

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
BIBLIOTECA UNIVERSITÁRIA**

Jean Michel de Souza Sant'Ana

**UTILIZAÇÃO DE REPLICAÇÃO DE MENSAGENS CODIFICADAS  
EM REDES LORA**

Florianópolis

2019



Jean Michel de Souza Sant'Ana

**UTILIZAÇÃO DE REPLICAÇÃO DE MENSAGENS CODIFICADAS  
EM REDES LORA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Richard Demo Souza

Coorientador: Prof. Dr. Mario de Noronha Neto

Florianópolis

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Sant'Ana, Jean Michel de Souza  
Utilização de Replicação de Mensagens Codificadas  
em Redes LoRa / Jean Michel de Souza Sant'Ana ;  
orientador, Richard Demo Souza, coorientador, Mario  
de Noronha, 2019.  
57 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de  
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós  
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Comunicação de Longo  
Alcance e Baixo Consumo. 3. LoRa. 4. Diversidade  
Temporal. 5. Codificação de Mensagens. I. Souza,  
Richard Demo. II. Noronha, Mario de. III.  
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

Jean Michel de Souza Sant'Ana

## UTILIZAÇÃO DE REPLICAÇÃO DE MENSAGENS CODIFICADAS EM REDES LORA

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, área de concentração Comunicações e Processamento de Sinais, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 11. de Fevereiro de 2019.



Prof. Bartolomeu Ferreira Uchoa Filho, Ph.D.

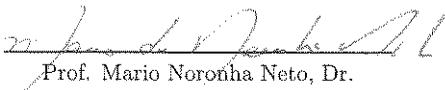
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica



Prof. Richard Demo Souza, Dr.

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Mario Noronha Neto, Dr.

Coorientador

Instituto Federal de Santa Catarina

Banca examinadora



---

Prof. Samuel Montejo Sánchez, Dr.  
Universidad Tecnológica Metropolitana



---

Prof. Carlos Barros Montez, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina



---

Prof. Richard Demo Souza, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente à Deus pelas oportunidades em minha vida.

Aos meus pais pelo total apoio e encorajamento durante este percurso.

Aos professores, em especial meu orientador, pelos importantes conselhos e orientações. Ao projeto UNIEDU, através do Fundo de Apoio à Manutenção e ao Desenvolvimento da Educação Superior (FUMDES) da Secretaria da Educação de Santa Catarina (SED) pela bolsa de incentivo.



## Resumo

As LPWANs surgiram como soluções promissoras para aplicações da Internet das coisas, o que atraiu atenção da comunidade acadêmica. Dentre diversas tecnologias LPWAN, a LORA é de longe a mais utilizada como objeto de estudo entre os pesquisadores, por possuir protocolos de redes abertos (como a LORAWAN) com equipamentos mais acessíveis em praticamente todo o mundo. Contudo, a capacidade e escalabilidade das redes LORA ainda é incerta, e isto é o ponto chave de pesquisas recentes. Uma das técnicas consideradas na literatura para aumentar a capacidade destas redes é a replicação de mensagens, o que criaria diversidade temporal. Esta dissertação foca na utilização de métodos de replicação de mensagens codificadas em redes LORA, e propõe um novo método de replicação de mensagens para essas redes. Além disso, são realizadas otimizações dos parâmetros de configuração dos métodos apresentados e comparações de seus desempenhos em termos de probabilidade de *outage*. Os resultados das simulações indicam que métodos de replicações codificadas aumentam a capacidade da rede, enquanto diminuem o consumo energético quando comparados a técnicas de replicações simples. Ainda, o novo método de replicação superou o método codificado da literatura em troca de um custo energético adicional.

**Palavras-chave:** Internet das Coisas, Comunicação de Longo Alcance e Baixo Consumo, LORA, Diversidade Temporal, Codificação de Mensagens.



## Abstract

Among the several LPWAN technologies, LoRa is the by far the mostly addressed by the research community, probably because it is an open standard with less expensive equipment available in, virtually, every country. However, the capacity and scalability of LoRa is still uncertain, and thus is a focal point of recent research. One of the techniques considered in the literature to increase the capacity of these networks is message replication, what would increase time diversity. This paper aims at the use of coded message replication schemes in LoRa networks, and proposes a novel coded message replication scheme for these networks. Moreover, we analyze the optimization of the configuration parameters of the proposed schemes and compare its performance in terms of outage probability with other techniques in the literature. The simulation results indicate that coded replication schemes enhance the network capacity while reducing the energy consumption compared to simple replication techniques. Also, the novel replication scheme outperformed the coding scheme in the literature at the expense of some additional energy cost.

**Keywords:** Internet-of-Things, Long-Range Low-Power Communications, LoRa, Time Diversity, Message Codification.



## Lista de Figuras

- Figura 1 Exemplo de região circular do modelo, com raio  $R = 6000$  m, SFs aumentando a cada 1000 m e com 500 nós distribuídos. .... 30
- Figura 2 Alcance máximo de rede LORAWAN utilizando a mesma configuração em todos os anéis no cenário 2. Os parâmetros observados na legenda variam conforme o eixo x, enquanto os outros são unitários.... 44
- Figura 3 Comparação de todas as configurações do método HT para  $M = 4$ . A tripla na legenda representa a configuração  $(n, m, r)$  utilizada. . . 46
- Figura 4 Comparação dos métodos RT, CT-I ( $M = 4$ ) e HT ( $n = 1, m = r = 2$ ), cenário 2,  $T = 0.9$  para o método RT e mesmos raios para os outros métodos. .... 47
- Figura 5 Probabilidade de sucesso para diferentes métodos de replicação dado uma probabilidade de sucesso alvo para o Cenário 1. .... 50
- Figura 6 Probabilidade de sucesso para diferentes métodos de replicação dado uma probabilidade de sucesso alvo para o Cenário 2. .... 51
- Figura 7 Número médio de nós em cobertura para diferentes métodos de replicação, cenários e probabilidade de sucesso alvo. .... 52



## Lista de Tabelas

Tabela 1	Características de uplink do LORA considerando pacotes de 9 bytes, $B = 125$ kHz com detecção de erro e cabeçalho habilitados [8]...	26
Tabela 2	Expansão dos possíveis eventos do HT que possibilitam decodificação da $k$ -ésima mensagem na janela $k-3$ até $k+3$ e $n = 1$ . .....	36
Tabela 3	Estatísticas das cidades [24] utilizadas para representar a densidade de nós LORAWAN com <i>gateway</i> de 8 canais .....	43
Tabela 4	Valores dos Parâmetros do Sistema. ....	45
Tabela 5	Número de réplicas $M$ dos métodos RT e CT-I para os diferentes cenários, probabilidade de sucesso alvo e fatores de espalhamento... ..	48
Tabela 6	Configuração ótima do HT para os diferentes cenários, probabilidade de sucesso alvo e fatores de espalhamento. ....	49



## **Lista de Abreviaturas e Siglas**

**ADR** *Adaptive Data Rate*

**AWGN** *Additive White Gaussian Noise*

**CDF** *Cumulative Distribution Function*

**CSMA-CA** *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*

**CSS** *Chirp Spread Spectrum*

**CT-I** *Coded Transmission - Independent*

**DSSS** *Direct Sequence Spread Spectrum*

**DT** *Direct Transmission*

**HT** *Hybrid Transmission*

**IBGE** *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*

**ILP** *Integer Linear Program*

**IoT** *Internet of Things*

**ISM** *Industrial, Scientific and Medical*

**LPWAN** *Long Range Wide Area Network*

**LTE** *Long Term Evolution*

**MAC** *Medium Access Control*

**PPP** *Poisson Point Process*

**RT** *Replication Transmission*

**SNR** *Signal-to-Noise Ratio*

**SF**      *Spreading Factor*

**ToA**    *Time on Air*

**QoS**    *Quality of Service*

**WLAN** *Wireless Local Area Network*

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>19</b>
1.1	Trabalhos Relacionados .....	19
1.2	Contribuição .....	21
1.3	Organização.....	21
<b>2</b>	<b>LPWANs .....</b>	<b>23</b>
2.1	LoRA .....	25
2.2	LoRaWAN .....	25
<b>3</b>	<b>Modelo do Sistema .....</b>	<b>29</b>
3.1	Condição de <i>Outage</i> 1: Desconexão .....	31
3.2	Condição de <i>Outage</i> 2: Colisão .....	31
3.3	Probabilidade de Cobertura.....	32
3.4	Método de Replicação de Transmissões (RT).....	32
3.5	Método de Transmissões Codificadas Independentes (CT-I) ..	33
<b>4</b>	<b>Replicação Híbrida de Mensagens .....</b>	<b>35</b>
4.1	Otimização do Alcance de Comunicação .....	39
<b>5</b>	<b>Resultados Numéricos.....</b>	<b>43</b>
<b>6</b>	<b>Conclusão.....</b>	<b>53</b>
6.1	Trabalhos Futuros .....	53
	<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>55</b>



# Capítulo 1

## Introdução

Atualmente, diversas aplicações em cenários de IoT (do inglês, Internet of Things) demandam cobertura sem fio em áreas densas, ao mesmo tempo que exigem baixo consumo energético. Exemplos são aquelas relacionadas com cidades inteligentes [1], saúde [2], agricultura [3], medição de energia [4], entre outras. Tais demandas fizeram com que tecnologias de curto alcance, como WLAN, Bluetooth e ZigBee, e redes celulares (3G, LTE) deixassem de ser a melhor alternativa. Tecnologias LPWAN (*Low Power Wide Area Network*) como LORAWAN, SIGFOX, RPMA e NB-IoT, surgiram como candidatas para essas demandas devido ao seu longo alcance e grande capacidade, além de sua alta eficiência energética.

Dentre as tecnologias LPWAN, LORAWAN destaca-se por ser a que mais atrai atenção da comunidade acadêmica. Uma das principais razões disto acontecer é por seu protocolo de rede ser aberto, o que facilita a sua adaptação e evolução. Isto também permite que empresas privadas instalem redes LORAWAN com maior liberdade ao redor do mundo [5].

Ainda que LORAWAN tenha recebido muita atenção da comunidade acadêmica, existem questões em aberto sobre sua capacidade e confiabilidade. Assim, este trabalho foca em analisar a capacidade da LORAWAN utilizando métodos de codificação de mensagens, atuando em conjunto com técnicas de replicação, a fim de explorar a diversidade temporal. Para isto, trabalhou-se no método de replicação codificada apresentado em [6] para desenvolver um novo método otimizado para LORAWAN.

### 1.1 Trabalhos Relacionados

Diversos trabalhos recentes investigaram como aumentar a escalabilidade da LORAWAN. Alguns desenvolveram modelos analíticos, enquanto outros propuseram técnicas para aumentar a qualidade de rede quando comparados ao esquema ADR (do inglês, *Adaptive Data Rate*) do LORAWAN.

