mai. 2021.

FEHSKE, A.; FETTWEIS, G.; MALMODIN, J.; BICZOK, G. The global footprint of mobile communications: The ecological and economic perspective. **IEEE Communications Magazine**, v. 49, n. 8, p. 55–62, 2011.

GEORGIU, O.; RAZA, U. Low Power Wide Area Network analysis: Can LoRa scale? **IEEE Wireless Communication Letters**, v. 6, n. 2, p. 162–165, 2017. ISSN 2162-2337.

GOLDSMITH, A. **Wireless Communications**. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2005. ISBN 978-0-521-83716-3.

HOELLER, A.; SOUZA, R. D.; ALVES, H.; LÓPEZ, O. L. A.; MONTEJO-SÁNCHEZ, S.; PELLENZ, M. E. Optimum LoRaWAN configuration under Wi-SUN interference. **IEEE Access**, v. 7, p. 170936–170948, 2019.

HOELLER, A.; SOUZA, R. D.; LÓPEZ, O. L. A.; ALVES, H.; NETO, M. N.; BRANTE, G. Analysis and performance optimization of LoRa networks with time and antenna diversity. **IEEE Access**, v. 6, p. 32820–32829, 2018. ISSN 2169-3536.

JIANG, X.; ZHANG, H.; YI, E. A. B.; RAGHUNATHAN, N.; MOUSOULIS, C.; CHATERJI, S.; PEROULIS, D.; SHAKOURI, A.; BAGCHI, S. Hybrid Low-Power Wide-Area Mesh Network for IoT applications. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 8, n. 2, p. 901–915, 2021.

KIM, J.; SONG, J. A secure device-to-device link establishment scheme for LoRaWAN. **IEEE Sensors Journal**, v. 18, n. 5, p. 2153–2160, 2018. ISSN 1530-437X.

LANEMAN, J. N.; TSE, D. N. C.; WORNELL, G. W. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior. **IEEE Transactions on Information Theory**, v. 50, n. 12, p. 3062–3080, 2004.

LORA ALLIANCE, INC. **LoRaWAN™ 1.1 Specification**. [S.l.], 2017. Rev. 1.1. Disponível em: https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/lorawantm_specification_-v1.1.pdf. Acesso em: 03 mai. 2021.

LUO, B.; YAO, Y.; SUN, Z. Performance Analysis Models of BLE Neighbor Discovery: A Survey. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 8, n. 11, p. 8734–8746, 2021.

MAHMOOD, A.; SISINNI, E.; GUNTUPALLI, L.; RONDÓN, R.; HASSAN, S. A.; GIDLUND, M. Scalability analysis of a LoRa network under imperfect orthogonality. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 15, n. 3, p. 1425–1436, 2019. ISSN 1551-3203.

MIKHAYLOV, K.; PETÄJÄJÄRVI, J.; HAAPOLA, J.; POUTTU, A. D2D communications in LoRaWAN Low Power Wide Area Network: From idea to empirical validation. In: **2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 737–742. ISSN 2474-9133.

MONTEJO-SÁNCHEZ, S.; AZURDIA-MEZA, C. A.; SOUZA, R. D.; FERNANDEZ, E. M. G.; SOTO, I.; HOELLER, A. Coded redundant message transmission schemes for Low-Power Wide Area IoT applications. **IEEE Wireless Communication Letters**, v. 8, n. 2, p. 584–587, 2019. ISSN 2162-2345.

NAUMAN, A.; QADRI, Y. A.; AMJAD, M.; ZIKRIA, Y. B.; AFZAL, M. K.; KIM, S. W. Multimedia internet of things: A comprehensive survey. **IEEE Access**, v. 8, p. 8202–8250, 2020.

NORD, J. H.; KOOHANG, A.; PALISZKIEWICZ, J. The internet of things: Review and theoretical framework. **Expert Systems with Applications**, v. 133, p. 97–108, 2019. ISSN 0957-4174.

RAZA, U.; KULKARNI, P.; SOORIYABANDARA, M. Low Power Wide Area Networks: An overview. **IEEE Communication Surveys & Tutorials**, v. 19, n. 2, p. 855–873, 2017.

REBELATTO, J. L.; UCHÔA-FILHO, B. F.; LI, Y.; VUCETIC, B. Multi-user cooperative diversity through network coding based on classical coding theory. **IEEE Transactions on Signal Processing**, v. 60, n. 2, p. 916–926, 2012.

REYNDERS, B.; POLLIN, S. Chirp spread spectrum as a modulation technique for long range communication. In: **2016 Symposium on Communications and Vehicular Technologies (SCVT)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–5.

SANT'ANA, J. M. S.; HOELLER, A.; SOUZA, R. D.; SÁNCHEZ, S. Montejo; ALVES, H.; NETO, M. Hybrid coded replication in LoRa networks. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 16, n. 8, p. 5577–5585, 2020.

SANT'ANA, J. M. S.; HOELLER, A.; SOUZA, R. D.; ALVES, H.; MONTEJO-SÁNCHEZ, S. LoRa performance analysis with superposed signal decoding. **IEEE Wireless Communications Letters**, v. 9, n. 11, p. 1865–1868, 2020.

SELLER, O. B. A. **Wireless communication method**. Depositante: Semtech Corporation. US n. 9647718B2. Depósito: 9 set. 2015. Concessão: 9 mai. 2017.

SEMTECH CORPORATION. **SX1272/73 - 860 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver**. Camarillo, CA, USA, 2019. Rev. 4. Disponível em: https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JelG/a/440000001NCE/v_VBhk1IolDgxwwnOpcS_vTFxPfSEPQbuneK3mWsXIU. Acesso em: 01 jul. 2021.

SRIVASTAVA, A.; GUPTA, M. S.; KAUR, G. Energy efficient transmission trends towards future green cognitive radio networks (5G): Progress, taxonomy and open challenges. **Journal of Network and Computer Applications**, v. 168, p. 102760, 2020. ISSN 1084-8045.

SUNDARAM, J. P. Shanmuga; DU, W.; ZHAO, Z. A survey on LoRa networking: Research problems, current solutions, and open issues. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 22, n. 1, p. 371–388, 2020. ISSN 2373-745X.

WU, Y.; LIU, W.; WANG, S.; GUO, W.; CHU, X. Network coding in device-to-device (D2D) communications underlying cellular networks. *In: IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 2072–2077.

XIAO, M.; SKOGLUND, M. Multiple-user cooperative communications based on linear network coding. **IEEE Transactions on Communications**, v. 58, n. 12, p. 3345–3351, 2010.