Georgiou e Raza [7] apresentam um modelo matemático que reproduz redes LORA densas e em larga escala, enquanto Hoeller *et al.* [8] ampliou este modelo adicionando diversidade espacial e temporal. Este modelo ana-

lisa ambas probabilidades de conexão e colisão, levando em consideração o efeito de captura. Ambos trabalhos mostram que colisões são os maiores fatores para *outage*, mesmo considerando distâncias acima de 10 km. Hoeller *et al.* concluiu que o acréscimo no número de antenas em um *gateway* LORA sempre implica em benefícios, enquanto aumentar o número de mensagens replicadas diretamente pode, em alguns casos, congestionar o canal. Mikhaylov *et al.* [9] apresentou uma análise de capacidade e escalabilidade do LORAWAN levando em consideração diferentes cenários de aplicação. Eles calcularam o número ótimo de nós por SF (do inglês, *Spreading Factor*) e apresentaram a distribuição de SF que habilita o desempenho ótimo da rede. Ainda foi apresentada uma análise considerando o número ótimo de nós em uma certa área, dado uma certa densidade. Bor *et al.* [10] apresenta um simulador de eventos discretos que considera ambas probabilidades de conexão e colisão com efeito de captura, e inclui outros efeitos menos impactantes, como a recuperação de um pacote com um certo grau de sobreposição. Eles mostraram que uma rede LORA padrão não escala bem, porém a rede pode se beneficiar de técnicas de adaptação de parâmetros dinâmicas.

Cuomo *et al.* [11], [12] apresenta o EXPLORA, um conjunto de algoritmos dinâmicos para alocação de SF, a fim de aumentar o desempenho da rede. EXPLORA propõe três esquemas: -SF, -AT e -KM. EXPLORA-SF distribui os SF igualmente entre os nós, mantendo, na média, o mesmo número de nós transmissores em cada SF. EXPLORA-AT considera o tempo no ar de cada transmissão, equalizando a ocupação do canal em cada SF. Já que o tempo no ar aumenta exponencialmente com o SF, existirão mais nós transmitindo em SF menores, no caso do EXPLORA-AT. Finalmente, o EXPLORA-KM, que é similar ao esquema -AT, utiliza algumas técnicas para reduzir possíveis regiões críticas com uma larga concentração de nós no mesmo SF. Todos os esquemas EXPLORA apresentaram desempenho superior ao ADR. EXPLORA-AT e -KM obtiveram resultados similares na ausência de retransmissões, porém o -KM obteve melhor desempenho em cenários onde retransmissões eram frequentes.

Ambos Hauser e Hégr [13], e Slabicki *et al.* [14], mostram que o esquema de ADR atual está longe do ótimo, principalmente em cenários muito dinâmicos. Eles também propõem algumas alterações no algoritmo atual do ADR, considerando diferentes parâmetros e controle de potência, aumentando assim sua eficiência. Abdelfadeel *et al.* [15] propuseram mecanismos de adaptação de taxa de transmissão e controle de potência justos e os comparou com o ADR original em cenários limitados por interferência. Eles mostram que a abordagem proposta possibilita uma taxa de extração de dados mais justa dentre os dispositivos da rede.

Marcelis *et al.* [16] apresentam uma técnica de codificação de camada

de aplicação para LORAWAN, chamada DaRe. Ela carrega algumas características de códigos *fountain* e convolucionais, onde os pacotes atuais carregam informação redundante de pacotes anteriores. A técnica aumenta o desempenho em troca de atraso na decodificação. Sandell e Raza [17] analisaram aspectos específicos do DaRe como o atraso e a complexidade do decodificador, apresentando extensões ao modelo inicial. Eles mostram que a latência aumenta exponencialmente com a perda de pacotes, e o novo modelo pode trocar taxa de recuperação de dados por atrasos menores.

Montejo-Sánchez [6] apresenta e compara métodos de codificação para LPWAN a fim de explorar diversidade temporal, utilizando especificação SIGFOX para parametrizar seus resultados. Este trabalho inclui um método de replicação direta similar ao apresentado em [8], além de um método de retransmissão codificada similar ao DaRe [16]. Finalmente, [6] propõe um novo método, chamado CT-I, que envia informação codificada em pacotes subsequentes independentes. Este método apresentou melhores resultados que os demais quanto à taxa de sucesso e atraso de decodificação.

## 1.2 Contribuição

Nesta dissertação, é realizada uma análise do comportamento da LORAWAN com a utilização do método de replicação de mensagens codificadas CT-I, apresentado por [6], a fim de explorar melhor a diversidade temporal do que simples réplicas [8]. Também é apresentado um novo método de replicação de mensagens codificadas que generaliza o CT-I e que é capaz de obter melhor desempenho em redes LORAWAN. É apresentada uma heurística a fim de encontrar os parâmetros de replicação quase-ótimos que maximizam o alcance de comunicação, enquanto garantem um certo nível de confiabilidade. Finalmente, é apresentada uma análise comparando os métodos de replicação, utilizando o número médio de nós em cobertura em cada cenário, similar ao que foi feito em [9].

## 1.3 Organização

O restante desta dissertação está organizado da seguinte forma. O Capítulo 2 faz uma revisão sobre as tecnologias LPWANs e uma descrição sobre LoRA e LORAWAN. O Capítulo 3 apresenta o modelo de rede utilizado, bem como métodos de replicação de mensagens apresentados na literatura. No Capítulo 4 é apresentado um novo método de replicação de mensagens codificadas e um algoritmo de otimização da rede em termos de alcance má-

ximo. No Capítulo 5 são expostos os resultados numéricos e comparações entre os métodos de replicação. Por fim, o Capítulo 6 destaca as conclusões.

## Capítulo 2

### LPWANs

Designou-se LPWAN uma categoria de tecnologias de comunicação sem fio que compartilham algumas características, como longo alcance e grande penetração de comunicação, baixo consumo energético e taxas de transmissão. Tais tecnologias foram projetadas principalmente para atuar em aplicações de internet das coisas, onde redes celulares e outras baseadas em Bluetooth, WLAN e Zigbee não cumprem os requisitos. Centenaro et. al. [1] aponta os principais problemas das redes atuais para um cenário IoT:

- Topologia Mesh: Por seus enlaces serem relativamente curtos, com no máximo 200 metros, é necessária uma topologia mesh com múltiplos nós e saltos de comunicação para cobrir uma grande área. Este tipo de topologia gera maior resiliência a falhas. Entretanto, faz-se necessário um controle de tráfego e múltiplas transmissões entre os nós, o que aumenta o atraso em comunicações de longo alcance e também o consumo de energia.
- Curto alcance - Alta taxa de transmissão: Os enlaces nessas tecnologias tendem a priorizar taxa de transmissão do que sensibilidade de recepção. Em geral, aplicações IoT não necessitam de grandes taxas de transmissão, enquanto uma maior cobertura normalmente é desejada.

Raza et. al. [18] apresenta como principais tecnologias LPWAN: Sigfox, LORA, Ingenu RPMA. Também discute as principais metas e as respectivas técnicas utilizadas por diferentes tecnologias LPWAN, como apresentado a seguir.

1. Longo alcance, com *link budget* em torno de 150 dB.
  - Utilização de bandas Sub-GHz, preferencialmente não licenciadas, que permitem uma melhor penetração de obstáculos.
  - Técnicas de modulação que favoreçam o aumento do *link budget*, como espalhamento espectral (CSS, DSSS) e utilização de banda estreita (menor que 25 kHz).
2. Baixo consumo energético, com baterias durando até 10 anos, diminuindo o custo de manutenção.

- Utilização de topologias de rede onde há o mínimo possível de comunicações, preferencialmente comunicações diretas entre nós e estações base, como em topologias estrela.
  - Utilização de mecanismos de *duty cycle*, onde os nós só estão ativos no momento que transmitem e em certas ocasiões que vão receber algum dado.
  - Controle de acesso ao meio (MAC) simplificado, sem a necessidade de sincronismo e mecanismos de controle de colisões, como CSMA-CA. Tais mecanismos costumam consumir energia pois necessitam um rádio ativo um maior tempo e aumentam o número de mensagens de sinalização, que aumenta a probabilidade de colisões entre as mensagens.
  - Levar a complexidade dos dispositivos de ponta para as estações base e servidores. Isto visa diminuir os custos energéticos de processamento dos dispositivos de ponta.
3. Baixo custo de hardware, abaixo de 5 dólares.
- Redução da complexidade do hardware, através de MACs simples, modulações com processamento mais simples.
  - Menor infraestrutura, já que uma estação base deve ser capaz de cobrir um raio de alguns quilômetros.
  - Utilização de bandas não licenciadas, não existindo necessidade de compras de faixas de frequência.
4. Escalabilidade, ou seja, suporte para um número massivo de dispositivos conectados à rede.
- Utilização de técnicas de diversidade de canal, temporal e espacial e de hardware.
  - Seleção adaptativa de canais e de taxas de transmissão. Dessa forma, pode-se escolher transmitir em canais menos congestionados e diminuir a taxa de transmissão em troca de alcance no enlace.
5. Mesmo que as LPWAN apresentem ser impróprias para aplicações com restrições de atraso, elas deverão apresentar algum tipo de qualidade de serviço (QoS, do inglês, *Quality of Service*). Tecnologias atuais, até o momento, disponibilizam nenhum ou um QoS limitado.

## 2.1 LORA

LORA é uma tecnologia de comunicação sem fio de camada física, que apresenta a modulação CSS (do inglês, *Chirp Spread Spectrum*), otimizada para aplicações de longo alcance e baixo consumo energético. É uma tecnologia proprietária da Semtech. Sua principal característica é a utilização de fatores de SFs, que permitem que múltiplas mensagens sejam transmitidas e recebidas simultaneamente. Outra característica importante dos diferentes SF é a troca entre taxa de transmissão e alcance, onde SF menores geram transmissões mais rápidas com menor alcance, e SF maiores geram transmissões mais lentas com maior alcance.

O código corretor utilizado é um código de Hamming, com taxas que vão de 4/5 até 4/8, junto com um entrelaçador e codificação Gray [19]. Também é possível escolher a largura de banda utilizada, entre 125, 250 e 500 kHz. A sensibilidade do receptor varia entre -137 até -123 dBm, dependendo da configuração utilizada. São utilizadas bandas ISM (do inglês, *Industrial, Scientific and Medical*) como portadoras. Estas são faixas de frequência não licenciadas, reservadas para atividades industriais, científicas e médicas. É importante ressaltar que essas bandas e suas regulamentações variam conforme a região, sendo as mais comuns 868 MHz para a Europa e 915 MHz para Estados Unidos e Brasil, por exemplo.

Por ser um tipo de modulação em frequência, enlaces LORA apresentam efeito de captura [10]. Quando dois ou mais pacotes colidem, ou seja, são transmitidas ao mesmo tempo utilizando o mesmo SF e canal, um dos pacotes ainda pode ser corretamente decodificado, desde que seja recebido com uma SNR suficientemente maior do que a do outro pacote [20].

Segundo [21], “LORA é uma implementação de camada física e é agnóstica das implementações de camadas de nível mais alto. Isto permite que a LORA coexista e opere com arquiteturas de rede existentes”. Assim, é possível existirem redes diferentes que funcionem utilizando LORA, sendo a LoRaWAN a rede mais difundida atualmente.

## 2.2 LoRaWAN

LoRaWAN é uma pilha de protocolos aberta que utiliza-se de LORA como cada física. Sua especificação [22] é regida pela LORA-Alliance, um conglomerado de empresas, como a própria Semtech, Cisco, IBM, entre outros. A rede possui três tipos de equipamentos: os nós (dispositivos da ponta, *end devices*), *gateways* (estações base) e o servidor de rede (*Netserver*). Dependendo da região de atuação, existe um conjunto de configurações possí-

Tabela 1: Características de uplink do LORA considerando pacotes de 9 bytes,  $B = 125$  kHz com detecção de erros e cabeçalho habilitados [8].

SF	ToA (ms)	$R_b$ (kbps)	Sensibilidade do Receptor (dBm)	SNR limiar $q_s$ (dB)
7	41.22	5.47	-123	-6
8	72.19	3.12	-126	-9
9	144.38	1.76	-129	-12
10	247.81	0.98	-132	-15
11	495.62	0.54	-134.5	-17.5
12	991.23	0.29	-137	-20

veis para os enlaces LORA. Largura de banda de 125, 250 e 500 kHz são utilizadas em quase todas as regiões, sendo as duas primeiras para *uplink* e a última para *downlink*. Também utilizam SF de 7 até 12, código de 4/5 até 4/8 e potências de transmissão variando na maior parte dos casos entre 0 e 20 dBm. Na Tabela 1 pode-se ver algumas características de comunicações da LORAWAN. Note que o aumento do SF implica em uma taxa de transmissão  $R_b$  menor, logo um tempo de transmissão (ToA, do inglês, *Time on Air*) maior. Entretanto, a SNR limiar necessária para decodificação é menor, logo a sensibilidade do receptor será menor também.

Os equipamentos de uma rede LORA são conectados em topologia estrela, onde um nó comunica-se a um ou mais *gateway* via enlace LORA, que por sua vez comunica-se a um ou mais servidores via conexão IP padrão (ethernet, rede celular, etc). É importante ressaltar que somente existe comunicação LORA entre os nós e *gateways*. Os *gateways* são responsáveis por comutar a troca de mensagens entre os nós e servidores. Eles atuam como um encaminhador de mensagens entre as pontas, sendo registrados no servidor, entretanto não existe nenhum tipo de associação com os nós. Atualmente é possível encontrar *gateways* LORAWAN capazes de processar de 8 até 64 canais simultaneamente, sendo cada canal uma combinação de frequência de portadora e fator de espalhamento. Esta diferença em número de canais é uma questão comercial, não sendo especificada pelo protocolo.

Existem três tipos de dispositivos LoRaWAN[22]:

- Classe A: Dispositivo fica em modo de economia de energia até precisar transmitir (protocolo do tipo ALOHA). Após transmitir, o dispositivo abre duas janelas de recepção<sup>1</sup>, para receber mensagens do servi-

<sup>1</sup>Período em que um receptor mantém seu rádio ligado com o intuito de receber uma mensagem.

dor, através de um *gateway*. Essas mensagens do servidor podem ser simplesmente de confirmação referente à mensagem enviada ou ainda mensagens de configuração do dispositivo. Esta é a classe mais comum e a que possibilita maior economia de energia.

- Classe B: Dispositivo realiza os mesmos processo que a Classe A, porém ele é sincronizado com os *gateways* através de uma mensagem de sincronismo (*beacon*). Ao receber este *beacon*, o dispositivo abre uma janela extra de recepção (protocolo do tipo ALOHA-slotted). Desta forma, o servidor pode enviar uma mensagem ao dispositivo em um tempo previsível. Devido ao fato de mais mensagens serem trocadas e o dispositivo abrir mais janelas de recepção, esta classe tende a ser menos eficiente energeticamente.
- Classe C: Dispositivos mantêm o rádio ligado o tempo inteiro, podendo enviar e receber mensagens a qualquer momento. Por ser pouco eficiente em questões energéticas, recomenda-se utilizar esta classe somente em dispositivos conectados à rede elétrica.

A utilização de protocolos do tipo ALOHA provê maior eficiência energética, pois não utiliza nenhum mecanismo de sinalização para evitar colisões. Entretanto, em redes de larga escala, essas colisões podem gerar um gargalo de desempenho [10].

Uma característica específica da LoRaWAN é o ADR. O servidor, após receber algumas mensagens de um nó e, utilizando um algoritmo, pode definir qual a configuração ideal de código corretor de erro, SF e potência de transmissão, a fim de diminuir o consumo energético mantendo o enlace estável. Caso um nó esteja perdendo muitos pacotes, o servidor pode aumentar a potência de transmissão ou aumentar o valor do SF. Do mesmo modo, se o servidor recebe pacotes de um nó com potência significativamente maior que a necessária, ele pode diminuir a potência de transmissão ou diminuir o SF. Este tipo de técnica não é funcional com nós em movimento, visto que o ambiente ao redor do nó tende a mudar mais rápido que o servidor é capaz de calcular uma otimização.



## Capítulo 3

### Modelo do Sistema

Neste capítulo será descrito o modelo base para análise da rede, bem como o modelo de probabilidade de *outage* apresentado em [7]. Após, é descrito uma extensão deste modelo com objetivo de aplicar diversidade temporal através de um método simples de replicação de mensagens, como apresentado em [8]. Por fim, é descrito o método de transmissão de mensagens codificadas de [6]. Estes formam a base para o novo método híbrido de replicação de mensagens a ser proposto no Capítulo 4.

Seja a região circular  $V \subseteq \mathbb{R}^2$  de raio  $R$  metros e área  $V = \pi R^2$ , onde, na média,  $N$  nós são uniformemente distribuídos aleatoriamente. O posicionamento destes nós é descrito por um PPP (do inglês, *Poisson Point Process*)  $\Phi$  com densidade  $\rho > 0$  em  $V$  e o caso contrário, onde  $N = \rho V$ . Denota-se  $d_i$  a distância Euclidiana em metros do nó  $i$  ao *gateway*, localizado na origem. Nós transmitem em um canal *uplink* aleatoriamente utilizando *unslotted ALOHA*, sem mensagens de confirmação do servidor, seguindo a restrição de *duty cycle*  $p_0$ . Por exemplo, com  $p_0 = 1\%$ , é permitido que um nó transmita durante 1 segundo caso ela permaneça em silêncio durante 99 segundos, em média. Dada uma certa janela de tempo, dispositivos com SF maior tendem a realizar menos acessos ao canal, pois seus ToA são maiores. A região circular  $V$  é dividida em seis anéis, onde cada SF é alocado baseado no posicionamento dos nós dentro da região. Nós posicionados no anel mais interno utilizam o SF7, enquanto os nós no anel mais externo, o SF12. Por questões de simplicidade, é assumido que todas as transmissões são realizadas utilizando a mesma frequência de portadora, largura de banda  $B$  Hz e mesma potência de transmissão  $P_i$ . A Figura 1 apresenta um exemplo de rede gerada por este modelo.

O modelo considera atenuação por perda de percurso  $g(d_i)$  e desvanecimento Rayleigh  $h_i$  afetam o sinal recebido pelo *gateway*. A perda de percurso segue a equação de transmissão de Friis

$$g(d_i) = \frac{\lambda}{4\pi d_i^2} e^{-\sum \eta} \quad (3.1)$$

onde  $\lambda = \frac{c}{f_c}$  é o comprimento de onda,  $c = 3 \times 10^8$  m/s é a constante da velocidade da luz no vácuo,  $f_c$  é a frequência portadora, e  $\eta \geq 2$  é o expoente de perda de percurso. O desvanecimento Rayleigh é modelado como uma va-

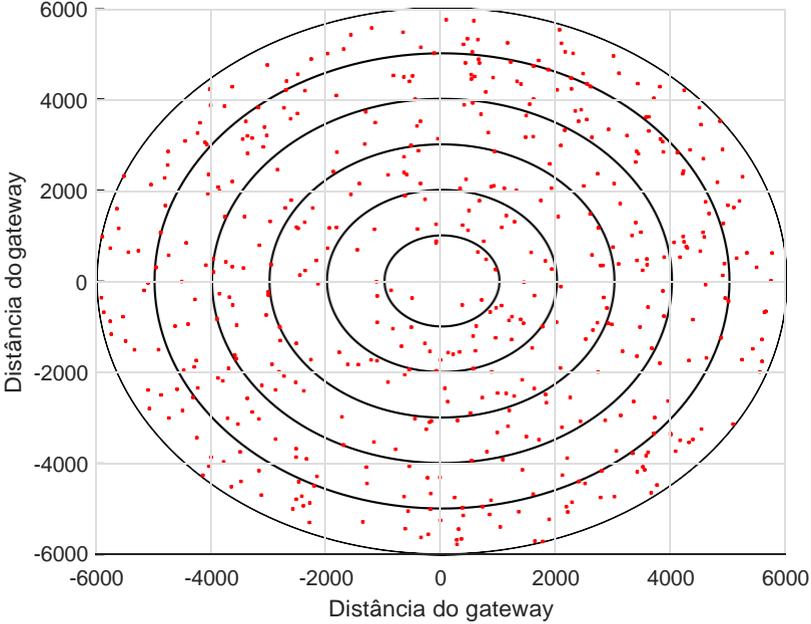


Figura 1: Exemplo de região circular do modelo, com raio  $R = 6000$  m, SFs aumentando a cada 1000 m e com 500 nós distribuídos.

riável aleatória Gaussiana complexa, circularmente simétrica, independente, de média nula e variância unitária. Dado um sinal  $s_1$  transmitido por um nó LoRa, o sinal recebido no *gateway*,  $r_1$ , é a soma do sinal transmitido atenuado com interferência e ruído. Isso pode ser expressado como

$$r_1 = g(d_1)h_1s_1 + \sum_{k=2}^N \chi_k^S g(d_k)h_k s_k + w, \quad (3.2)$$

onde  $\chi_k^S$  é uma função indicador, com valor igual a 1 se o  $k$ -ésimo nó está transmitindo no mesmo instante e SF do sinal desejado, ou 0, caso contrário.  $w$  é o ruído Gaussiano aditivo branco (AWGN) com média zero e variância  $N = 174 + F + 10 \log(B)$  dBm, onde  $F$  é a figura de ruído do receptor.

As equações de probabilidade de *outage* seguem o modelo apresentado por [7]. Considera-se que há *outage* caso não haja conexão entre o nó transmissor e o *gateway* (i.e., a SNR está abaixo do limiar de recepção) ou caso exista uma colisão. O modelo a seguir descreve ambas probabilidades de *outage* separadamente.

### 3.1 Condição de *Outage* 1: Desconexão

A probabilidade de *outage* devido à desconexão é o complemento da probabilidade de conexão  $H_1$ . A probabilidade de conexão depende diretamente da distância entre o nó transmissor e o *gateway*. Um nó é considerado conectado se a SNR instantânea do sinal recebido está acima do limiar de recepção, que depende do SF utilizado, como mostra a Tabela 1. A SNR instantânea pode ser definida como

$$\text{SNR} = \frac{P_i |h_i|^2 g(d_i)}{N}, \quad (3.3)$$

onde  $P_i$  é a potência de transmissão do nó  $i$  em mW e  $|h_i|^2$  é o ganho do canal devido ao desvanecimento. Quanto maior o SF, menor é a sensibilidade de recepção, o que permite maior alcance de comunicação. Assim, a probabilidade de conexão pode ser escrita como

$$H_1 = \mathbf{P}[\text{SNR} \geq q_S | d_1], \quad (3.4)$$

onde  $q_S$  é a SNR limiar para o SF  $S$  utilizado e  $d_1$  é a distância entre o nó desejado e o *gateway*.

Assumindo desvanecimento Rayleigh, que implica em uma SNR instantânea exponencialmente distribuída,  $H_1$  pode ser definido como

$$H_1 = \mathbf{P} \left[ |h_1|^2 \geq \frac{N q_S}{P_1 g(d_1)} \right] = \exp \left[ -\frac{N q_S}{P_1 g(d_1)} \right]. \quad (3.5)$$

### 3.2 Condição de *Outage* 2: Colisão

Uma colisão acontece quando dois pacotes são transmitidos simultaneamente (*i.e.*, sobreposição temporal) utilizando o mesmo SF e canal. Como mostrado na Sessão 2.1, LORA é um tipo de modulação em frequência e apresenta efeito de captura. Assim, um pacote pode ser recuperado, mesmo na presença de colisões, caso possua SNR 6 dB maior que o pacote colidente mais forte [20]. O pacote colidente mais forte  $k^*$  pode ser modelado como

$$k^* = \arg \max_{k>1} \{P_k \chi^S_k |h_k|^2 g(d_k)\}. \quad (3.6)$$

Após encontrar  $k^*$ , a probabilidade de que nenhuma colisão ocorra ou que o nó interferente mais forte esteja 6 dB abaixo do nó desejado, chamada

de probabilidade de captura em [8], é

$$Q_1 = P \left( \frac{\sum |h_1|^2 g(d_1)}{4 \cdot d_1} < \frac{\sum |h_{k^*}|^2 g(d_{k^*})}{4 \cdot d_1} \right) \quad (3.7)$$

A probabilidade acima depende da distribuição de probabilidade de  $X_{k^*} = |h_{k^*}|^2 g(d_{k^*})$ . A função distribuição cumulativa (CDF) de  $X_{k^*}$  é derivada em [7] e é denotada como  $F_{X_{k^*}}$ . Desta forma,

$$Q_1 = E_{|h_1|^2} \left[ F_{X_{k^*}} \left( \frac{|h_1|^2 g(d_1)}{4 \cdot d_1} \right) \right] = \int_0^\infty e^{-z} F_{X_{k^*}} \left( \frac{z g(d_1)}{4} \right) dz. \quad (3.8)$$

### 3.3 Probabilidade de Cobertura

A probabilidade de cobertura é a probabilidade de um nó comunicar-se com sucesso com o *gateway*, dado um cenário de rede apresentado pelo modelo. Como ambas equações 3.5 e 3.8 são probabilidades de sucesso independentes, a probabilidade de cobertura se dá pelo produto  $H_1 Q_1$ , enquanto a probabilidade de *outage* é o seu complemento  $1 - H_1 Q_1$ .

### 3.4 Método de Replicação de Transmissões (RT)

Hoeller *et al.* [8] introduz diversidade temporal ao modelo previamente apresentado, utilizando replicação de mensagens. Nesta extensão, cada pacote é enviado diversas vezes dentro de um único intervalo de *duty cycle*. Isto aumenta a diversidade temporal, aumentando a probabilidade que pelo menos uma mensagem seja decodificada com sucesso pelo *gateway*. É importante ressaltar que o aumento de transmissões dentro de um *duty cycle* tem efeitos em  $Q_1$ , já que isto aumenta a probabilidade de colisão. O número de nós interferentes em  $Q_1$  é modelado como uma variável aleatória de Poisson, com média  $\nu = \rho_0 \rho |\hat{V}(d_1)|$ , onde  $|\hat{V}(d_1)|$  é a área do anel do nó desejado. Denota-se por  $M$  o número de mensagens dentro de um *duty cycle*, que para o RT é  $M_{RT} = m$ , onde  $m$  é o número de vezes que uma mensagem idêntica é enviada dentro de um *duty cycle*. Desta forma, a utilização do canal é aumen-

tada  $M_{RT}$  vezes. Por isso, é necessário ajustar a média da variável aleatória

de Poisson proporcionalmente, de modo que  $v_M = M_{RT} p_0 \rho | \hat{V}(d_1) |$ . Denota-se  $Q_{1,M}$  a probabilidade de captura  $Q_1$  com o *duty cycle*  $M_{RT} p_0$ . Note que  $Q_1 = Q_{1,1}$ . Desta forma, a probabilidade de *outage* do enlace é

$$O_M = 1 - H_1 Q_{1,M}. \quad (3.9)$$

Assim sendo, derivou-se a probabilidade de que pelo menos um dos  $M$  pacotes seja recebido pelo *gateway* como

$$O_{RT}(M) = (O_M)^M, \quad (3.10)$$

onde RT vem do inglês *Replication Transmission*, como utilizado em [6], e  $O_M$  é o complemento do produto  $H_1 Q_1$  com *duty cycle*  $M p_0$ .

### 3.5 Método de Transmissões Codificadas Independentes (CT-I)

O método RT pode ser um dos meios mais simples de se aplicar diversidade temporal por replicação de mensagens. Porém, *outages* menores podem ser obtidas com replicações de mensagens codificadas. Estas mensagens codificadas são combinações de múltiplas mensagens anteriores, criando redundância de informação. As mensagens codificadas podem ser decompostas pelo receptor para recuperar alguma informação perdida anteriormente, dado que uma certa quantidade de mensagens seja recebida com sucesso. Marcelis *et al.* [16] e Sánchez *et al.* [6] apresentam diferentes métodos dentro deste conceito. Porém, Sánchez *et al.* [6] mostra que o método *Coded Transmission-Independent* (CT-I) é o mais eficiente para aplicações com restrição de atraso.

O principal conceito do CT-I é combinar diferentes mensagens linearmente (*e.g.*, operações XOR) e enviá-las como mensagens independentes dos pacotes originais. Por exemplo, assume que duas mensagens A e B são enviadas diretamente, e logo após, uma mensagem codificada com a informação  $A \oplus B$ . Se quaisquer duas dessas três mensagens é recebida com sucesso, um decodificador é capaz de recuperar as informações contidas nas mensagens A e B.

O método CT-I possui um único parâmetro,  $n$ , que é o número de transmissões codificadas para cada mensagem original. Se  $n = 0$ , não há replicações. Por exemplo, quando  $n = 1$ , a  $k$ -ésima mensagem é seguida por 1 transmissão codificada, combinando as informações da  $k$ -ésima e a  $(k+1)$ -ésima mensagem. Se  $n = 2$ , a  $k$ -ésima mensagem é seguida pela primeira transmissão codificada combinando as informações da  $k$ -ésima e a  $(k+1)$ -ésima mensagem, e uma segunda transmissão codificada que combina a  $k$ -ésima com

a  $(k - 2)$ -ésima mensagem. Assim, cada pacote transmitido, dentro de um *duty cycle*, é seguido por  $n$  pacotes codificados. Em uma sequência infinita de transmissões, cada mensagem aparece em uma janela de  $2n$  transmissões de mensagens codificadas mais a mensagem original.

Note que neste método, em teoria, existem infinitas combinações de mensagens recebidas que permitem a recuperação de um pacote originalmente perdido. Essas situações onde muitas mensagens são utilizadas para, recursivamente, decodificar uma pacote, requerem muitos recursos (*e.g.*, *buffers* de memória) e geram muita latência por causa do atraso de decodificação. Assim, a implementação desta técnica em dispositivos reais torna-se impraticável. Entretanto, a fim de tornar esta solução factível, a janela de decodificação para cada mensagem é limitada entre 3, ou seja, da  $(k - 3)$ -ésima até a  $(k + 3)$ -ésima, considerando  $n = 1$ . Para valores maiores de  $n$ , esta janela tende a aumentar, porém mantém-se o mesmo número de combinações de eventos que geram decodificação. Esta simplificação permite a dedução de uma equação fechada para a probabilidade de *outage* do CT-I, na qual depende de  $n$  e é derivada em [6]. Lembrando que, para o CT-I,  $M_{cti} = n + 1$ , o *outage* é

$$O_{CTI}(n) = O_M^{2n+1} (1 + O_M + O_M^2 + O_M^3 + O_M^4 + O_M^5)^{2n} \quad (3.11)$$

## Capítulo 4

### Replicação Híbrida de Mensagens

De acordo com [6], numa análise que não levava em conta a probabilidade de colisão diretamente, o método CT-I apresenta resultados significativamente melhores comparado ao método RT. Neste capítulo, a fim de otimizar a utilização de codificação considerando uma rede LORAWAN, foi desenvolvido um método híbrido, que é, na prática, uma generalização dos métodos RT e CT-I. Este método pode ser parametrizado com intuito de atingir ótima performance em termos de probabilidade de *outage*.

A ideia de um novo método surgiu quando, ao comparar os métodos RT e CT-I, percebeu-se que ambos possuem regiões ótimas de operação em função da probabilidade de *outage* do enlace. A intersecção entre esses pontos ótimos de operação se dá em uma região típica de operação de redes LORA, segundo trabalhos anteriores [7, 8]. Logo, percebe-se que nesta região de operação, e por consequência, em redes LORA, ambos os métodos possuem desempenho sub-otimizado. Assim, busca-se encontrar um método que seja um intermediário entre o RT e o CT-I com melhor desempenho para redes LORA.

Como qualquer método codificado, se a probabilidade de erro antes da decodificação for relativamente alta, a probabilidade de erro após a decodificação pode ser ainda maior. Assim, a base do método proposto é permitir que sejam enviadas réplicas da mensagem original (não codificada), o que gera robustez a uma alta probabilidade de erro antes da decodificação, assim como mensagens codificadas, o que gera mais robustez em cenários onde a probabilidade de erro antes da decodificação já seja pequena o suficiente. Por explorar as técnicas tanto do RT quando do CT-I, o método foi batizado como HT (do inglês, *Hybrid Transmission*).

O método HT proposto utiliza-se de três parâmetros:

1.  $n$ : Número de mensagens codificadas diferentes, o mesmo utilizado no método CT-I;
2.  $m$ : Número de mensagens não codificadas idênticas;
3.  $r$ : Número de mensagens codificadas idênticas.

Por exemplo, quando  $n = 2$  no método CT-I, um nó transmitiria a  $k$ -ésima mensagem seguida por duas mensagens codificadas:  $k$ -ésima  $\oplus$   $(k - 1)$ -ésima

Tabela 2: Expansão dos possíveis eventos do HT que possibilitam decodificação da  $k$ -ésima mensagem na janela  $k-3$  até  $k+3$  e  $n=1$ .

k-3		k-2		k-1		k		k+1		k+2		k+3	
M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R
						S							
				S		F	S						
						F		S	S				
		S		F	S	F	S						
						F		F	S	S	S		
S		F	S	F	S	F	S						
						F		F	S	F	S	S	S

e  $k$ -ésima ~~( $k-2$ )-ésima~~. No método HT, com  $n=2$ ,  $m=2$  e  $r=3$ , por exemplo, um nó transmitiria a  $k$ -ésima mensagem duas vezes ( $m=2$ ) e as duas mensagens codificadas ( $n=2$ , como no exemplo anterior) três vezes cada ( $r=3$ ). Como resultado desta abordagem, com HT,  $M_{HT} = m + nr$  é o número total de mensagens contendo informação original ou redundante dentro de um *duty cycle*.

Um conjunto de teoremas e lemas foram obtidos a fim de formular a probabilidade de *outage*, bem como outras características do método HT. Estes teoremas são apresentados e demonstrados na sequência.

**Teorema 1.** *A probabilidade de outage do HT com  $n=1$  é uma função de dois conjuntos de eventos independentes com probabilidade*

$$E_{n,m,r} = (1 - O_M^m)(1 - O_R^r) + O_M^m(1 - O_M^m)(1 - O_R^r)_M^2 + O_M^{2m}(1 - O_M^m)(1 - O_R^r)_M^3 \quad (4.1)$$

*Demonstração.* Considere a Tabela 2, onde cada célula indica se a decodificação de uma mensagem foi bem sucedida (S) ou não (F). Cada coluna representa um *duty cycle*, indo da  $(k-3)$ -ésima até a  $(k+3)$ -ésima mensagem. As colunas estreitas representam os pacotes contendo mensagens originais (não codificadas)  $M$  ou pacotes contendo mensagens codificadas  $R$ . Cada uma dessas colunas,  $M$  e  $R$ , representam eventos contabilizando as repetições,  $m$  e  $r$  respectivamente, para cada tipo de mensagem. Desta forma, um F em qualquer coluna representa um evento de *outage*. Assim, a probabilidade de *outage* de uma mensagem original é  $P(M=F) = O_M^m$  e a probabilidade de *outage* de uma mensagem codificada é  $P(R=F) = O_M^m O_R^r$ . É possível

identificar dois conjuntos de eventos independentes com a mesma probabilidade de ocorrência que possibilita a decodificação da  $k$ -ésima mensagem

caso a transmissão do pacote original falhe: i) os eventos que são combinações lineares da  $(k-1)$ -ésima mensagem, denotados por  $E_{H,1}$  e destacados em azul; ii) os eventos que são combinações lineares da  $(k+1)$ -ésima mensagem, denotados por  $E_{H,2}$  e destacados em verde. Utilizando ainda a Tabela 2 é possível determinar que a probabilidade de ocorrência desses eventos é  $P[E_{H,1}] = P[E_{H,2}] = E_{n,m,r}$ . Assim, a probabilidade de *outage* do HT para  $n=1$  pode ser determinada como a união dos eventos na Tabela 2, sendo a transmissão do pacote original (primeira linha na tabela) e os dois conjuntos de eventos independentes, dado que a mensagem original falhe. Desta forma,

$$\begin{aligned}
 O_{HT}(1, m, r) &= 1 - (1 - O_M^m) + O_M^m P_{E_{H,1}} E_{H,2} \\
 &= O_M^m - O_M^m (2E_{1,m,r} - E_{1,m,r}^2) \\
 &= O_M^m (O_M^{3m} + O_M^r + O_M^{m+r} - 2O_M^{2(m+r)} - O_M^{3(m+r)} \\
 &\quad + O_M^{2m+r} - 3O_M^{3m+r} - O_M^{m+2r} + 3O_M^{3m+2r} + O_M^{2m+3r})^2. \quad (4.2)
 \end{aligned}$$

□

**Teorema 2.** *O número de conjuntos de eventos independentes é igual à  $2n$ , onde*

$$P(E_{H,j}) = E_{n,m,r} : \forall j \in \{1, 2, \dots, 2n\}. \quad (4.3)$$

*Demonstração.* Cada conjunto de eventos independentes está relacionado a uma combinação linear com uma mensagem original. Segundo a Tabela 2, quando  $n=1$ , tem-se os eventos que são combinações lineares com a  $(k-1)$ -ésima e  $(k+1)$ -ésima mensagem. Com  $n=2$ , são incluídos ainda os eventos relacionados à  $(k-2)$ -ésima e  $(k+2)$ -ésima mensagem. Isto segue este comportamento de modo que os conjuntos serão combinações da  $(k-n)$ -ésima até  $(k+n)$ -ésima mensagem, totalizando uma quantidade de  $2n$  conjuntos de eventos independentes. □

**Teorema 3.** *A probabilidade de outage do HT para qualquer  $n$  é*

$$\begin{aligned}
 O_{HT}(n, m, r) &= O_M^n - O_M^n (1 - (1 - (1 - O_M^m)(1 - O_M^r))^n) \\
 &\quad - O_M^n (1 - O_M^m)(1 - O_M^r)^n \\
 &\quad - O_M^n (1 - O_M^m)(1 - O_M^r)^n. \quad (4.4)
 \end{aligned}$$

*Demonstração.* A partir do Teorema 2, sabe-se que existem  $2n$  conjuntos de eventos independentes. Similar à prova do Teorema 1, é possível determinar a probabilidade de *outage* de HT como a união dos  $2n$  eventos. Desta forma,

tem-se que

$$O_{HT}(n, m, r) = 1 - \sum_{m=1}^n (1 - O_M)^m + O_M \prod_{j=1}^m \sum_{E_{H,j}} \quad (4.5)$$

A probabilidade desta união pode ser interpretada similarmente a feita no método de diversidade RT, onde existe *outage* somente quando todos os  $2n$  eventos  $E_{H,j}$  falharem. Assim, a probabilidade de sucesso pode ser escrita como o seu complemento, de modo que

$$P \prod_{j=1}^{2n} E_{H,j} = 1 - (1 - E_{n,m,r})^{2^n} \quad (4.6)$$

Aplicando (4.6) em (4.5), pode-se obter (4.4).  $\square$

**Lema 1.** *O método HT é uma generalização do método RT.*

*Demonstração.*  $n$  representa a quantidade de diferentes codificações. Se  $n = 0$ , não há codificação alguma e somente réplicas da mensagem original são levadas em consideração. Note que quando  $n = 0$ , obrigatoriamente  $r = 0$ . Aplicando esses valores em (4.4), pode-se reduzi-la a (3.10), de modo que

$$O_{HT}(0, m, r) = O_{RT}(m). \quad (4.7)$$

$\square$

**Lema 2.** *O método HT é uma generalização do método CT-I.*

*Demonstração.* Quando utiliza-se  $m = r = 1$ , considera-se apenas uma transmissão para a mensagem original e uma para cada  $n$  mensagens codificadas, a mesma ideia do método CT-I. Aplicando esses valores em (4.4), pode-se reduzi-la a (3.11), de modo que

$$O_{HT}(n, 1, 1) = O_{CT-I}(n). \quad (4.8)$$

$\square$

**Lema 3.** *O consumo de energia no método HT é uma função linear de  $M$ .*

*Demonstração.* O modelo proposto assume que todas as mensagens originais possuem o mesmo tamanho, chamado  $L$ . Como os pacotes codificados são combinações lineares da informação de dois pacotes originais diferentes de tamanho  $L$ , a mensagem codificada resultante também será de tamanho  $L$ . A quantidade de energia consumida na transmissão de um pacote depende do

tempo que o transmissor mantém-se ligado, o que depende unicamente do tamanho do pacote, já que é assumido taxa de bit constante dentro de um único SF. Finalmente, o método HT consumirá uma quantidade de energia proporcional à  $M$ , ou seja, proporcional ao número total de pacotes utilizados na transmissão de uma mensagem.  $\square$

#### 4.1 Otimização do Alcance de Comunicação

Como o método HT possui múltiplas configurações, pode existir um conjunto ótimo de parâmetros de configuração  $O_{ot}$  utilizados, permitem o maior alcance de comunicação, enquanto mantém uma certa probabilidade de sucesso alvo  $T$ . No modelo proposto, como cada anel utiliza um SF diferente, eles podem ser tratados como canais diferentes e então é possível a utilização de parâmetros diferentes para cada SF.

Considere  $O_{SF} = n, m, r$  a configuração que proporciona o maior alcance de comunicação em um certo anel. Uma maneira de encontrar tais valores ótimos é a partir de uma função  $f(n, m, r, T)$  que retorna o máximo alcance de comunicação para cada SF. Como a probabilidade de sucesso alvo  $T_{alvo}$  é um valor fixo, o número de parâmetros é limitado por um número máximo de mensagens em um *duty cycle*  $M_{max}$  e a tripla  $(n, m, r)$  são valores inteiros, este problema de otimização pode ser modelado na forma de um ILP (do inglês, *Integer Linear Program*) [23]. Assim,

$$\begin{aligned}
 l &= \arg \max_{m, r, n \in \mathbb{Z}} f(n, m, r, T) \\
 \text{dado que: } & M = m + nr \leq M_{max} \\
 & T = T_{alvo} \\
 & m \geq 1 \\
 & n \geq 0 \\
 & r \geq 0.
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

A principal dificuldade na solução deste problema é encontrar, analiticamente, a função  $f$ , já que  $Q_1$  é resolvido numericamente. Por isso, propõe-se uma heurística, descrita pelo Algoritmo 1, para encontrar os parâmetros quase-ótimos, para cada método e cenário proposto. Inicia-se com uma rede com apenas o menor fator de espalhamento, SF7, e raio nulo, aumentando o raio do anel mais externo passo a passo, até que a probabilidade de sucesso alcance a probabilidade limiar  $T$  proposta. Este processo é feito para todos o conjunto de possíveis configurações do método e aquele que possibilitou o maior alcance é selecionado como “ótimo” para o respectivo SF. O mesmo processo é feito para todos os próximos SF em seus respectivos anéis, porém

---

**Algoritmo 1** Parâmetros de configuração quase-ótimos do método HT

**Entrada:** Conjunto de configurações  $O$ , probabilidade de sucesso limiar  $T$ , passo de distância  $z$

**Saída:** Raio dos anéis  $l = l_0 \dots l_6$ , parâmetros de configuração quase-ótimos  $O_{opt} = \{O_0, \dots, O_6\}$

$l \leftarrow \{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0\}$

**for**  $i \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$  **do**

$d[p] \leftarrow l[i+1] + z, \forall p \in O$

**for**  $p \in O$  **do**

$O \leftarrow O_{HT}(p, l[i], d)$

**if**  $O \leq 1 - T$  **then**

$d[p] \leftarrow d[p] + z$

**else**

*break*

**end if**

**end for**

$j \leftarrow \max_i(O)$

$l[i+1] \leftarrow d[j]$

$O_{opt}[i] \leftarrow O[j]$

**end for**

---

utilizando o alcance máximo anterior como ponto de partida. Note que este algoritmo é realizado em uma etapa *offline* em um cenário hipotético com densidade de nós conhecida. Sua principal função é estimar a capacidade da rede em termos de alcance e nós em cobertura, diferente do ADR, que funciona com uma rede em funcionamento e tenta atualizar os parâmetros ótimos para cada nó dentro da rede.

A partir dos Lemas 1 e 2, conclui-se que é possível encontrar as configurações para ambos casos RT e CT-I, já que o método HT é uma generalização de ambos. Para isso, deve-se limitar o conjunto de configurações  $O$  para os casos específicos RT ou CT-I, ou quaisquer outros conjuntos.

É importante ressaltar que o aumento do raio afeta as probabilidades de conexão  $H_1$  e de captura  $Q_1$ . Note que  $H_1$  é afetada pois a SNR tende a ser menor para maiores distâncias, enquanto  $Q_1$  diminui pois anéis maiores tendem a possuir mais nós, considerando densidade constante, aumentando a interferência média. Desta forma, é possível concluir que a probabilidade de sucesso é sensível a alterações no comprimento do raio, principalmente em cenários mais densos. O resultado dessa heurística é tão próximo do resultado ótimo quanto menor o valor do passo  $z$ . Entretanto, valores pequenos de  $z$  podem tornar essa técnica impraticável, devido à quantidade de processamento.

Assim, é recomendado valores maiores de  $z$  quando em cenários com maior densidade de transmissão de pacotes, por serem mais sensíveis ao acréscimo dos raios. Caso contrário, passos maiores devem ser utilizados.



## Capítulo 5

### Resultados Numéricos

Neste capítulo são avaliados os métodos propostos através de simulações em termos de probabilidade de sucesso e alcance máximo mantendo um grau de confiabilidade, que é diretamente relacionado ao número médio de usuários em cobertura. Cada ponto simulado é a média de  $10^5$  resultados de cenários aleatórios.

Para simular uma condição mais próxima da prática, ao invés de utilizar um número fixo de nós  $N$ , foi proposto a utilização de densidades de nós  $\rho$  constante na área, considerando uma aplicação de medição inteligente hipotética em duas cidades do Brasil: Florianópolis, que é uma cidade de médio porte, e São Paulo, a maior cidade do país. Foram obtidos dados sobre o número de residências privadas permanentes no Brasil, fornecidas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) [24], e considerado que cada residência teria um nó LORAWAN. Em seguida, cada densidade foi dividida por oito, representando os oito canais que um *gateway* LORAWAN pode processar paralelamente.

A menos que seja afirmado o contrário, foram utilizados os parâmetros apresentados na Tabela 4 e os parâmetros quase-ótimos  $O_{oi}$ , obtidos através do Algoritmo 1. Lembrando que de forma genérica  $M = M_{RT} = m + nr$ , o tamanho do conjunto de parâmetros aumenta rapidamente na medida que aumenta-se os limites das simulações em termos de número de replicações. Levando isso em conta, considerou-se  $M_{max} = 8$ , onde  $1 \leq M \leq 8$ . Também foram considerados diferentes probabilidades de sucesso alvo, onde  $T \in \{0, 90; 0, 95; 0, 99\}$ .

Tabela 3: Estatísticas das cidades [24] utilizadas para representar a densidade de nós LORAWAN com *gateway* de 8 canais

Parâmetros	Cenário 1	Cenário 2
Cidade	Florianópolis	São Paulo
Área ( $km^2$ )	675,41	1.521,11
Residências	147.406	3.573.509
Densidade Total (nodes/ $km^2$ )	218,25	2349,28
Densidade por Canal (nodes/ $km^2$ )	27,28	293,66

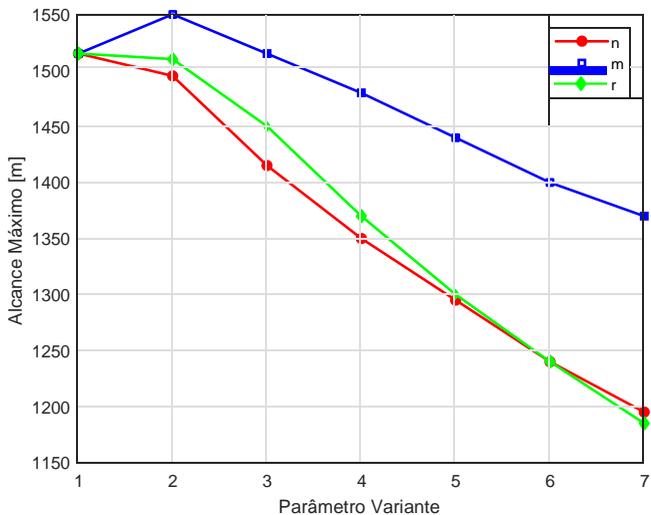
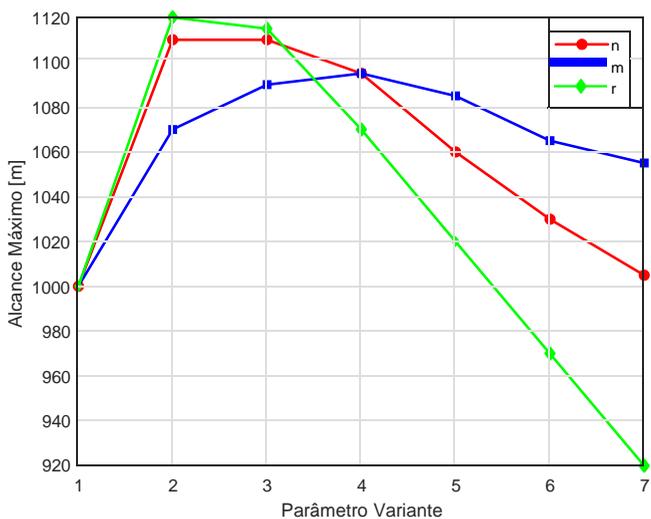
(a)  $T = 0,90$ (b)  $T = 0,99$ 

Figura 2: Alcance máximo de rede LORAWAN utilizando a mesma configuração em todos os anéis no cenário 2. Os parâmetros observados na legenda variam conforme o eixo x, enquanto os outros são unitários.

Tabela 4: Valores dos Parâmetros do Sistema.

Parâmetro	Valor
Expoente de perda de percurso, $\eta$	2,75
Frequência portadora, $f_c$	868 MHz
Potência de transmissão, $P_1$	19 dBm
Largura de banda, $B$	125 kHz
Figura de ruído do receptor, $N$	6 dB
<i>Duty cycle</i> , $p_0$	0,1%

A Figura 2 apresenta o impacto dos parâmetros de HT no alcance máximo da rede. Podemos perceber que para cada parâmetro e sucesso alvo  $T$  existem pontos ótimos diferentes. Pode-se perceber que dentro do escopo em termos de  $M$ , a função  $f$  utilizada pelo Algoritmo 1 possui um máximo, logo podem ser otimizadas. Observou-se comportamento semelhante nos outros casos. Outro resultado interessante é o do impacto maior de  $m$  com  $T = 0, 90$ , enquanto  $n$  e  $r$  apresentaram melhor resultado no cenário mais restritivo. Isto reforça a ideia de que a utilização de codificação possui maior impacto em casos de menor probabilidade de *outage* de enlace, quando comparados a casos de replicações simples como o RT. Por fim, também nota-se que o comportamento ótimo de  $r$  foi superior ao de  $n$ , porém o desempenho de  $r$  em relação a  $n$  cai com o aumento do número de réplicas.

Na Figura 3 pode-se perceber o comportamento de diferentes configurações do método HT para o mesmo número de réplicas dentro de um *duty cycle*,  $M = 4$ . A primeira curva, destacada em azul claro, apresenta a mesma configuração do método RT para esse número de réplicas, enquanto a última linha, destacada em magenta, mostra a configuração equivalente ao método CT-I com  $n = 3$ . Nota-se que o método RT apresenta melhor resultado considerando um baixo sucesso de enlace ( $< 0, 2$ ), e o equivalente ao CT-I desempenha melhor com um alto sucesso de enlace ( $> 0, 7$ ). Analisando os casos exclusivos de HT, é possível notar uma tendência de com o aumento de  $m$ , a probabilidade de *outage* de HT aproxima-se de RT, ou seja, possui melhor resultado em baixo sucesso de enlace. Em contraste, aumentar os valores de  $n$  e  $r$  melhora os resultados de enlace maiores, quando comparados com os demais. Por fim, pode-se perceber que a configuração  $(1, 2, 2)$  apresentou o melhor resultado com sucesso de enlace variando entre 0, 3 e 0, 7.

A Figura 4 compara os três métodos de replicação. Neste caso, primeiramente foram encontrados os máximos alcances para o método RT com  $T = 0, 90$  e  $M = 4$ . Após, as mesmas distâncias foram utilizadas no método CT-I com  $n = 3$  e HT com  $n = 1$  e  $m = r = 2$ . Pode-se perceber que o método

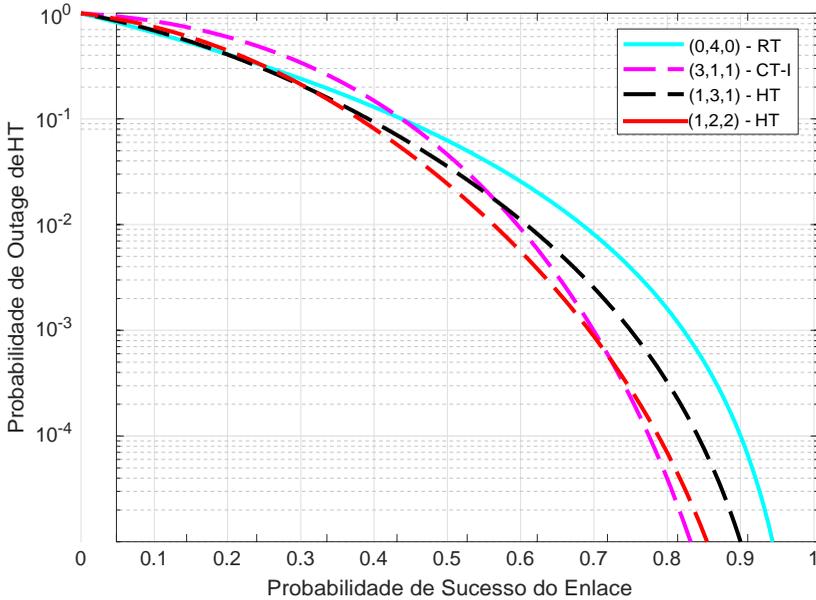


Figura 3: Comparação de todas as configurações do método HT para  $M = 4$ . A tripla na legenda representa a configuração  $(n, m, r)$  utilizada.

HT foi melhor que ambos CT-I e RT, enquanto CT-I foi um pouco melhor que RT. Nota-se também que a diferença entre RT e CT-I diminui à medida que a probabilidade de sucesso diminui.

A Tabela 5 apresenta o número de réplicas  $M$  para os métodos RT e CT-I, obtidas através do Algoritmo 1. É possível perceber que o método CT-I necessitou menos réplicas que o RT para alcançar seu melhor desempenho em todos os casos. CT-I também mostrou-se uma melhor estratégia para casos que necessitam de melhor confiabilidade, ou seja, é mais interessante aumentar  $n$  do que  $m$  e  $r$  nestes cenários. enquanto RT utilizou de 6 a 8 réplicas, o CT-I necessitou de 3 a 4.

A Tabela 6 mostra os parâmetros do método HT para cada fator de espalhamento e cenário proposto. Estes valores foram obtidos através do Algoritmo 1. Aqui percebe-se que o ganho em cobertura do HT em relação ao CT-I pode ser atribuído ao acréscimo no número de réplicas. Como HT possui mais opções de configuração, ele é mais adaptável a cenários específicos do que o CT-I. Os resultados na tabela mostram que em geral é mais vantajoso replicar uma única mensagem codificada ( $n = 1, r \geq 2$ ) do que enviar diversas mensagens codificadas diferentes ( $n \geq 2, r = 1$ ). Ainda, pode-se notar que

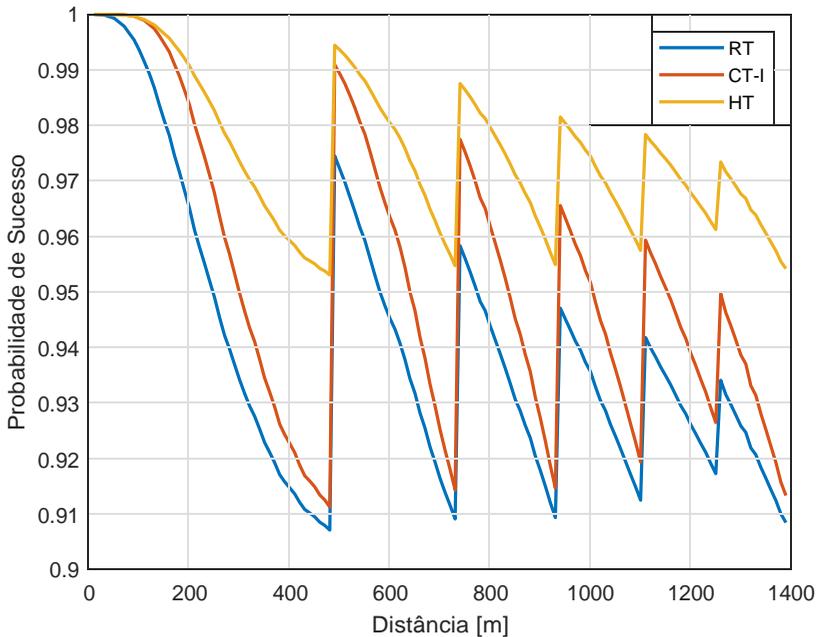


Figura 4: Comparação dos métodos RT, CT-I ( $M = 4$ ) e HT ( $n = 1, m = r = 2$ ), cenário 2,  $T = 0.9$  para o método RT e mesmos raios para os outros métodos.

todas as configurações utilizadas são exclusivas do método HT, não havendo nenhum caso particular de RT e CT-I.

As Figuras 5 e 6 mostram o comportamento da rede em termos de probabilidade de sucesso para ambos os cenários considerando  $T = \{0, 90; 0, 99\}$ . Por questões de clareza, o caso onde  $T = 0, 95$  não é mostrado pois mostraria informações similares. O método HT apresentou resultados superiores em todos os casos. É possível notar diversos picos de probabilidade de sucesso nas curvas, estes que representam as mudanças de SF. Percebe-se também que o máximo alcance de comunicação é maior para os métodos de transmissões mais robustos. Como pode ser visto, o método mais simples, DT (sem replicações), mostra um alcance de comunicação muito curto quando comparado com os demais, especialmente para  $T$  maiores. Ainda, percebe-se que a densidade de dispositivos, ou seja, os diferentes cenários neste caso, tem um importante impacto no alcance de comunicação devido ao aumento na interferência e consequentemente redução de  $Q_1$ .

A Figura 7 apresenta uma comparação dos métodos em termos do número médio de nós em cobertura. Nota-se que os métodos de replicação

Tabela 5: Número de réplicas  $M$  dos métodos RT e CT-I para os diferentes cenários, probabilidade de sucesso alvo e fatores de espalhamento.

Métodos	Cenários	$T$	SF7	SF8	SF9	SF10	SF11	SF12
RT	1	0.90	4	4	4	4	4	4
		0.95	5	5	5	5	5	5
		0.99	7	8	7	8	7	7
	2	0.90	3	3	3	3	3	3
		0.95	4	4	4	4	4	4
		0.99	6	6	6	6	6	6
CT-I	1	0.90	2	3	3	3	3	3
		0.95	3	3	3	3	3	3
		0.99	4	4	4	4	4	4
	2	0.90	2	2	2	2	2	2
		0.95	3	3	3	3	3	3
		0.99	3	3	3	3	3	3

tem um grande impacto no número de nós em cobertura, principalmente com  $T$  maiores. Lembrando que o modelo considera uma região circular, quanto maior o raio da região, maior é o impacto na área com o acréscimo do raio. Assim, mesmo as Figuras 5 e 6 apresentando pouca diferença no alcance máximo, pode-se notar o impacto pelo aumento da área em cobertura. Por exemplo, para  $T = 0,99$ , HT aumenta o número médio de nós em cobertura de 17 até 20 vezes nos Cenários 1 e 2, respectivamente, quando comparados ao DT. Ainda, pode-se notar que, quando comparado ao CT-I, para o Cenário 2, há um aumento proporcional no número médio de nós em cobertura em relação ao HT com o aumento de  $T$ .

Por fim, é importante ressaltar que nenhum dos casos apresentados teve um caso particular do RT ou CT-I como configuração ótima. Todos os casos obtiveram melhores resultados quando utilizadas configurações exclusivas do HT, com  $m$  ou  $r$  maiores que 1.

Tabela 6: Configuração ótima do HT para os diferentes cenários, probabilidade de sucesso alvo e fatores de espalhamento.

<i>T</i>		Cenário 1			Cenário 2		
		0,90	0,95	0,99	0,90	0,95	0,99
<b>SF7</b>	<b>n</b>	1	1	1	1	1	1
	<b>'''</b>	2	2	2	2	2	2
	<b>r</b>	2	2	3	1	2	3
	<b>M</b>	4	4	5	3	4	5
<b>SF8</b>	<b>n</b>	1	1	1	1	1	1
	<b>'''</b>	2	2	2	2	2	2
	<b>r</b>	2	2	3	1	2	3
	<b>M</b>	4	4	5	3	4	5
<b>SF9</b>	<b>n</b>	1	1	1	1	1	1
	<b>'''</b>	2	2	2	2	2	2
	<b>r</b>	2	2	3	1	2	3
	<b>M</b>	4	4	5	3	4	5
<b>SF10</b>	<b>n</b>	1	1	1	1	1	1
	<b>'''</b>	2	2	2	2	2	2
	<b>r</b>	2	2	3	1	2	2
	<b>M</b>	4	4	5	3	4	4
<b>SF11</b>	<b>n</b>	1	1	1	1	1	1
	<b>'''</b>	2	2	2	2	2	2
	<b>r</b>	2	2	3	1	2	3
	<b>M</b>	4	4	5	3	4	5
<b>SF12</b>	<b>n</b>	1	1	1	1	2	1
	<b>'''</b>	2	2	2	2	2	2
	<b>r</b>	2	2	3	1	1	3
	<b>M</b>	4	4	5	3	4	5

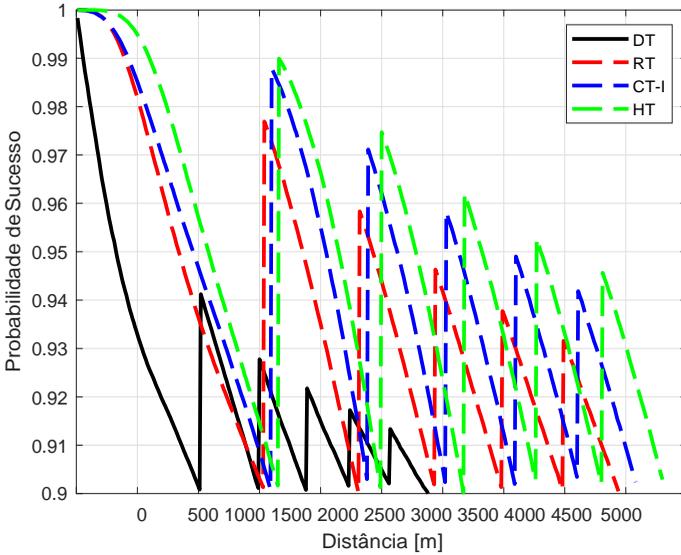
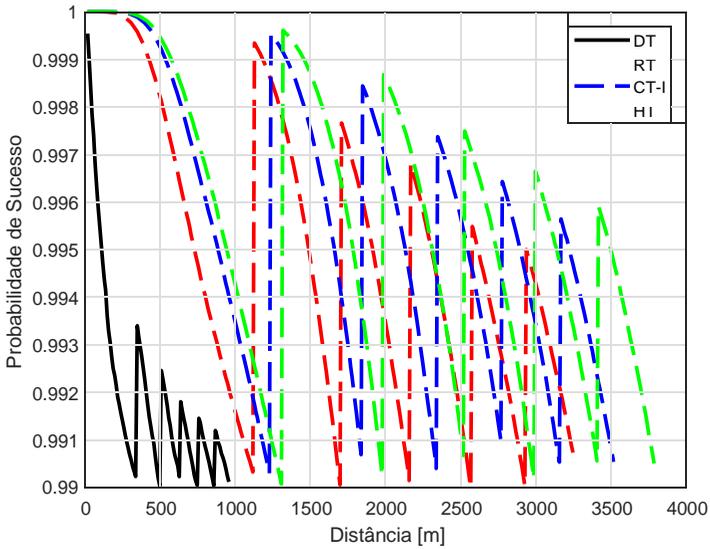
(a)  $T = 0.90$ (b)  $T = 0.99$ 

Figura 5: Probabilidade de sucesso para diferentes métodos de replicação dado uma probabilidade de sucesso alvo para o Cenário 1.

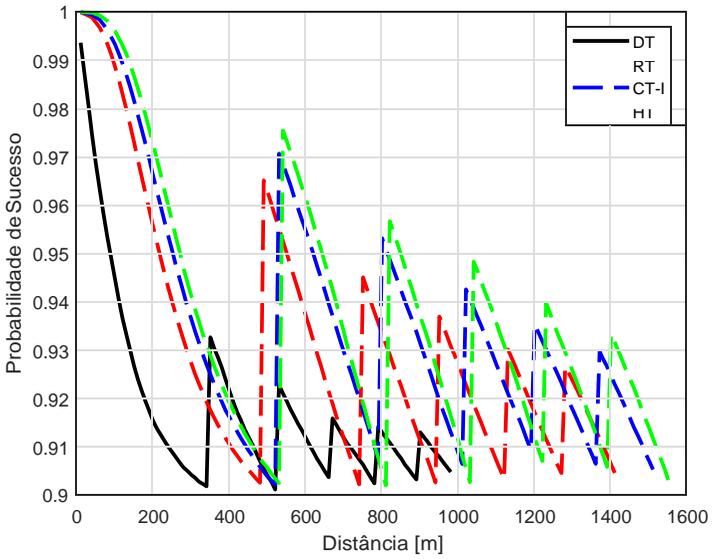
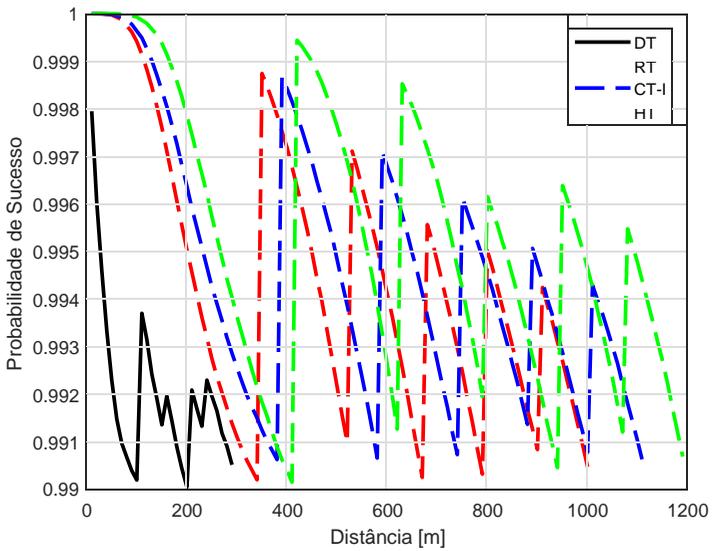
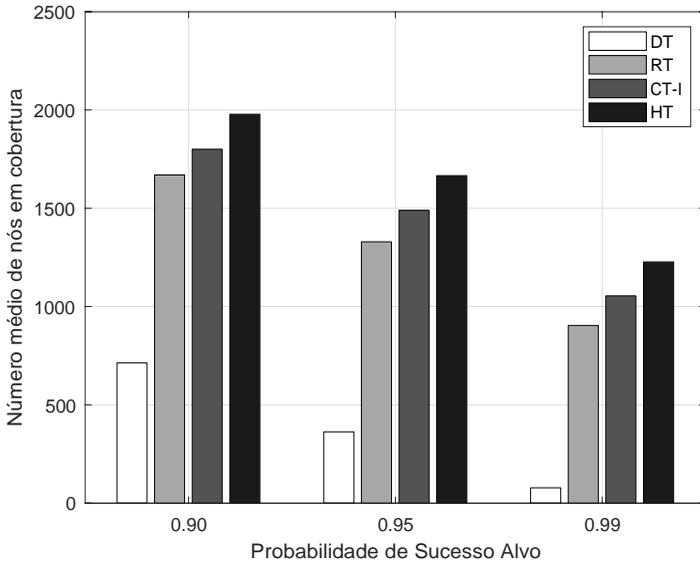
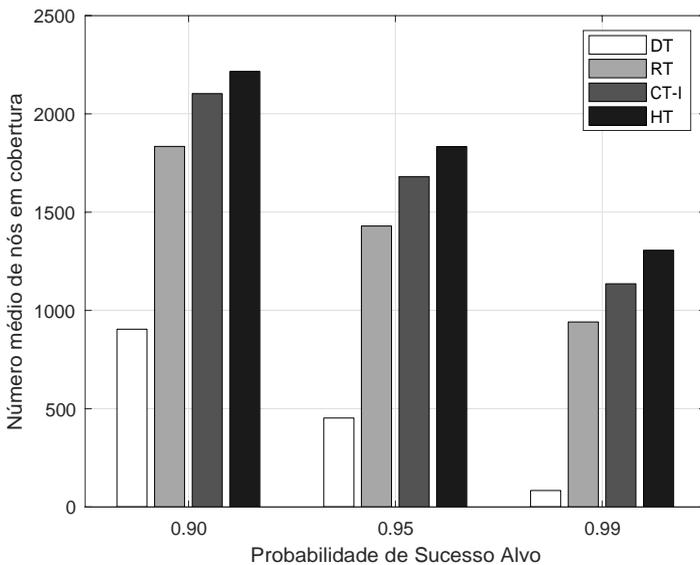
(a)  $T = 0.90$ (b)  $T = 0.99$ 

Figura 6: Probabilidade de sucesso para diferentes métodos de replicação dado uma probabilidade de sucesso alvo para o Cenário 2.



(a) Cenário 1



(b) Cenário 2

Figura 7: Número médio de nós em cobertura para diferentes métodos de replicação, cenários e probabilidade de sucesso alvo.

## Capítulo 6

### Conclusão

Este trabalho apresentou um novo método híbrido de transmissão de mensagens codificadas (HT) com foco em redes LORAWAN. O trabalho descreve o método proposto e mostra que ele é mais configurável e também uma generalização dos métodos de replicação de mensagens simples (RT) e do método de transmissão de mensagens codificadas independentes (CT-I), previamente propostos na literatura. Os modelos gerados para o método HT incluem equações de *outage* que levam em consideração a condição da SNR para os sinais recebidos, bem como a interferência gerada por outros nós (colisões). Foi realizada a busca pelas melhores configurações para todos os métodos em cada cenário diferente. A otimização propõe a máxima extensão do alcance de cobertura enquanto garante um certo nível de confiabilidade.

O método HT foi avaliado e otimizado via simulações e comparado com os resultados de ambos RT e CT-I, considerando cenários urbanos densos. Foi possível mostrar que as configurações otimizadas de HT desempenharam melhor que as configurações RT e CT-I em termos de probabilidade de sucesso e em alcance máximo de comunicação. Como o método HT apresentou mais opções de configuração, ele foi capaz de adaptar-se melhor que o CT-I. Concluiu-se ainda que, nos casos apresentados, a replicação da mensagem original e codificadas,  $m$  e  $r$  respectivamente, apresentaram resultados melhores do que criar novas codificações pelo aumento de  $n$ . Entretanto, o aumento de  $n$  não deve ser descartado, já que é possível diminuir o *outage* de enlace com outras técnicas. Considerando os resultados apresentados em [7] e [8], e que o *outage* de enlace tende a crescer junto com  $M$  e em casos sem outras técnicas de diversidade, existirão poucos casos onde o sucesso de enlace será maior que 0,7. Desta forma, o método HT deve desempenhar ainda melhor quando utilizado em conjunto com outras técnicas que diminuem o *outage* de enlace.

#### 6.1 Trabalhos Futuros

Existem várias possibilidades de extensão ou de variação do método proposto e do modelo utilizado neste trabalho, assim como da análise de desempenho que foi realizada. Por exemplo:

- Utilização de controle de potência, de modo que nós mais próximos da borda interior de seus anéis utilizem menos potência de transmissão, devido a sofrerem menos com a perda de percurso do que os nós das bordas exteriores.
- Análise do atraso médio de decodificação dos métodos de replicação apresentados neste trabalho.
- Análise da rede LORAWAN utilizando o método HT em conjunto com técnicas de diversidade espacial, como múltiplas antenas ou múltiplas *gateways*.
- Extensão do modelo para outras tecnologias, como SIGFOX, e sua análise frente a utilização dos métodos de replicação apresentados neste trabalho.
- Análise de algoritmos dinâmicos na parametrização dos métodos de replicação.

## Referências Bibliográficas

- [1] M. Centenaro, L. Vangelista, A. Zanella, and M. Zorzi, “Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 23, no. 5, pp. 60–67, Oct 2016.
- [2] J. Petäjäjärvi, K. Mikhaylov, M. Hamalainen, and J. Iinatti, “Evaluation of LoRa LPWAN technology for remote health and wellbeing monitoring,” in *10th Int. Symp. on Medical Inform. and Commun. Technol. (ISMICT)*, Mar 2016.
- [3] D. Yim, J. Chung, Y. Cho, H. Song, D. Jin, S. Kim, S. Ko, A. Smith, and A. Riegsecker, “An experimental lora performance evaluation in treefarm,” in *2018 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, March 2018, pp. 1–6.
- [4] M. de Castro Tomé, P. H. J. Nardelli, and H. Alves, “Long-range low-power wireless networks and sampling strategies in electricity metering,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 2, pp. 1629–1637, Feb 2019.
- [5] TTN: The Things Network. (2018, Nov) The things network website. [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/>
- [6] S. Montejo-Sánchez, C. A. Azurdia-Meza, R. D. Souza, E. M. G. Fernandez, I. Soto, and A. Hoeller, “Coded redundant message transmission schemes for internet-of-things application,” *to appear in IEEE Wireless Communications Letter*, 2019.
- [7] O. Georgiou and U. Raza, “Low power wide area network analysis: Can LoRa scale?” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 6, no. 2, pp. 162–165, Apr 2017.
- [8] A. Hoeller, R. D. Souza, O. L. A. López, H. Alves, M. de Noronha Neto, and G. Brante, “Analysis and performance optimization of lora networks with time and antenna diversity,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 32820–32829, 2018.
- [9] K. Mikhaylov, J. Petäjäjärvi, and T. Haenninen, “Analysis of capacity and scalability of the lora low power wide area network technology,” in *European Wireless 2016; 22th European Wireless Conference*, May 2016, pp. 1–6.

- [10] M. Bor, U. Roedig, T. Voigt, and J. M. Alonso, "Do LoRa low-power wide-area networks scale?" in *19th ACM Int. Conf. on Modeling, Anal., and Simulation of Wireless Mobile Syst. (MSWiM)*, New York, USA, 2016, pp. 59–67.
- [11] F. Cuomo, M. Campo, and A. Caponi, "EXPLoRa: Extending the performance of lora by suitable spreading factor allocations," in *IEEE 13th Int. Conf. on Wireless and Mobile Computing, Networking and Commun. (WiMOB)*, 2017.
- [12] F. Cuomo, J. C. C. Gámez, A. Maurizio, L. Scipione, M. Campo, A. Caponi, G. Bianchi, G. Rossini, and P. Pisani, "Towards traffic-oriented spreading factor allocations in lorawan systems," in *2018 17th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net)*, June 2018, pp. 1–8.
- [13] V. Hauser and T. Hégr, "Proposal of adaptive data rate algorithm for lorawan-based infrastructure," in *2017 IEEE 5th International Conference on Future Internet of Things and Cloud (FiCloud)*, Aug 2017, pp. 85–90.
- [14] M. Slabicki, G. Premsankar, and M. D. Francesco, "Adaptive configuration of lora networks for dense iot deployments," in *NOMS 2018 - 2018 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium*, April 2018, pp. 1–9.
- [15] K. Q. Abdelfadeel, V. Cionca, and D. Pesch, "Fair adaptive data rate allocation and power control in lorawan," in *2018 IEEE 19th International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks" (WoWMoM)*, June 2018, pp. 14–15.
- [16] P. J. Marcelis, V. S. Rao, and R. V. Prasad, "Dare: Data recovery through application layer coding for lorawan," in *2017 IEEE/ACM Second International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation (IoTDI)*, April 2017, pp. 97–108.
- [17] M. Sandell and U. Raza, "Application layer coding for iot: Benefits, limitations, and implementation aspects," *IEEE Systems Journal*, pp. 1–8, 2018.
- [18] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, "Low power wide area networks: An overview," *IEEE Commun. Surveys Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 855–873, Apr 2017.

- [19] D. Croce, M. Gucciardo, S. Mangione, G. Santaromita, and I. Tinnirello, "Impact of lora imperfect orthogonality: Analysis of link-level performance," *IEEE Communications Letters*, vol. 22, no. 4, pp. 796–799, April 2018.
- [20] *SX1272/73 - 860 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver*, Semtech, March 2017, rev. 3.1.
- [21] *AN120.22 LoRa Modulation Basics*, Semtech Corporation, Mar 2015.
- [22] *LoRaWAN 1.1 Specification*, LoRa Alliance, Oct. 2017.
- [23] A. Schrijver, *Theory of linear and integer programming*, ser. Wiley-Interscience series in discrete mathematics and optimization. Wiley, 1999.
- [24] IBGE. (2010) Censo demográfico. [Online]. Available: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil>