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

FELIPE GONSALEZ HONÓRIO

EFEITO DO DESVANECIMENTO NAKAGAMI-M NA ESCALABILIDADE DAS REDES LORA/LORAWAN

DISSERTAÇÃO

CURITIBA
2018

FELIPE GONSALEZ HONÓRIO

EFEITO DO DESVANECIMENTO NAKAGAMI-M NA ESCALABILIDADE DAS REDES LORA/LORAWAN

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de "Mestre em Engenharia Elétrica" – Área de Concentração: Telecomunicações e redes.

Orientador: Prof. Glauber Gomes de Oliveira Brante

Coorientador: Prof. Guilherme Luiz Moritz

CURITIBA
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

H774e
2018

Honório, Felipe Gonsalez
Efeito do desvanecimento Nakagami-m na escalabilidade das redes LoRa/LoRaWAN / Felipe Gonsalez Honório.-- 2018.
48 f.: il.; 30 cm.

Disponível também via World Wide Web.
Texto em português com resumo em inglês.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Área de Concentração: Telecomunicações e Redes, Curitiba, 2018.
Bibliografia: f. 45-46.

1. Redes de sensores sem fio. 2. Rádio - Transmissores e transmissão - Desvanecimento. 3. Redes de computação - Escalabilidade. 4. Sistemas de comunicação sem fio. 5. Redes de longa distância (Redes de computação). 6. Internet das coisas. 7. Simulação (Computadores). 8. Engenharia elétrica - Dissertações. I. Brante, Glauber Gomes de Oliveira, orient. II. Moritz, Guilherme Luiz, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. IV. Título.

CDD: Ed. 23 -- 621.3

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

Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS CURITIBA

TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 789

A Dissertação de Mestrado intitulada **"Efeito do Desvanecimento Nakagami-m na Escalabilidade das Redes LoRa/LoRaWAN"** defendida em sessão pública pelo(a) candidato(a) **Felipe Gonsalez Honório**, no dia 26 de março de 2018, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Ciências, área de concentração Telecomunicações e Redes, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial.

BANCA EXAMINADORA:

Prof(a). Dr(a). Glauber Gomes de Oliveira Brante - Presidente - (UTFPR)
Prof(a). Dr(a). Evelio Martin Garcia Fernandez - (UFPR)
Prof(a). Dr(a). Mauro Sergio Pereira Fonseca - (UTFPR)

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

Curitiba, 26 de março de 2018.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao orientador Prof. Glauber pelo tempo disponibilizado, pela paciência, conhecimentos transmitidos e exemplo de profissional dedicado, refletindo no meu interesse pela engenharia e contribuindo para a minha formação profissional.

Agradeço ao Prof. Guilherme pela grande ajuda na parte prática deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio à pesquisa por meio da bolsa de estudos de Mestrado.

Ao Prof. Humberto Gamba que também me motivou para ingressar no mestrado.

Aos meus pais, Jair e Siméia, pelo apoio incondicional à minha formação.

À Deus.

Sola Fide, Sola Scriptura, Sola Christus, Sola Gratia et Soli Deo Gloria.

RESUMO

HONORIO, Felipe Gonsalez. Efeito do Desvanecimento Nakagami-m na Escalabilidade das Redes LoRa/LoRaWAN. 50 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

No contexto de Internet das Coisas (IoT em inglês *Internet of Things*), este trabalho contempla um estudo da escalabilidade de uma rede de sensores sem fio LoRa/LoRaWAN em ambientes com desvanecimento. Para isto, através de simulações computacionais foi averiguado o efeito do desvanecimento modelado por um canal Nakagami-m na quantidade máxima de nós que pode ser colocada em uma determinada região para que a taxa de extração de dados seja compatível com os requisitos de algumas aplicações típicas de IoT. Os resultados mostram que a escalabilidade da rede LoRa diminui consideravelmente, com a quantidade de dispositivos reduzidas de 3 a 6 % para o canal Nakagami-m com $m = 2$, característico de cenários com uma parcela grande de linha de visada, e de 9 a 18% em canais Nakagami-m com $m = 1$, equivalente ao canal *Rayleigh* que não apresenta linha de visada em comparação com o canal AWGN. Além disso, foi demonstrado que existe um fator de espalhamento ótimo que depende da densidade de nós da rede e do *duty cycle*. Com fatores de espalhamento menores, observa-se que a quantidade de erros devido às perdas por desvanecimento é dominante na quantidade de erros total, representando mais de 86% dos casos de perda de pacotes. Entretanto, quando o fator de espalhamento aumenta, a robustez do receptor aumenta, consequentemente reduzindo a probabilidade de erro em função do desvanecimento. Por outro lado, a quantidade de colisões começa a se tornar significativa, uma vez que o tempo de propagação de cada símbolo aumenta com o SF.

Palavras-chave: LoRa, LoRaWAN, desvanecimento, escalabilidade.

ABSTRACT

HONORIO, Felipe Gonsalez. Effect of Nakagami-m Fading on the Scalability of LoRa/LoRaWAN Networks. 50 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

In the context of Internet of Things (IoT), this work studies the scalability of LoRa/ LoRaWAN wireless sensor networks in fading environments. To that end, we employ computer simulations in order to look at the effect of the wireless fading modeled by a Nakagami-m distribution on the maximum number of nodes that can be placed in a given region, constrained to a minimal data extraction rate compatible with typical IoT applications. The results show that the scalability of the LoRa network decreases considerably, with the number of devices reduced from 3 to 6% for the Nakagami-m channel with $m = 2$, characteristic of line-of-sight scenarios, and of 9 to 18% in Nakagami-m channels with $m = 1$, equivalent to the Rayleigh channel without line-of-sight, compared to the AWGN channel. In addition, it has been shown that there is an optimal spreading factor (SF) that depends on the network node density and duty cycle. With smaller SFs it is observed that the amount of errors due to fading losses is dominant in the total amount of errors, representing more than 86% of packet loss cases. However, when the SF increases, the robustness of the receiver also increases, consequently reducing the probability of error in function of the fading. On the other hand, the number of collisions begins to become significant, since the propagation time of each symbol increases with the SF.

Keywords: LoRa, LoRaWAN, scalability, fading.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diferentes tecnologias em relação a taxa de dados (Mbps) e distância, os quadros em cinza escuro são voltadas para maior eficiência energética priorizando o alance ao invés de taxas elevadas. Autoria própria 18
Figura 2 – LoRaWAN, cada rede tem um gateway que está vinculado à internet através de um servidor. Autoria própria. 19
Figura 3 – Estrutura de um pacote LoRa. Autoria própria. 21
Figura 4 – Tempo de propagação do quadro em função do fator de espalhamento SF e banda BW para um pacote de 20 bytes. Nota-se que o incremento de SF aumenta significativamente o tempo. 23
Figura 5 – Simulação, cada nó é uma estrutura de dados e tem um *handler* para a função de transmissão, quando há conflito (CAD: *channel access detection*) é aberta uma rotina para avaliar se houve ou não colisão. Autoria própria. 29
Figura 6 – Detalhes da simulação, após inicializar as condições de canal e posicionamento (cada objeto tem seus atributos de localização e aspectos do RF), a estrutura espera o sistema disparar o evento de transmissão (há um contador para cada nó e um *offset* pseudo-aleatório), após o disparo do evento, abre-se uma rotina para contabilizar os acertos ou erros e analisar as colisões. Autoria própria. 30
Figura 7 – Posicionamento de 50 nós no plano cartesiano, a circunferência é o limite do enlace considerando a margem de perdas. 31
Figura 8 – GUI do simulador LoRaSim utilizando o framework dotNet 4.0, implementado na linguagem C# e integra com o *script* python através de um "socket" UDP no *LocalHost* 32
Figura 9 – Ruído AWGN é incrementado aleatoriamente e o desvanecimento sobrepõe a amplitude do sinal. Autoria própria 33
Figura 10 – PDF da distribuição Nakagami-m. 34
Figura 11 – *Received signal strength indicator* (RSSI) no receptor, caracterizando a propagação em pequena escala. 35
Figura 12 – Software para programação do rádio e aquisição da relação sinal ruído e RSSI dos pacotes recebidos. 36
Figura 13 – Histograma das amostras de RSSI normalizadas e linearizadas, sendo $\texttt{Norm}(P_x) = 1$ correspondente à -63dBm, o valor médio esperado de P_{rx} com a perda de percurso P_L. 36
Figura 14 – Probabilidade de sucesso (ou *data extraction rate* – DER) em função do número de nós para os canais AWGN, Rayleigh e Nakagami-m com $m = 2,3$ com BW de 125kHz e SF=12 (padrão do LoRaWAN) 39
Figura 15 – DER em função da taxa de espalhamento espectral (SF) para bandas de 500kHz, com {50,100,200,300} nós. 40
Figura 16 – DER em função da taxa de espalhamento espectral (SF) para bandas de 250kHz, com {50,100,200,300} nós. 40

Figura 17– DER em função da largura de banda (BW) para uma rede com $\{50, 100, 200, 300\}$ nós. 41
Figura 18 – DER em função da taxa de espalhamento espectral (SF) para uma rede com $\{50, 100, 200, 300\}$ nós, com BW=125kHz 41
Figura 19 – Comparativo entre os tipos de canais e cenários com o número de nós que garantem um DER acima de 70 % válido para um intervalo de confiança de $\pm 1\%$ 43
Figura 20 – Amostras das ocorrências de outage e perdas por colisão em uma rede de 400 nós, as barras à direita do SF são do canal Nakagami m=2.3, as barras alinhadàs ao SF são para m=1 e as outras são do canal AWGN. O *outage* para o caso AWGN é mínimo - cerca de 1% 43
Figura 21 – Comparação AWGN e Canal Nakagami (m=1). Os 3 motivos de colisão: C_F *frames* de mesmo canal (portadoras de mesma frequência f_c ou dentro do limite de banda), C_P é quando a diferença de potência (dos sinais interferentes) fica acima do limiar $P_{lim} > 6dB$, C_T são as ocorrências no tempo de transmissão do datagrama. 44
Figura 22 – Comparação AWGN e Canal Nakagami (m=2,3), o aumento de C_F para SF menores é causado pela redução de C_T. Ele é amenizado com as perdas do desvanecimento pois as chances de um segundo pacote superar o limiar de 6dB é menor. 44
Figura 23 – Rádio LoRa 49
Figura 24 – Diagrama de blocos do kit LoRa, o módulo inair9 é uma placa de circuito impresso com todos os componentes mínimos para operar o RF. Balun é o casador de impedância com saída para o conector SMA. Reg. é o regulador de tensão 3v3, Osci é o oscilador de 32MHz com os devidos filtros, FTDi é um *chipset* que adiciona a interface UART serial para o barramento USB do computador. 50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Algumas medições da potência no receptor (em Watts) realizadas através de médias sucessivas do descritor RSSI para uma distância conhecida e P_{tx} conhecida 36
Tabela 2 – Lista de parâmetros de simulação. 38
Tabela 3 – Escalabilidade da rede Lora. Número de dispositivos suportados para garantir uma DER acima de 70%, Ch é o número de canais *uplink* e d é o *duty cycle* médio, a tolerância para o número de nós é de 1% 42

LISTA DE SIGLAS

ARQ	Automatic Repeat Query
AWGN	Additive white Gaussian noise
BW	Bandwidth
CAD	Channel Access Detection
CR	Code Rate
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSS	Chirp Spreading Spectrum
DER	Data Extraction Rate
FEC	Forward Error Correction
FER	Frame Error Rate
FIFO	First In, First Out
GPRS	General Packet Radio Service
GUI	Graphical User Interface
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
ISM	Industrial, Scientific and Medical
LPWAN	Low Power Wide Area Network
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium Access Control
NF	Noise Figure
PDF	Função de Densidade de Probabilidade
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
RF	Radio Frequency
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SC	Selection Combining
SF	Spreading Factor
SNR	Signal to Noise Ratio
SPI	Serial Peripheral Interface bus
TCP	Transmission Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol
UHF	Ultra High Frequency
WAN	Wide Area Network

LISTA DE SÍMBOLOS

$\chi\sigma$	Sombreamento
σ	Variança
υ	Região euclidiana
C_F	Colisão na frequência
C_P	Colisão na potência
C_T	Colisão no tempo
E_{col}	Eventos de colisão
f_c	Frequência de portadora
h	Coeficiente de desvanecimento
L_pl	Perda de percurso
m	Parâmetro Nakagami
n	Ajuste de percurso
N_{pre}	Número de símbolos no preâmbulo
N_0	Potência de ruído
P_{falha}	Probabilidade de falha
P_{out}	Probabilidade de Outage
P_{rx}	Potência no receptor
P_{tx}	Potência de transmissão
R	Alcance
r	Taxa de código
R_b	Taxa de bits
R_s	Taxa de símbolo
S	Sensibilidade do receptor
T_{Pl}	Tempo de propagação
T_s	Tempo de símbolo
y	Vetor de símbolos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO **14**
1.1 OBJETIVOS 16
1.1.1 Objetivo Geral 16
1.1.2 Objetivos Específicos 16
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO 16
2 TECNOLOGIA LORA E LORAWAN **18**
2.1 POTÊNCIA DE TRANSMISSÃO E FREQUÊNCIA DA PORTADORA 19
2.2 FATOR DE ESPALHAMENTO ESPECTRAL (SF) 19
2.3 LARGURA DE BANDA (BW) 20
2.4 TAXA DE CÓDIGO (CR) 21
2.5 ESTRUTURA DO PACOTE LORA 21
2.6 TEMPO DE PROPAGAÇÃO 21
3 MODELO DO SISTEMA E FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO **24**
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO ENLACE DE COMUNICAÇÃO SEM FIO 24
3.2 COLISÃO EM TRANSMISSÕES LORA 25
3.2.1 Colisão devido à potência 25
3.2.2 Colisão no tempo 26
3.2.3 Colisão devido à frequência de portadora 26
3.2.4 Colisão devido ao fator de espalhamento 26
3.2.5 Evento de colisão 27
3.3 FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO 28
4 CARACTERIZAÇÃO DO CANAL SEM FIO **33**
4.1 NAKAGAMI-M 33
4.1.1 Determinação dos Parâmetros Nakagami-m 34
4.1.2 Modelos de Propagação 35
5 RESULTADOS **38**
5.1 IMPACTO DO DESVANECIMENTO NO DESEMPENHO DA REDE 38
5.2 ESCALABILIDADE DA REDE LORA 40
6 CONCLUSÃO **45**
REFERÊNCIAS **47**
Anexo A – FIRMWARE E HARDWARE DO LORA **49**

1 INTRODUÇÃO

O conceito de Internet das Coisas (IoT: *Internet of Things*) está amplamente destacado no setor de Tecnologia da Informação e Comunicação. Segundo Business-Insider (2015), o número global de dispositivos conectados à internet deverá saltar de cerca de 10 bilhões em 2015 para 34 bilhões até 2020, resultando em uma média superior a 4 dispositivos por pessoa, gerando receitas que poderão contribuir com até 11% do PIB mundial. Para dar suporte a esta demanda por conectividade, bem como por novos produtos e aplicações, diversos desafios estão lançados, tais como infraestrutura e tecnologias de comunicação sem fio para prover acesso de dados aos dispositivos em diferentes cenários. Com este uso massivo de aparelhos IoT para diversas aplicações econômicas e domésticas é notório que o uso de muitos dispositivos sem fio sejam instalados indiscriminadamente e geralmente ficam conectados em uma rede autônoma continuamente, porém a funcionalidade e disponibilidade passará por diversos obstáculos.

Existem aplicações as quais os aparelhos não podem ficar ligados na rede elétrica diretamente. Logo, operam com baterias e tem recursos muito limitados de energia, por consequência, o tempo de operação é reduzido. Entretanto, eles podem estar conectados em uma rede LPWAN (*Low Power Wide Area Network*) para certificar uma melhora na vida útil da bateria através de um melhor condicionamento nos processos de comunicação. Existe uma variedade de tecnologias de telecomunicação disponíveis que se encaixam em diferentes situações de aplicações da IoT. As mais destacadas para aplicações de proximidade (alcance de até 60m) são Zigbee, Bluetooth *Low Energy*, *Low-Power* Wi-Fi e a pilha da IEEE802.15.4. Algumas tecnologias recentes para redes de baixa potência e longo alcance são LoRa, SimpleLink, SIGFOX, RPMA e as redes celulares (ANDREEVY, 2015).

Estima-se que em 2020 haverá mais aparelhos com conexões entre máquinas (M2M: *Machine-to-Machine*) do que dispositivos celulares e computadores (RAZA, 2017). Estas tecnologias diferem em diversos aspectos como técnicas de modulação, largura de faixa utilizada, taxas de transmissão e topologia de rede. Por outro lado, trabalhos recentes têm mostrado algumas limitações na capacidade e escalabilidade das redes LoRaWAN. Em (MIKHAYLOV et al, 2016), os autores consideraram a norma Europeia para a faixa de frequência ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) 868 MHz para determinar a capacidade teórica para uma célula do LoRaWAN, bem como a densidade de nós por km^2 para diversos cenários de aplicações e diferentes configurações de taxas de dados. Os resultados apresentados mostram que a grande maioria dos nós deve ficar nas

proximidades do *gateway*, limitando os tipos de aplicações e o alcance da tecnologia. Em uma linha semelhante, os autores em (BOR et al., 2016), considerando parâmetros práticos e utilizando uma ferramenta de simulação, mostraram que o desempenho da rede cai à medida que o número de nós aumenta, isto válido para uma configuração estática da rede e com um *gateway* que comporta aproximadamente 120 nós mantendo uma taxa de extração de dados superior a 90%. O mesmo trabalho mostra que a capacidade da rede se torna consideravelmente maior se forem utilizados múltiplos *gateways* e redes com configuração dinâmica. Resultados semelhantes, obtidos com ferramentas de análise teórica também são apresentados em (GEORGIOU et al, 2017), em que os autores mostram que o desempenho da rede cai exponencialmente com o aumento do número de nós. Em (VOIGT et al,. 2016), os autores realizaram um estudo baseado em simulação mostrando que o uso de antenas diretivas e múltiplos *gateways* podem melhorar o desempenho de redes LoRaWAN em cenários com interferência entre redes LoRaWAN.

Os trabalhos sobre desempenho da tecnologia LoRaWAN citados acima consideraram apenas modelos de propagação larga escala, não levando em consideração nas análises o efeito da propagação em pequena escala (desvanecimento), a qual tem forte impacto no desempenho de sistemas de comunicação sem fio sem linha de visada (GOLDSMITH, 2006). Neste contexto, este trabalho faz uma análise através de uma simulação computacional de eventos discretos utilizando a linguagem Python (MATLOFF, 2008) sobre o efeito do *fading* na escalabilidade da tecnologia LoRaWAN.

Neste trabalho os aparelhos situados na rede são sensores (também chamados de nós), eles operam com baixas taxas de transferência e tamanho de pacote reduzido (menos de 256 bytes). Por exemplo: sensores de presença, pois apenas 1 byte é necessário para indicar uma ocorrência ou sensores de temperatura para aplicações domésticas e industriais, os quais não necessitam mais do que 2 bytes para operarem. (AUGUSTIN, 2016).

Os resultados mostram que a escalabilidade da rede LoRa, medida pela quantidade máxima de nós que pode ser colocada em uma determinada região para que a probabilidade de sucesso se mantenha superior a 70%, diminui consideravelmente nos cenários com desvanecimento, comparada a análises similares da literatura que consideram apenas o canal AWGN (BOR et al., 2016; MIKHAYLOV, 2017; GEORGIOU, 2017). Por exemplo, a quantidade de dispositivos cai de 3 a 6% para o canal Nakagami-m com $m = 2$, característico de cenários com uma parcela grande de linha de visada, e de 9 a 18% em canais Nakagami-m com $m = 1$, equivalente ao canal Rayleigh que não apresenta linha de

visada.

Além disso, observa-se que existe um fator de espalhamento ótimo que depende da densidade de nós da rede. Isso ocorre devido ao fato de um espalhamento espectral maior implicar em melhor sensibilidade no receptor, com maior robustez face ao desvanecimento. Por outro lado, o aumento do fator de espalhamento faz com que cada símbolo tenha maior tempo de propagação, acarretando em mais colisões. Com fatores de espalhamento menores, observamos que a quantidade de erros devido às perdas por desvanecimento é dominante na quantidade de erros total, representando mais de 86% dos casos de perda de pacotes. Entretanto, quando o fator de espalhamento aumenta, a probabilidade de erro em função do desvanecimento tende a zero, ao passo que a quantidade de colisões começa a se tornar significativa.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Estudar e discutir a escalabilidade de uma rede de sensores centralizada com o LoRa/LoRaWAN operando em ambientes com desvanecimento..

1.1.2 Objetivos Específicos

- Utilizar a ferramenta de simulação proposta em (BOR et al., 2016) e modificá-la para incluir o efeito do desvanecimento modelado pela distribuição Nakagami-m.
- Utilizar medidas de desvanecimento reais, utilizando um *hardware* LoRa, para parametrizar os dados de simulação.
- Analisar a escalabilidade e os parâmetros que podem ser empregados em uma rede LoRa/LoRaWAN;
- Verificar a quantidade máxima de nós com características de aplicações comuns LPWAN que podem ser utilizados simultaneamente em um cenário de simulação.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Na sequência deste documento, o Capítulo 2 trata da descrição da tecnologia LoRa, suas propriedade RF e o modo de funcionamento. O Capítulo 3 apresenta o

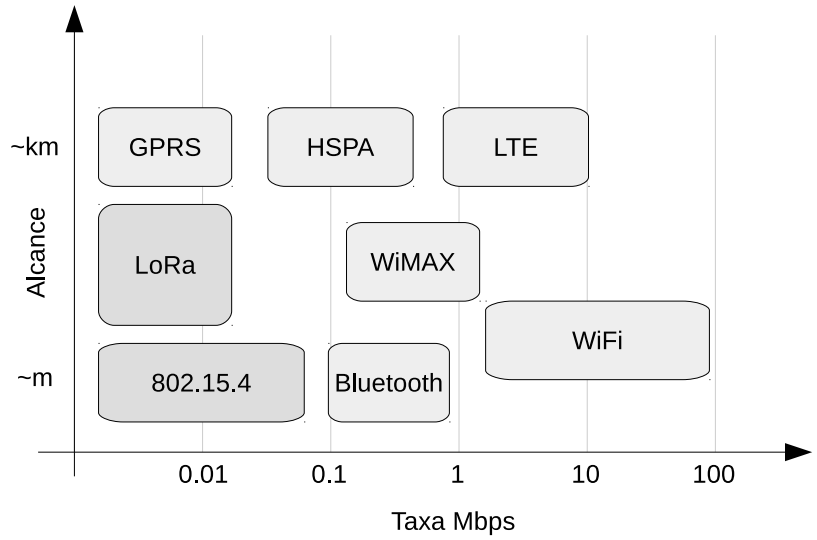
modelo do sistema e descreve a ferramenta de simulação utilizada. No Capítulo 4 é feita a caracterização do canal sem fio, no qual empregamos um *hardware* LoRa para realizar medidas de desvanecimento em larga escala e pequena escala. No Capítulo 5 são apresentadas alguns resultados de simulação. Por fim, o Capítulo 6 conclui essa dissertação e apresenta propostas para trabalhos futuros.

2 TECNOLOGIA LORA E LORAWAN

Long Range (LoRa) é uma tecnologia proprietária da Semtech com uma técnica de espalhamento espectral que permite maior resistência a interferências. Esta técnica é derivada do CSS (*Chirp Spreading Spectrum*) e suporta FEC (*Forward Error Correction*) – um método de correção de erro em bloco utilizado na codificação de canal. No caso específico do LoRa, utiliza-se o código de Hamming (8,4) (AUGUSTIN, 2016).

O receptor LoRa pode decodificar transmissões com baixas SNR (próximas de 0 dB), então é possível transmitir a longas distâncias. Os principais atributos do LoRa são: longo alcance, robustez, resistência a problemas de múltiplos percursos, resistência a fenômenos do tipo Doppler e baixo consumo de energia (cerca de 17mA no modo de transmissão). Todavia, ele opera apenas na banda não licenciada ISM. A tecnologia LoRa corresponde apenas à camada física e pode ser operada sem definir uma camada de acesso ao meio, o LoRaWAN, por sua vez, proporciona uma padronização para uma camada de acesso ao meio e faz parte da implementação da camada de rede.

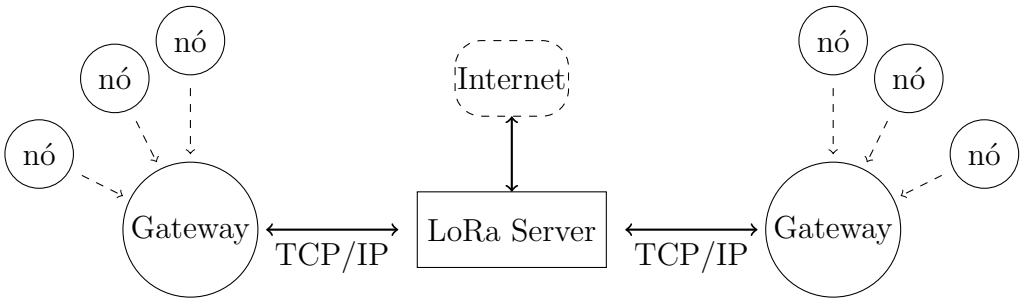
Figura 1 – Diferentes tecnologias em relação a taxa de dados (Mbps) e distância, os quadros em cinza escuro são voltadas para maior eficiência energética priorizando o alance ao invés de taxas elevadas. Autoria própria



A Figura 1 demonstra as tecnologias de telecomunicações em função da taxa de dados e distância (em uma visão mais qualitativa), sendo o padrão IEEE 802.15.4 e o LoRa mais usuais quando se visa maior eficiência energética. GPRS, HSPA e LTE são técnicas de telefonia celular e usualmente requerem mais energia e utilizam bandas licenciadas do espectro.

Os aparelhos LPWAN geralmente se comunicam diretamente com um dispositivo central (chamado de *sink*, *gateway* ou concentrador), desta forma não é necessário que cada nó instalado na rede faça configuração da topologia e rotas visando múltiplos saltos. No caso do LoRaWAN, representado na figura 2, cada sensor está diretamente associado ao seu *gateway* o qual está vinculado ao servidor LoRa através do protocolo TCP/IP.

Figura 2 – LoRaWAN, cada rede tem um gateway que está vinculado à internet através de um servidor. Autoria própria.



2.1 POTÊNCIA DE TRANSMISSÃO E FREQUÊNCIA DA PORTADORA

A potência de transmissão do rádio LoRa pode pode ser ajustada de -4 dBm até 20 dBm, em etapas de apenas 1dBm. Além disso, por limitações de *hardware*, o valor máximo é de 17dBm para *duty cycle* acima de 1%.

A frequência central pode ser ajustada em níveis de 61Hz entre 137MHz até 1020MHz. No caso do circuito integrado SX1276, fica limitada de 860 até 1020MHz. Outra vantagem prática do rádio LoRa é que não é preciso calibrar a frequência, pois a modulação CSS tem uma tolerância de 5% no oscilador.

2.2 FATOR DE ESPALHAMENTO ESPECTRAL (SF)

O LoRa utiliza um esquema de modulação em frequência semelhante ao rádio FM mas com uma subportadora de componentes em fase e quadratura. O *chirp* é a mínima unidade de informação, em termos de capacidade, este esquema corresponde a 1 chirp/s/Hz. Cada unidade desta é gerada através de um oscilador *sweep* com deslocamento na frequência f_c e banda BW com limites em $f_c \pm \texttt{BW}/2$. A frequência instantânea deste sinal é representada pela função rampa $m(t) \approx u(t) - u(t - BW)(t) - BW/2$, sendo $u(t)$ a função degrau.

O SF *Spreading Factor* é a razão entre a taxa de símbolos e a taxa *chirp*, o qual pode ser ajustado de 6 até 12, formando canais ortogonais, ou seja, *transceivers* operando com SFs diferentes não colidem. Um maior SF aumenta a relação sinal ruído (SNR: *Signal to Noise Ratio*), a sensibilidade e, por consequência, o alcance. O motivo da melhora de SNR é a formação dos símbolos em função da quantidade de *chirps*, o receptor não precisa decodificar todos os chirps para maiores SF, apenas as amostras que estiverem com melhor SNR. Todavia, incrementa significativamente o tempo de propagação no ar de um pacote e a potência média por bit.

O número de *chirps* por símbolo é dado por 2^{SF}. A taxa de símbolos, por sua vez, é dada por:

$$R_s = \frac{BW}{2^{\mathrm{SF}}}, \tag{1}$$

em que BW representa a largura de banda. A taxa de bits efetiva pode escrita por:

$$R_b = \mathtt{SF} \cdot \frac{BW}{2^{\mathrm{SF}}} \frac{4}{4+\mathrm{CR}}, \tag{2}$$

em que CR é a taxa de código (*code rate*).

2.3 LARGURA DE BANDA (BW)

BW é a largura do sinal ocupado no domínio da frequência. Quanto maior a largura de banda maior a taxa de transmissão, conforme a equação (1).

O dado é enviado com uma taxa chip determinada que equivale a largura de banda. Então, a largura de banda de 125kHz corresponde a uma taxa *chirp* de 125kcps. Embora a largura de banda pode ser selecionada de 7,8 kHz até 500 kHz (devido aos registradores presentes no *transceiver*), geralmente o LoRa opera com os seguintes valores: 125kHz, 250kHz e 500kHz. Valores maiores de BW implicam em um declínio no limiar da SNR para detecção, pois quando o *chirps* são demodulados, ao ocupar uma banda passante mais vasta, eles ficam expostos à uma maior parcela de ruído AWGN no domínio da frequência. O ruído AWGN tem uma densidade espectral de potência N_0 uniforme.

A largura de banda para uma taxa de bits não codificados (r_b) pode ser escrita por:

$$BW = \frac{r_b}{2^{SF}}. \tag{3}$$

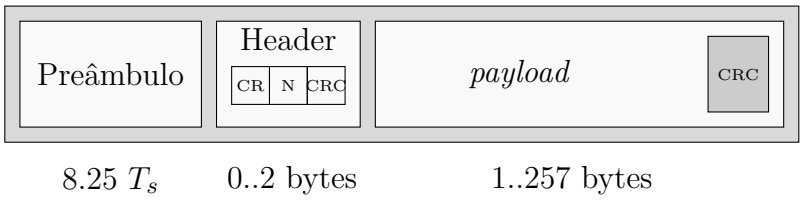
2.4 TAXA DE CÓDIGO (CR)

CR (*Code Rate*) é um parâmetro para um código corretor de erro FEC, é responsável por adicionar redundância gerando uma palavra codificada. É utilizado o código de bloco linear *Hamming*(8,4) com paridade adicional e também um esquema de intercalação diagonal, ou seja, bytes repetidos são representados de outra maneira diferente da tabela de codificação anterior. A taxa de código real r pode ser ajustada nos seguintes valores: 4/5, 4/6, 4/7 e 4/8, sendo $r = 4/(4+CR)$. Estes códigos corretores de erros estão embutidos no modem do LoRa, quanto mais paridade (menor o r) maior a robustez da comunicação, todavia incrementam o tempo de propagação da mensagem e afeta a taxa efetiva de bits. Este parâmetro deve ser informado no pacote, logo após o pré-ambulo, diferentes dos outros parâmetros a quais já estão incorporados na modulação.

2.5 ESTRUTURA DO PACOTE LORA

A estrutura do pacote LoRa é mostrada na Figura 3. Os pacotes começam com um preâmbulo, geralmente ocupado por 8 símbolos, o qual faz o sincronismo quando o canal é detectado pelo receptor. Em seguida, um cabeçalho opcional descreve o tamanho do pacote e a taxa de código, além de indicar a presença de um verificador cíclico de erro (CRC - *Cyclic Redundancy Check*, com 16 bits). Por fim existe o pacote (*payload*) em si, com tamanho de 1 até 255 bytes, e no final a paridade do CRC quanto disponível (AUGUSTIN et al., 2018).

Figura 3 – Estrutura de um pacote LoRa. Autoria própria.



2.6 TEMPO DE PROPAGAÇÃO

O tempo de propagação T_{Pl} depende do tamanho do pacote e da combinação de SF, BW e CR. Por exemplo: um pacote de 20 bytes pode variar de 9ms até 2,2s de propagação no ar, conforme demonstra a Figura 4.

O tempo de duração no ar de uma transmissão é dado por:

$$T_{Pl} = T_{pre} + \max\left(\frac{8P_l - 4 \cdot SF + 28 + 16 \cdot CRC - 20 \cdot H}{4(SF - 2 \cdot DE)}(CR+4), 0\right) \cdot T_s, \tag{4}$$

em que P_l representa o número bytes da mensagem (*payload*), H $\in 0,1$ indica se existe ou não um cabeçalho no pacote, DE $\in 0,1$ indica se a opção de otimização de baixa taxa de transmissão está ativada ou não, CRC $\in 0,1$ indica a inclusão ou não do código de redundância cíclica, ao passo que T_s representa o tempo de símbolo, dado por:

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW}, \tag{5}$$

enquanto o tempo do preâmbulo é definido por:

$$T_{pre} = T_s(12.25 + N_{pre}), \tag{6}$$

em que N_{pre} indica a quantidade de símbolos no preâmbulo, cujo valor padrão é $N_{pre} = 8$.

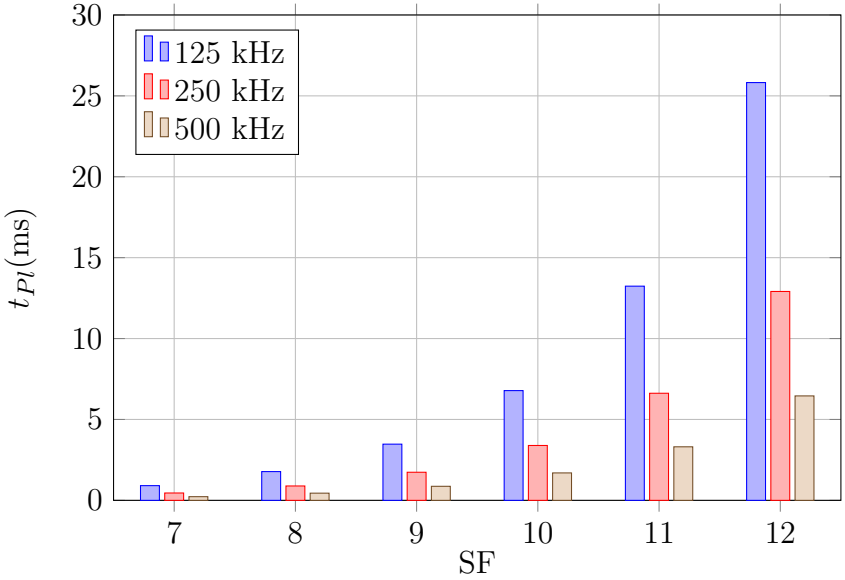
Conforme a Figura 3, o cabeçalho é definido com o descritor H em T_{Pl} para indicar qual é a taxa de código, pois a FEC não é explicita na composição dos *chirps*, mas no *payload*. Para SF elevados (11 e 12), com taxas T_s menores, a transição de um *chirp* para outro é mais suave, sendo assim é preciso compensar com o descritor DE `LowDataRateOptimize`. N_{pre} a quantidade de símbolos no preâmbulo, o padrão é 8. O CRC não é definido por software, ele é acrescentado automaticamente (se habilitado CRC=1) após a formação do pacote.

Para redes LoRa com um protocolo de acesso ao meio (MAC - *Medium Access Control*) como o LoRaWAN, estão previstos três modos de operação (ADELANTADO, 2017):

- Classe A: O nó transmite uma mensagem agendada ou esporadicamente de acordo com sua aplicação. Assim que ele transmite um pacote, depois de um pequeno intervalo de tempo (por padrão 1 segundo no LoRaWAN) ele fica no modo de recepção (dentro de uma janela definida de tempo) aguardando futuras instruções de seu *gateway* . Este é o modo de operação mais econômico (previsto na especificação do LoraWAN) em relação ao gasto energético.

- Classe B: O intervalo de recepção de cada dispositivo é escalonado e cronometrado através de um sincronismo do *gateway*. Este método é análogo ao esquema MAC do

Figura 4 – Tempo de propagação do quadro em função do fator de espalhamento SF e banda BW para um pacote de 20 bytes. Nota-se que o incremento de SF aumenta significativamente o tempo.



802.15.4, sendo que cada nó é condicionado a transmitir apenas na sua respectiva janela de tempo previamente imposta.

- Classe C: O dispositivo fica no modo de recepção o tempo todo, ele mudará para o modo de transmissão quando for solicitado pelo *gateway*.

3 MODELO DO SISTEMA E FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO ENLACE DE COMUNICAÇÃO SEM FIO

Considerando um enlace ponto a ponto, o vetor de símbolos recebido pelo receptor pode ser descrito como

$$\mathbf{y} = \sqrt{P_{\text{tx}} L_{\text{pl}}}\, h\, \mathbf{x} + \mathbf{w}. \tag{7}$$

em que P_{tx} representa a potência do transmissor, L_{pl} a perda de percurso entre transmissor e receptor, $\mathbf{x}$ o vetor de símbolos transmitidos, $\mathbf{w}$ o ruído aditivo Gaussiano branco, de média nula e variância $N_0/2$ por dimensão, e h o coeficiente de desvanecimento do canal, cujo envelope segue uma distribuição de Nakagami-m, em que o parâmetro m pode ser ajustado para modelar diferentes cenários práticos de comunicações. Por exemplo, para $m = 1$ a distribuição de Nakagami-m torna-se uma distribuição Rayleigh, ao passo que com $m = \infty$ temos um canal AWGN (GOLDSMITH, 2005).

A perda de percurso L_{pl} é baseada no modelo log-distância. Depende da distância d entre o transmissor e o *gateway* .

Para representar a perda de percurso a uma distância d, optou-se em utilizar o modelo log-distância, tal que:

$$L_{\text{pl}}(d) = L_{\text{pl}}(d_0) + 10\, n \log_{10} \frac{d}{d_0} + X_\sigma, \tag{8}$$

em que $L_{\text{pl}}(d_0)$ representa a perda de percurso a uma distância de referência d_0, n é o expoente de perda de percurso e X_σ é uma variável aleatória Gaussiana com média zero e variância que representa o sombreamento.

Dessa forma, a potência vista pelo receptor é dada por

$$P_{\text{rx}}(d) = P_{\text{tx}} - L_{\text{pl}}(d) + G_{\text{rx}} + G_{\text{tx}} + M, \tag{9}$$

Assim, a SNR instantânea na entrada do receptor pode ser expressa por:

$$\text{SNR}(d) = \frac{|h|^2 P_{\text{rx}}(d)}{N_0\, \text{BW}}. \tag{10}$$

A sensibilidade do receptor (em dBm) em temperatura ambiente pode ser definida

por:

$$S = -174 + 10\log_{10}\mathrm{BW} + \mathrm{NF}, \tag{11}$$

em que NF é a figura de ruído (SEMTECH, 2015).

A probabilidade de *outage* está associada ao receptor conseguir decodificar uma mensagem livre de erros perante uma mínima sensibilidade (HAYKIN, 2009), desta forma:

$$P_{out} = P(\mathrm{SNR} < S(d)). \tag{12}$$

Na camada MAC, por sua vez, o nó pode tentar uma transmissão esporádica sem precisar de sincronismo ou estar dentro de um *time slot*, este controle de acesso é conhecido como ALOHA puro (KUROSE, 2013). Para um número finito de nós, existe uma possibilidade de ocorrer colisão em um intervalo de tempo em que o canal está em uso. Como a distribuição dos nós é conhecida e o sinal de recepção depende de uma variável aleatória no ponto de vista do receptor, o fato de acontecer uma colisão implica que o sinal foi propagado por duas fontes e teve potência significativa das duas fontes ao passar pelo demodulador do rádio. Sendo assim, a DER (*Data Extraction Rate*), utilizando a mesma notação de (BOR et al., 2016), está associada a união das probabilidades de colisão e *outage*.

3.2 COLISÃO EM TRANSMISSÕES LORA

Como em um cenário utilizando o LoRaWAN vários dispositivos podem transmitir ao mesmo tempo, há uma probabilidade de ocorrer sobreposição (colisão) entre dois ou mais sinais transmitidos por nós distintos. Foram consideradas as condições de sobreposição no tempo, frequência da portadora, fator de espalhamento e potência dos sinais no receptor para determinar se os pacotes recebidos poderão ser decodificados.

3.2.1 Colisão devido à potência

Quando dois sinais chegam simultaneamente no receptor, se a diferença de potências entre eles for suficientemente grande o receptor é capaz de chavear entre os dois sinais e decodificar ambos com sucesso (BOR et al., 2016), o que é denominado *efeito de captura*. Entretanto, quando a diferença de potência entre os sinais é pequena, o sinal de menor potência é suprimido pelo sinal de maior potência. Dessa forma, uma colisão

por causa da diferença de potências entre a transmissão dos pacotes x_1 e x_2 é descrita por

$$C_{\mathrm{P}}(x_1, x_2) = \begin{cases} 1 & \text{se } |P_{x_1} - P_{x_2}| < P_{\text{limiar}} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \tag{13}$$

3.2.2 Colisão no tempo

Quando dois pacotes se sobrepõem no tempo, obedecendo à condição da diferença de potências ser suficiente para garantir o efeito de captura, ainda assim é necessário que pelo menos cinco símbolos diferentes de preâmbulo (para o pacote de menor intensidade) se mantenham livres de colisão para que o receptor consiga separá-los.

Dessa forma, definimos (a_i, b_i) como o intervalo de recepção do pacote i, tal que $m_i = \frac{a_i+b_i}{2}$ é o ponto médio e $d_i = \frac{b_i-a_i}{2}$ é o comprimento do ponto médio. Assim, um pacote x_1 colide com outro pacote x_2 quando a sobreposição ocorre na seção crítica definida por $x_{\mathrm{cs}} = (a_{x_1} + T_{\mathrm{s}}(5\,N_{\mathrm{pre}}), b_{x_1})$, em que T_{s} é o tempo de símbolo e N_{pre} é o número de símbolos do preâmbulo, ou seja,

$$C_{\mathrm{T}}(x_1, x_2) = \begin{cases} 1 & \text{se } |m_{x_1} - m_{x_2}| < d_{x_1} + d_{x_2} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \tag{14}$$

3.2.3 Colisão devido à frequência de portadora

Quando duas transmissões se sobrepõem no tempo, mas não em frequência de portadora, esses pacotes não interferem um com o outro e podem ser decodificados com sucesso. A sobreposição ocorre apenas quando a diferença entre as frequências da portadora é menor que uma dada frequência de tolerância, de forma que:

$$C_{\mathrm{F}}(x_1, x_2) = \begin{cases} 1 & \text{se } |f_{x_1} - f_{x_2}| < f_{\text{limiar}} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \tag{15}$$

3.2.4 Colisão devido ao fator de espalhamento

Cada fator de espalhamento utilizado pelo LoRa é ortogonal entre si. Assim, uma colisão só ocorre se

$$C_{\mathrm{SF}}(x_1, x_2) = \begin{cases} 1 & \text{se } \mathrm{SF}_{x_1} = \mathrm{SF}_{x_2} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \tag{16}$$

3.2.5 Evento de colisão

Portanto, para que ocorra a colisão de duas mensagens transmitidas por terminais diferentes, as quadro condições supracitadas devem ocorrer simultaneamente, de modo que

$$E_{\mathrm{col}} = C_{\mathrm{P}} \times C_{\mathrm{T}} \times C_{\mathrm{F}} \times C_{\mathrm{SF}}. \tag{17}$$

Assim, a chance de um pacote não ser entregue é dada pela união entre a probabilidade de outage e a probabilidade de ocorrer uma colisão, tal que:

$$P_{falha} = 1 - DER = P_{out} \bigcup \Pr\{E_{col}\} \tag{18}$$

3.3 FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO

Para determinar a DER, foi elaborado um ambiente de simulação na linguagem *Python* versão 2.7 baseado em um *framework* computacional elaborada por (BOR et al., 2016). Esta simulação é feita com base em processamento de eventos no tempo discreto. Cada nó é estanciado em um contêiner do objeto que descreve o cenário e apresenta uma linha de temporização individual e não preemptivo. Alguns métodos deste *framework* foram alterados para suportar a análise da rede em um ambiente com falhas (com *outage*) baseado no modelo de canal Nakagami-m. O código também foi otimizado para suportar a alteração dos parâmetros SF, BW e CR em tempo de execução. A Figura 5 mostra a disposição dos nós e o objeto de análise para contabilizar as colisões e outras falhas. A variável ψ segue uma distribuição Weibull para que os nós não transmitam sempre ao mesmo tempo, com a sua respectiva função densidade de probabilidade pela equação:

$$f_{\psi}[\psi] = \frac{k}{\lambda}\left(\frac{\psi}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-(\psi/\lambda)^k}, \quad \forall \psi > 0. \tag{19}$$

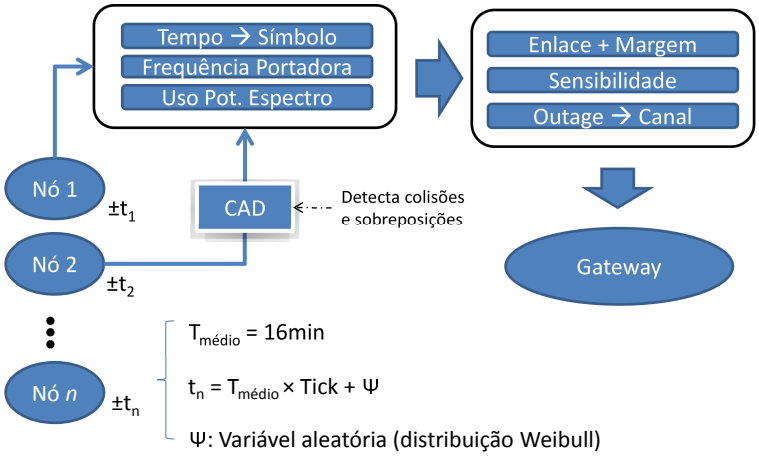
Esta distribuição descreve a chance de ocorrência de falhas com o passar do tempo, ou seja, existe uma chance do nó atrasar ou adiantar ao final de seu ciclo programado, todavia, sempre terá um intervalo médio de transmissão definido por $T_{\text{médio}}$. Ela tem um impacto significativo, pois em um cenário ideal, os nós são inicializados ao mesmo tempo, desta forma, toda vez que um nó transmitir em tempo de simulação, obrigatoriamente ocorreriam colisões. O parâmetro de escala λ depende do *duty cycle* e k é o parâmetro da forma, sendo que para $k < 2$ assemelha-se a distribuição exponencial.

Esta rede ainda terá somente um *gateway* e todos os nós operando em uma *BW* fixa. O *gateway* está posicionado no centro do sistema de coordenadas e os nós ficam distribuídos uniformemente em uma região euclidiana $\upsilon \in \mathbb{R}^2$ conforme em (GEORGIOU, 2017) em que υ é um espaço circular de raio R e área πR^2 que engloba (obrigatoriamente) todos os N nós da rede. O impacto de υ pode variar muito para redes com poucos nós, pois em cenários reais, existem aglutinações de nós, e desta forma, há um conjunto de possíveis perdas relativas à distância entre cada nó e o *gateway*, com isso a DER pode ser reduzida ou aumentada drasticamente. Entretanto, cada transmissão está submetida ao efeito do desvanecimento, com sua amplitude $\sqrt{P_r}$ dependendo de h^2, sendo assim, as perdas ou possíveis ganhos são suavizados, convergindo para uma DER que depende principalmente da área, quantidade de nós e *duty cyle*. Outrossim, os nós não podem estar muito próximos, obedecendo a distância mínima de transferência de

potência de Friss (SADIKU, 2012), tal distância também foi implementada na simulação e não ultrapassa o comprimento de onda de f_c.

Para a simulação dos eventos foi utilizado o módulo *simPy* (MATLOFF, 2008) que permite o gerenciamento dos eventos.

Figura 5 – Simulação, cada nó é uma estrutura de dados e tem um *handler* para a função de transmissão, quando há conflito (CAD: *channel access detection*) é aberta uma rotina para avaliar se houve ou não colisão. Autoria própria.



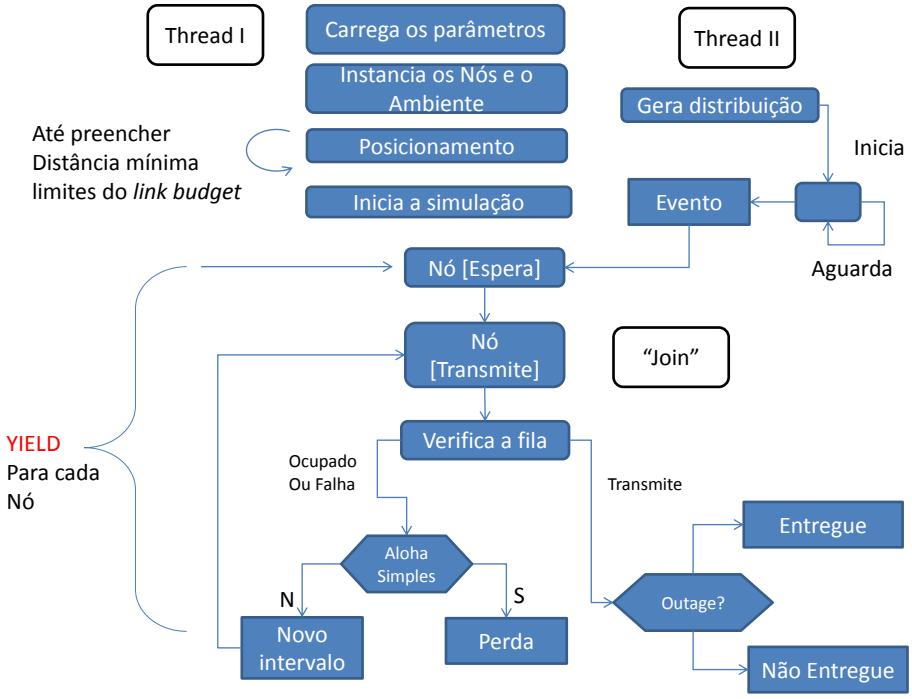
O detalhe de como a simulação funciona é apresentado na figura 6. O primeiro passo é carregar os parâmetros estáticos. Estes parâmetros são atributos de tipo de canal, perdas de percurso, enlace e modos de simulação. Em seguida é inicializado o contêiner dos nós, uma estrutura de dados simular à uma lista encadeada a qual são registrados todos os nós. Através dele, durante a simulação, é percorrido o *handler* para acionar um evento caso o nó acorde e comece a transmitir. Cada aparelho é construído por um objeto da classe `node` e tem como atributos (não estáticos) os parâmetros LoRa, sua coordenada no ambiente, identificador e endereço de seu respectivo *gateway*.

O posicionamento geográfico pode ser feito de duas maneiras. Por padrão, quando um nó é instanciado, sua construtura delimita suas coordenadas no espaço $\mathbb{R}^2$ aleatoriamente, em seguida verifica se está dentro do alcance, caso contrário suas coordenadas são substituídas por um novo valor até ficar dentro do raio de alcance. Outra maneira é fazer o ajuste manualmente através de uma lista de pontos. Dentro de cada nó existe um objeto pacote que está associado à uma estrutura de dados contendo os valores (estáticos) de transmissão, além dos atributos já contidos no nó para a validação da SNR e das possíveis colisões.

Quando o contêiner é preenchido, a simulação é inicializa cadastrando todos os *Yield* de cada nó no objeto `simpy.Environment()`. Um *Yield* é uma palavra reservada

do Python para indicar um gerador, logo o nó não irá operar de maneira autônoma assim que ele for instanciado, mas quando o objeto de ambiente `simpy.Environment()` permitir segundo ciclo de trabalho programado. Assim que um nó faz transmissão, o pacote é registrado em uma fila, ou seja, em um *buffer* FIFO (*First In, First Out*) embutido no `simpy.Resource()`. Isto corresponde à ocupação do canal em uma determinada banda de frequência. Quando a fila começa a encher à medida que a simulação vai progredindo, caso não haja *outage*, os nós permanecem na fila até seu vencimento. Se tiver *outage* em relação ao receptor a fila já é liberada, caso contrário, o canal ficará ocupado dependendo do limiar da SNR de ambos os pacotes.

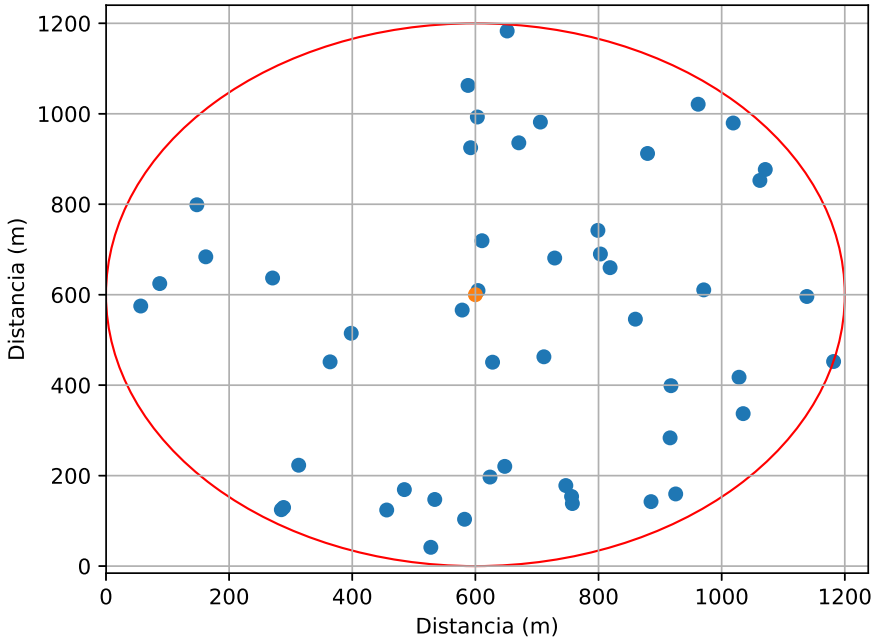
Figura 6 – Detalhes da simulação, após inicializar as condições de canal e posicionamento (cada objeto tem seus atributos de localização e aspectos do RF), a estrutura espera o sistema disparar o evento de transmissão (há um contador para cada nó e um *offset* pseudo-aleatório), após o disparo do evento, abre-se uma rotina para contabilizar os acertos ou erros e analisar as colisões. Autoria própria.



A disposição dos nós no ambiente é representada pela Figura 7. Realizada através de um gerador pseudo-aleatório de distribuição uniforme no plano $\mathbb{R}^2$, sendo todos os pontos colocados no primeiro quadrante. A máxima distância é de 600m e o *gateway* é colocado no centro geométrico deste quadrante. O ciclo médio de trabalho de cada nós é de 0,134%, cerca de 90 mensagens por dia, com pacotes de 20 bytes operando com um fator de espalhamento SF=12.

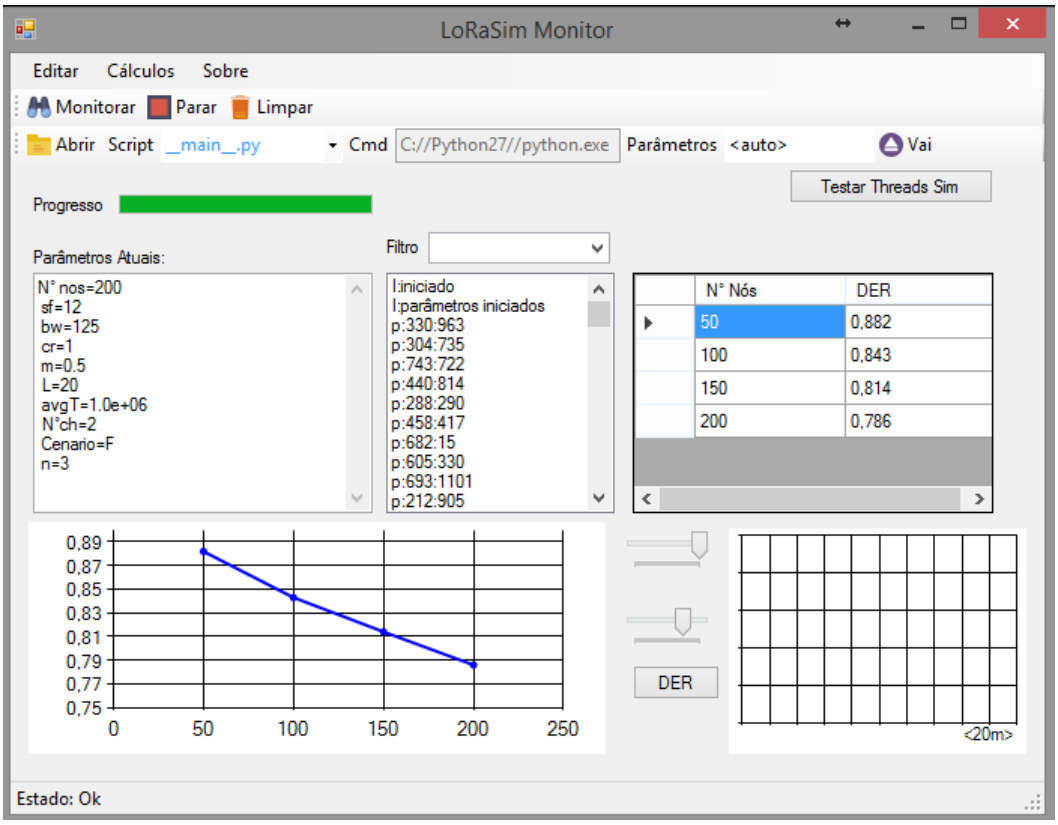
A Figura 8 mostra a GUI (*Graphical User Interface*) para manipular a

Figura 7 – Posicionamento de 50 nós no plano cartesiano, a circunferência é o limite do enlace considerando a margem de perdas.



inicialização do *script* e também para acompanhar em forma de tabelas e gráficos os resultados parciais em tempo de simulação. Este *software* foi implementado utilizando a linguagem C# orientada a objeto com o *framework* .Net 4.0 da *Microsoft*. Ele permite a integração da aplicação Python através de uma comunicação *loopback* UDP (*User Datagram Protocol*) entre estes dois processos já instanciados no sistema operacional (*localhost*).

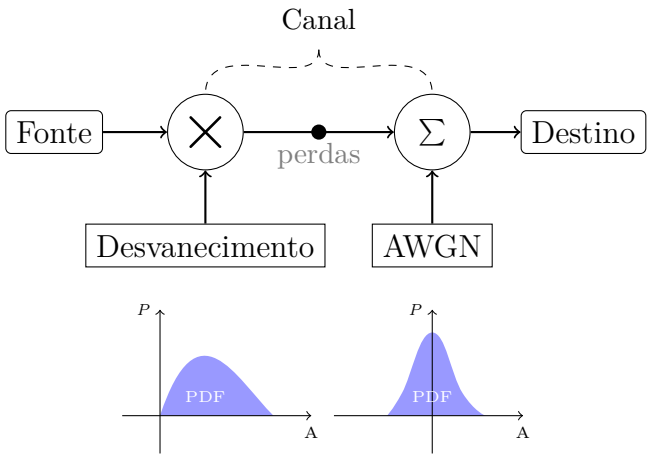
Figura 8 – GUI do simulador LoRaSim utilizando o framework dotNet 4.0, implementado na linguagem C# e integra com o *script* python através de um "socket" UDP no *LocalHost*



4 CARACTERIZAÇÃO DO CANAL SEM FIO

Para caracterizar o canal sem fio é preciso levar em consideração as perdas em larga escala que ocorrem devido à dissipação de potência no ar. Também há perdas em pequena escala que são flutuações instantâneas na potência recebida (GOLDSMITH, 2005) . A Figura 9 exemplifica o esquema do canal, da fonte até o receptor, com as perdas em larga escala, o ruído AWGN e as flutuações provocadas pelo desvanecimento.

Figura 9 – Ruído AWGN é incrementado aleatoriamente e o desvanecimento sobrepõe a amplitude do sinal. Autoria própria



4.1 NAKAGAMI-M

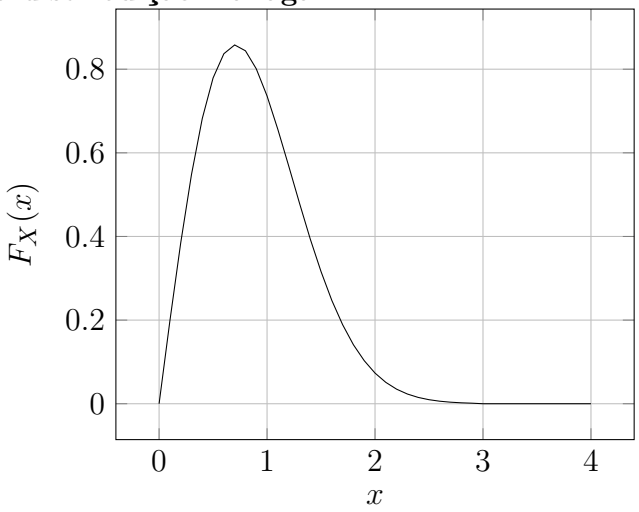
A caracterização do canal sem fio em um ambiente qualquer é feita com o conceito de múltiplos caminhos. Por consequência, a cada momento o sinal recebido sobre muita atenuação, e estas perdas ocorrem de maneira bastante aleatória, tendo em vista as combinações construtivas ou destrutivas dos sinais recebidos pelos múltiplos percursos.

O comportamento destes múltiplos percursos é modelado estatisticamente e é chamado de desvanecimento. O modelo utilizado neste trabalho é o Nakagami-m, o qual é derivado da distribuição gama e direcionado para meios de radio comunicação, com os atributos de forma m e espalhamento σ. Sua PDF (*probability density function*) é dada por:

$$F_X(x) = \frac{2\left(\frac{m}{\sigma}\right)^m x^{2m-1} e^{-\frac{mx^2}{\sigma}}}{\Gamma(m)}, \tag{20}$$

cuja representação é dada pela Figura 10 com $\sigma = 1$ e $m = 1$.

Figura 10 – PDF da distribuição Nakagami-m.

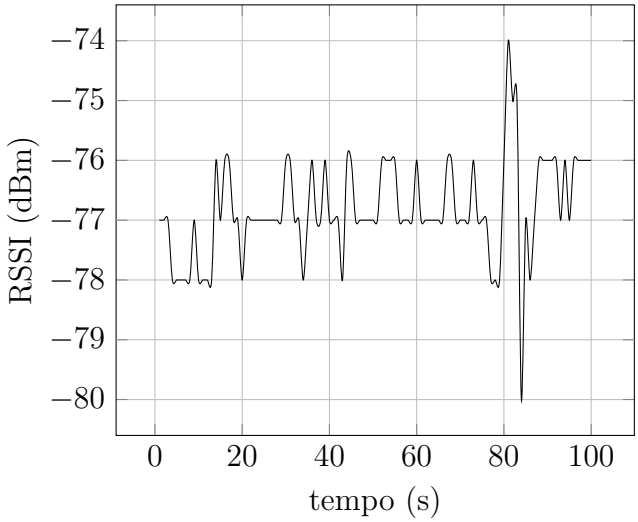


4.1.1 Determinação dos Parâmetros Nakagami-m

Primeiramente, utilizou-se um protótipo de dispositivo LoRa contendo o modem Semtech da série SX1276 para caracterizar o desvanecimento em um ambiente interno. O *hardware* desenvolvido consta no Anexo A, ao passo que o ambiente considerado foi o terceiro andar do bloco D da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), no qual dois transceptores foram colocados em posições fixa, com parâmetros constantes ao longo da transmissão de símbolos piloto. Foram realizadas 1005 amostras, a partir das quais se obteve as medidas de intensidade de sinal recebido (RSSI: *received signal strength indicator*). Percebe-se que a RSSI no receptor varia bastante (conforme a figura 11), apesar do enlace sem mobilidade e de perda de percurso conhecida. A medição da RSSI é feita através de um registrador (`RegPktSnrValue`) do *Transceiver* SX1276 o qual faz uma estimativa do último pacote processado após o estado de recepção. Ainda, a Figura 12 ilustra a interface desenvolvida para o experimento, a qual permite ajustar parâmetros de transmissão, bem como medir a RSSI no receptor.

A seguir, com esse conjunto de amostras gerou-se um histograma (figura 13), a partir qual obtém-se a função de densidade de probabilidade (PDF: *probability density function*) através do ajuste de curva com o auxílio do *software Wolfram Mathematica*. A PDF que obteve o melhor ajuste foi a distribuição de Nakagami-m com $m = 2,3$, ou seja, um ambiente menos severo que o modelado pela distribuição de Rayleigh.

Figura 11 – *Received signal strength indicator* **(RSSI) no receptor, caracterizando a propagação em pequena escala.**



4.1.2 Modelos de Propagação

O modelo log-distância é um modelo empírico para obter a perda de percurso para ondas eletromagnéticas (GOLDSMITH, 2005). Diferente da equação de Friis, que define as perdas das ondas propagadas no vácuo em razão do quadrado da distância, os parâmetros n e d_0 do modelo log-distância podem ser ajustados de acordo com dados experimentais e não dependem da frequência de transmissão.

A perda de percurso P_L em função da distância (d) é dada por:

$$P_L(d) = P_L(d_0) + n \cdot 10 \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right). \tag{21}$$

Na Tabela 1 há exemplos de medições nos corredores da universidade, com a distância entre o receptor e o transmissão. O valor fixado da potência (em Watts) de transmissão P_{tx} é de 14 dBm. O intervalo de confiança é de ±3dB e a variança é de 0,7 dB.

Figura 12 – Software para programação do rádio e aquisição da relação sinal ruído e RSSI dos pacotes recebidos.

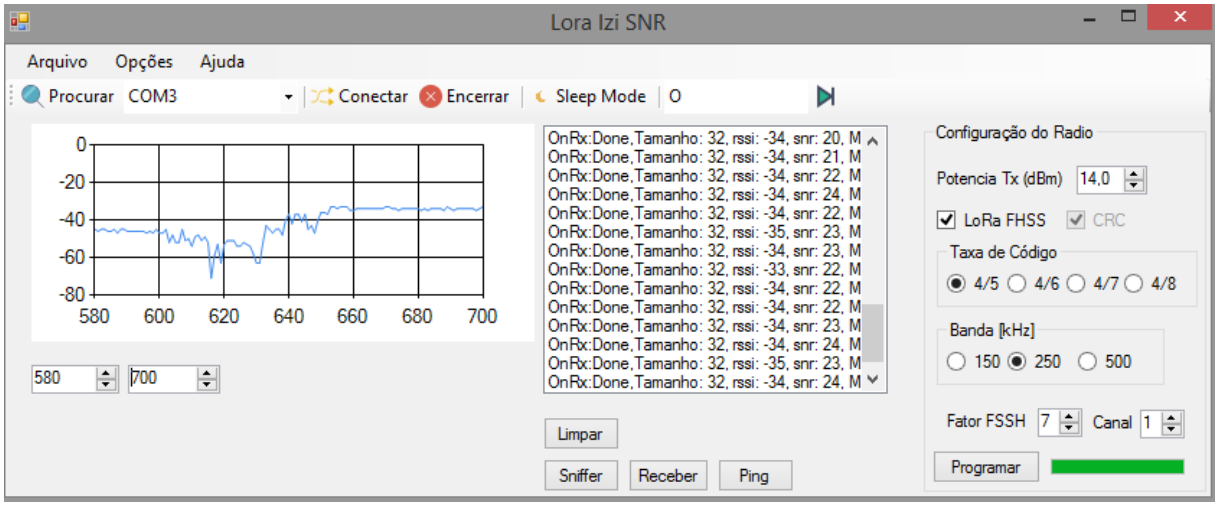


Figura 13 – Histograma das amostras de RSSI normalizadas e linearizadas, sendo $\texttt{Norm}(P_x) = 1$ correspondente à -63dBm, o valor médio esperado de P_{rx} com a perda de percurso P_L.

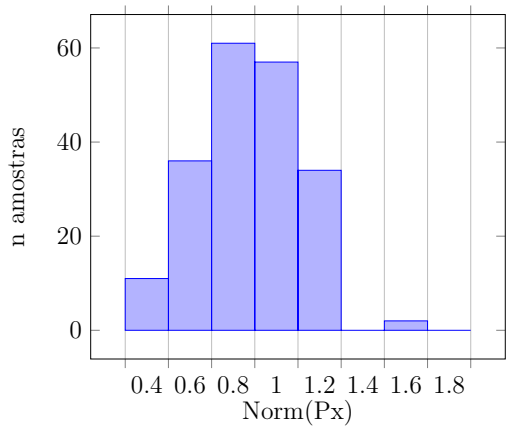


Tabela 1 – Algumas medições da potência no receptor (em Watts) realizadas através de médias sucessivas do descritor RSSI para uma distância conhecida e P_{tx} conhecida

Distância(m)	RSSI (Watts)
30	$-170\ dB$
20	$-140\ dB$
18	$-93\ dB$
1	$-34\ dB$

Sendo assim, com as distâncias e os valores de RSSI conhecidos conforme a Tabela 1 podemos obter a aproximação do valor de n com o ajuste de curva através

da seguinte regressão linear:

$$n \cong \frac{\sum_i x_i(Pl_i - \overline{Pl})}{\sum_i \log(d_i/d_0)(\log(d_i/d0) - \overline{\log(d_i/d_0)})}, \tag{22}$$

o qual, com base nas medições da Tabela 1 e na regressão linear, resulta em $n = 2.8$, com uma correlação de 0.86.

5 RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados da simulação obtidos com o uso da ferramenta proposta no Capítulo 3 com os parâmetros obtidos no capítulo anterior, enfatizando a inclusão do desvanecimento em Nakagami-m. Para realização dos testes, foram utilizadas as configurações típicas para o modem Semtech da série SX1276 (SEMTECH, 2015), apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Lista de parâmetros de simulação.

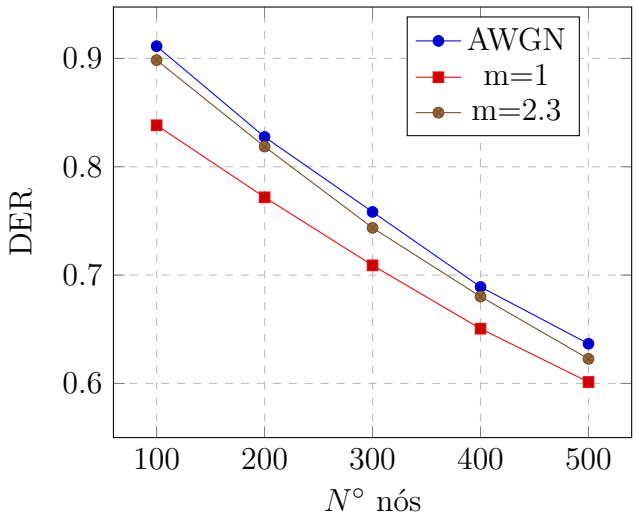
Parâmetro	**Valor**
Largura de banda (BW)	125 kHz
Taxa de código (CF)	4/5
Fator de espalhamento (SF)	12
Frequência de portadora	916 MHz
Potência de transmissão (P_{tx})	14 dBm
Distância de referência (d_0)	1 m
Perda de percurso em d_0 ($L_{\text{pl}}(d_0)$)	56.4 dB
Coeficiente de perda de percurso (n)	2,80
Margem de enlace (M)	6 dB
Variância do sombreamento (σ)	1
Ganho das antenas ($G_{\text{rx}} = G_{\text{tx}}$)	0 dB
Sensibilidade mínima (S_{min})	-133,25 dBm
Tamanho do payload	20 Bytes
Tamanho do preâmbulo (N_{p})	8 símbolos
Figura de ruído (NF)	6 dB
Limiar de potência para o efeito de captura (P_{limiar})	6 dB
Frequência de tolerância (f_{limiar})	30kHZ
Máxima Distância	600 m

5.1 IMPACTO DO DESVANECIMENTO NO DESEMPENHO DA REDE

O impacto do desvanecimento na simulação do desempenho das comunicações LoRa é ilustrado pela Figura 14, com uma tolerância de $\pm 0,005$ e desvio padrão de 0,0025 para 100 nós, a qual cai para 0,0017 para mais de 400 nós. Esta figura traça a probabilidade de sucesso DER em função da quantidade de nós se comunicando na rede. Consideramos os casos da DER para o canal AWGN, ou seja, sem a presença do desvanecimento, além do desempenho quando o desvanecimento é do tipo Nakagami-m.

Na Figura 14 nota-se que a severidade do desvanecimento tem maior impacto quando a quantidade de nós é pequena, uma vez que o desvanecimento mais severo

Figura 14 – Probabilidade de sucesso (ou *data extraction rate* – DER) em função do número de nós para os canais AWGN, Rayleigh e Nakagami-m com $m = 2,3$ com BW de 125kHz e SF=12 (padrão do LoRaWAN)



aumenta a probabilidade de que a SNR recebida esteja abaixo da sensibilidade mínima do receptor que permite decodificação. Por outro lado, ao passo que a quantidade de nós aumenta, as curvas se aproximam indicando que a probabilidade de sucesso diminui porque as falhas ocasionadas por colisões aumenta significativamente.

O efeito das diferentes larguras de banda na DER pode ser observado nas Figuras 16 e 15, nas quais a quantidade de nós é igual a $\{50, 100, 200, 300\}$ e o desvanecimento é considerado do tipo Nakagami-m com $m = 2,3$. A largura de banda está associada a taxa de bits efetiva. Dessa forma, apesar do rádio apresentar maior sensibilidade para bandas mais estreitas (SEMTECH, 2015), com o incremento no número de nós a DER tende a ser prejudicada por causa da probabilidade de colisões. Muito embora o desempenho aumente em até 32% (para redes com cerca de 300 nós) com o incremento da largura de banda (conforme a Figura 17), consideraremos apenas o caso com BW = 125 kHz na sequência deste trabalho, uma vez que é a situação que apresenta a maior variação de desempenho em função do número de nós.

A DER em função da taxa de espalhamento espectral é apresentada na Figura 18 para cenários com $\{50, 100, 200, 300\}$ nós. Conforme é possível perceber, existe um SF ótimo que depende da densidade de nós da rede. Isso ocorro devido ao fato do espalhamento espectral providenciar mais robustez na comunicação, de modo que um SF maior implica em melhor sensibilidade no receptor, com maior robustez face ao desvanecimento. Entretanto, o aumento do SF faz com que se estenda o tempo de propagação e o consumo energético de cada símbolo, o que acarreta em maior número

Figura 15 – DER em função da taxa de espalhamento espectral (SF) para bandas de 500kHz, com {50,100,200,300} nós.

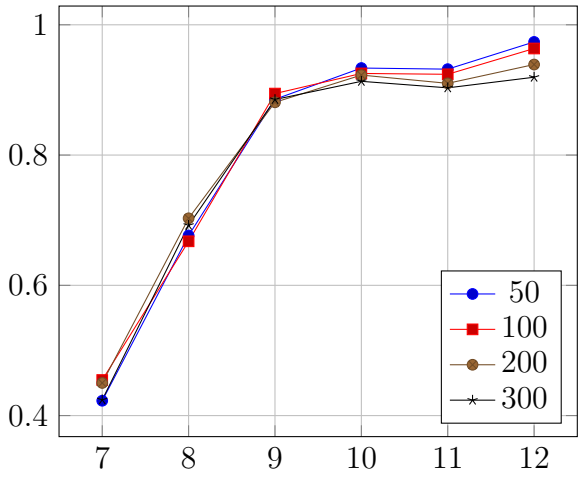
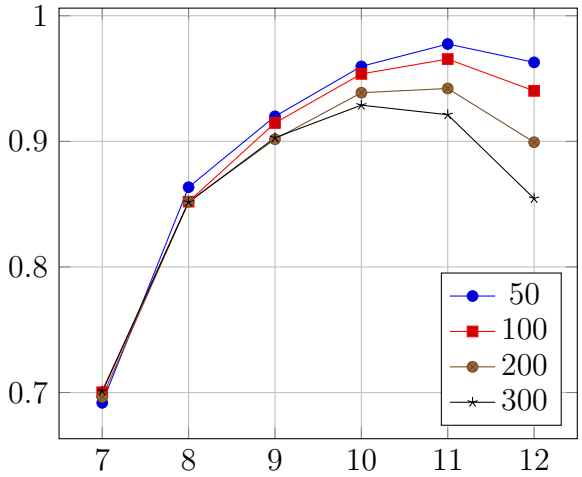


Figura 16 – DER em função da taxa de espalhamento espectral (SF) para bandas de 250kHz, com {50,100,200,300} nós.



de colisões para uma rede mais densa. Por exemplo, a partir da figura 18 podemos observar que existe um fator de espalhamento ótimo de SF = 10 para uma rede com 50 nós, ao passo que esse valor ótimo diminui à medida em que o número de nós aumenta.

5.2 ESCALABILIDADE DA REDE LORA

Com base na diversidade de cenários de aplicação das redes LoRa descritos por (MIKHAYLOV et al, 2016) , buscou-se avaliar a escalabilidade da rede ao se variar a densidade de nós (quantidade de nós por metro quadrado), operando em ambientes com desvanecimento. A Tabela 3 mostra a quantidade máxima de nós que pode ser colocada

Figura 17 – DER em função da largura de banda (BW) para uma rede com $\{50, 100, 200, 300\}$ nós.

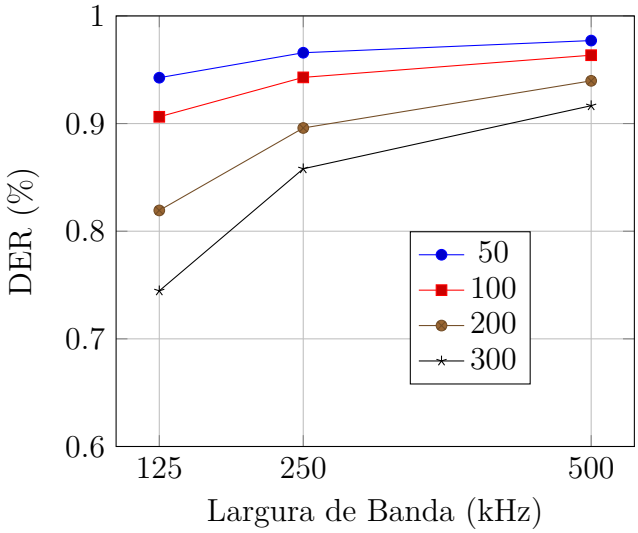
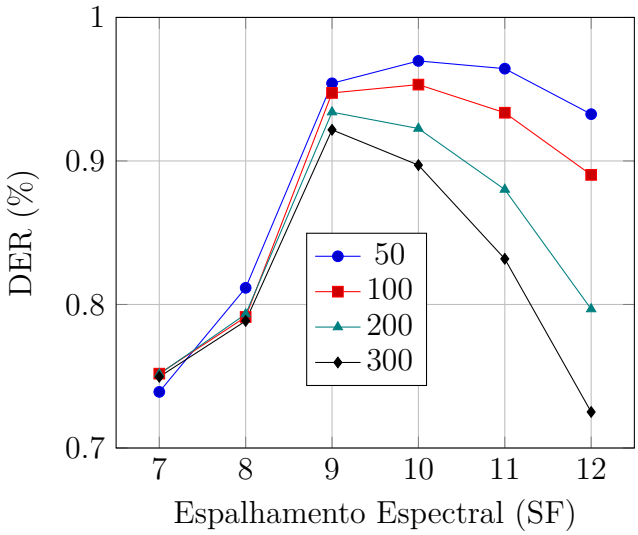


Figura 18 – DER em função da taxa de espalhamento espectral (SF) para uma rede com $\{50, 100, 200, 300\}$ nós, com BW=125kHz



em uma determinada região, para que a DER se mantenha superior a 70%, com erro de ± 1 nó para os cenários de A e B e erro de ± 10 nós para os demais casos e seu respectivo gráfico comparativo na Figura 19. O raio de cobertura é determinado com base na sensibilidade mínima do receptor para o menor fator de espalhamento do modem SX1276 (SF=7), considerando um canal AWGN e com margem de 6dB que corresponde uma redução de 33 metros do máximo alcance (neste caso 600 metros). A partir desse raio de cobertura, as análises foram refeitas considerando os canais Nakagami-m com m = 1, 2, 2,3. Além disso, foram utilizadas configurações com 3 ou 6 canais (Ch), seguindo as restrições propostas na resolução da Anatel (ANATEL, 2006) para as canalizações. A

quantidade de canais é limitada por *gateway* comercial da Semtech (com 4 canais, 3 para *uplink* e 1 para *downlink* quando operado no modo A) (ADELANTADO et al., 2007). Também foi previsto a instalação de mais um *gateway* nas proximidades do primeiro *gateway* , totalizando 6 canais para *uplink*.

Como podemos observar, o número de nós suportado pela rede varia bastante com o tipo de desvanecimento do ambiente. Além disso, nota-se que as previsões são bastante otimistas ao se considerar um canal AWGN, como em (ADELANTADO et al., 2007; BOR et al., 2016; MIKHAYLOV et al., 2016), tendo em vista que a quantidade de dispositivos cai cerca de 86% para no canal Nakagami-m, característico de ambientes internos, e cerca de 82 % para o canal Rayleigh, característico de ambientes externos.

Tabela 3 – Escalabilidade da rede Lora. Número de dispositivos suportados para garantir uma DER acima de 70%, *Ch* é o número de canais *uplink* e *d* é o *duty cycle* médio, a tolerância para o número de nós é de 1%

Cenário	Período	Tamanho	Ch	AWGN	m=2.3	m=2	m=1	*d(%)*
A: Sinalizadores nas avenidas	30 s	1 byte	3	60	58	58	53	2,75
	30 s	1 byte	6	125	116	110	100	2,75
B: Sensores trafego terrestre	59 s	1 byte	3	105	109	105	90	1,40
	59 s	1 byte	6	220	214	199	192	1,40
C: Automação residencial	23 h	8 bytes	3	74907	73689	70719	68174	0,01
	23 h	8 bytes	6	149493	139659	134029	128630	0,01
D: Máquinas de Cartão Shopping	29 min	24 bytes	3	1543	1684	1683	1543	0,08
	29 min	24 bytes	6	3111	3495	3495	3111	0,08
E: Segurança residencial	10 min	20 bytes	3	700	640	603	599	0,21
	10 min	20 bytes	6	1397	1360	1337	1159	0,21

A Figura 20 compara a quantidade de ocorrências de *outage* e colisões em uma rede com 400 nós, considerando os canais AWGN, Nakagami-m com $m = 2.3$ e Rayleigh. Note que a probabilidade de *outage* é dominante na quantidade de erros da comunicação com fatores de espalhamento menores, representando mais de 20% dos casos de perda de pacotes para $\mathrm{SF} = \{7, 8\}$ no canal Nakagami-m. Ao passo em que o fator de espalhamento aumenta, a probabilidade de *outage* diminui em função da maior robustez da transmissão. Entretanto, a quantidade de colisões começa a se tornar significativa, tendo em vista a maior duração dos pacotes enquanto em transmissão.

Por fim, a figuras 21 e 22 comparam a quantidade de colisões, desconsiderando as perdas pelo efeito da probabilidade de *outage*, quanto ao percentual relativo às colisões na frequência (C_{F}), na potência (C_{P}) e no tempo (C_{T}) com cerca de 40 mil amostras de pacotes enviados e a partir de 500 colisões contabilizadas (SF=7) na simulação. Nota-se

Figura 19 – Comparativo entre os tipos de canais e cenários com o número de nós que garantem um DER acima de 70 % válido para um intervalo de confiança de ±1%

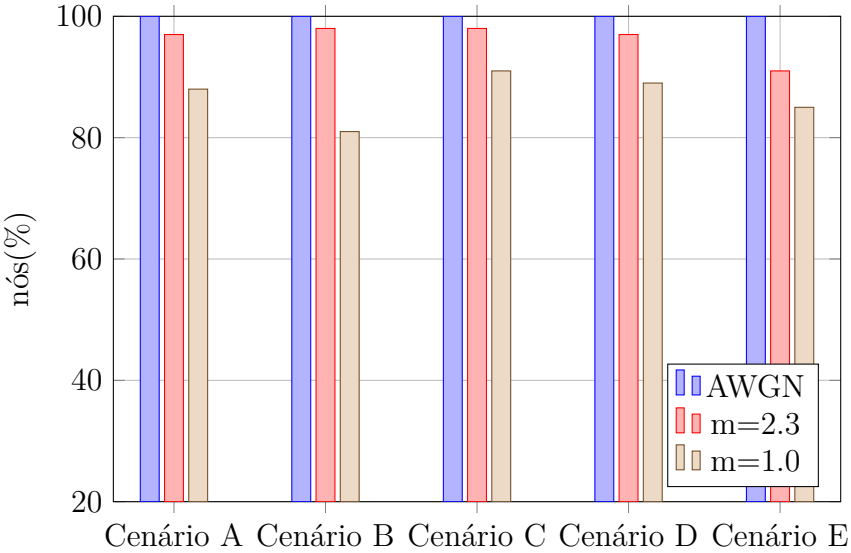
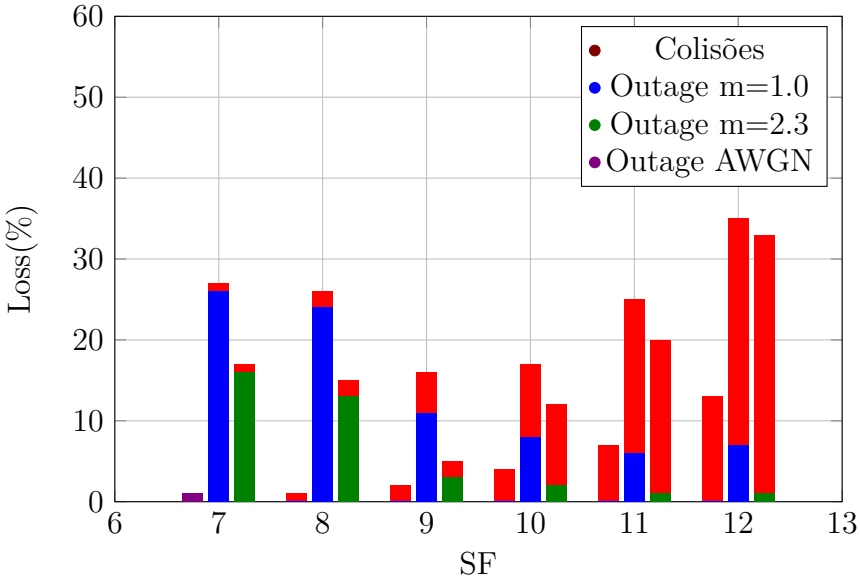


Figura 20 – Amostras das ocorrências de outage e perdas por colisão em uma rede de 400 nós, as barras à direita do SF são do canal Nakagami m=2.3, as barras alinhadàs ao SF são para m=1 e as outras são do canal AWGN. O *outage* para o caso AWGN é mínimo - cerca de 1%



que o percentual de colisões relativos a sinais que chegam com diferença de potência menor que $P_{\text{limiar}} = 6$ dB diminui consideravelmente, um vez que o desvanecimento atua como uma variável aleatória adicional, com influência direta na potência recebida. Dessa forma, nestes canais, as colisões se tornam essencialmente devido à frequência de portadoras e superposição no tempo dos bits do preâmbulo.

Figura 21 – Comparação AWGN e Canal Nakagami (m=1). Os 3 motivos de colisão: C_F *frames* de mesmo canal (portadoras de mesma frequência f_c ou dentro do limite de banda), C_P é quando a diferença de potência (dos sinais interferentes) fica acima do limiar $P_{lim} > 6dB$, C_T são as ocorrências no tempo de transmissão do datagrama.

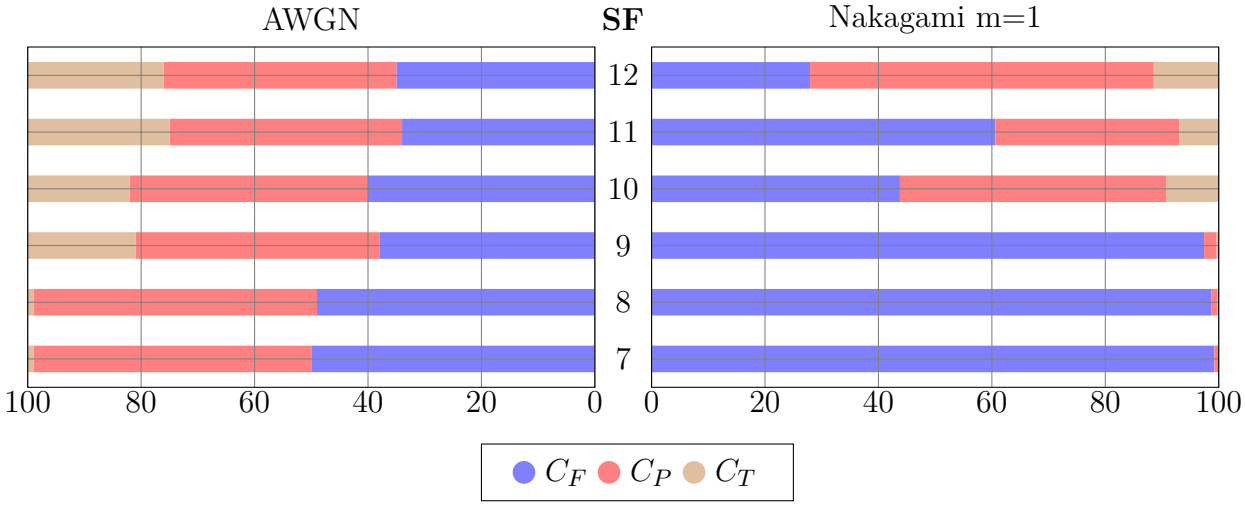
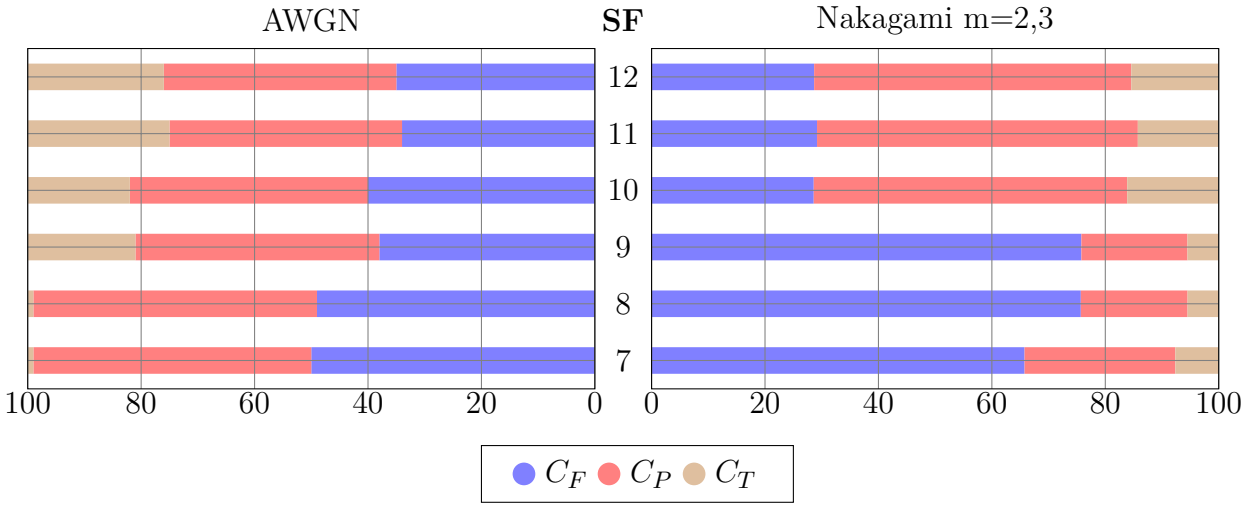


Figura 22 – Comparação AWGN e Canal Nakagami (m=2,3), o aumento de C_F para SF menores é causado pela redução de C_T. Ele é amenizado com as perdas do desvanecimento pois as chances de um segundo pacote superar o limiar de 6dB é menor.



6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi estudada a escalabilidade do LoRa/LoRaWAN em ambientes com desvanecimento. Para isto, foi utilizada uma ferramenta de simulação que averígua o efeito do *fading* modelado por um canal Nakagami-m na quantidade máxima de nós que pode ser colocada em uma determinada região para que a probabilidade de sucesso se mantenha superior a 70%. Os resultados revelaram que a escalabilidade da rede LoRa diminui consideravelmente, com a quantidade de dispositivos reduzida de 3 a 6% para o canal Nakagami-m e 9 a 18% para o canal Rayleigh, isto em comparação com o canal AWGN. Portanto, conclui-se que existe um efeito do desvanecimento Nakagami-m considerável e que compromete cerca de 6% da escalabilidade para redes LoRA/LoRaWAN.

Também foi analisado o comportamento da rede com vários fatores de espalhamentos, e após análise, conclui-se que existe um valor de SF ótimo que está relacionado à densidade de nós da rede e também com o ciclo de trabalho de cada dispositivo. Com fatores de espalhamento menores, a quantidade de erros devido às perdas por desvanecimento é dominante na quantidade de erros total, representando mais de 86% dos casos de perda de pacotes. Entretanto, com o acréscimo do fator de espalhamento, a robustez do comunicação aumenta, consequentemente reduzindo a probabilidade de erro em função do desvanecimento. Por outro lado, a quantidade de colisões começa a se tornar significativa, uma vez que o tempo de propagação de cada símbolo aumenta com o SF.

A simulação de (BOR et al., 2016) foi utilizada com modificações para suportar o desvanecimento para canais Nakagami-m, também foram acrescentadas melhorias no código que permitem alterar diversos parâmetros como taxa de código, fator de espalhamento, largura de banda, dentre outros. Com isso foram desenvolvidas algumas ferramentas GUI para monitorar o ambiente de simulação em tempo de execução.

Em relação aos trabalhos futuros, pode-se realizar uma relação de troca entre acréscimo de canais e o número de sistemas com múltiplas antenas. O LoRa permite implementar SC (*selection combining*), uma técnica com duas ou mais antenas, cada antena é um receptor individual e há uma seleção do receptor que tiver melhor sinal instantâneo. Por consequência, possibilita um aumento do ganho de diversidade do canal. Entretanto, ocupa-se um *receiver* do gateway que poderia ser utilizado para acrescentar mais canais.

Outro futuro trabalho que pode ser considerado diz respeito à métodos adaptativos de alocação SF. Dessa forma, ao invés de manter o SF em um valor fixo, feito a partir da inicialização da rede, a adaptação do SF de cada nó permitiria aumentar a escalabilidade da rede, ou melhorar a eficiência energética dependendo do caso.

Além disso, neste trabalho a disposição geográfica é delimitada pelo próprio alcance em área circular, todavia pode-se utilizar múltiplos *gateways* em diversos pontos estratégicos para atender aplicações com áreas mais definidas, como exemplo sensores de monitoramento de hidrelétricas e estruturas associadas, pois a disposição dos nós ligados à esses instrumentos tem um posicionamento bem definido. Com isto, também há condições de implementar esquemas de ampliação da rede em topologia árvore com vários níveis hierárquicos.

Por fim, outra sugestão é implementar o ARQ *(Automatic Repeat Query)*, um método de retransmissão de pacotes, todavia é interessante considerar um cenário possível de falhas de *feedback* (por exemplo: a informação de um pacote perdido pode não atingir o nó). Desta forma, o ARQ poderia provocar um impacto significativo na DER.

REFERÊNCIAS

ADELANTADO, Ferran et al. Understanding the limits of LoRaWAN. **IEEE Communications Magazine**, v. 55, n. 9, p. 34-40, 2017.

ANATEL **Resolução nº 506/08** Art. 39

ANDREEV, Sergey et al. Understanding the IoT connectivity landscape: a contemporary M2M radio technology roadmap. **IEEE Communications Magazine**, v. 53, n. 9, p. 32-40, 2015.

AUGUSTIN, ALOYS ET AL. A Study of LoRa: Long Range Low Power Networks for the Internet of Things. **Ed. Dongkyun Kim. Sensors** (Basel, Switzerland) 16.9 (2016): 1466. PMC. Web. 11 Mar. 2018.

BARRY, John. **Digital communication**. Springer, 2004

BOR, M. C., ROEDIG, U., VOIGT, T., ALONSO, J. M. Do LoRa low-power wide-area networks scale?. **Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems**. ACM, p. 59-67. 2016.

BOSS, D Blind GSM channel estimation under channel coding conditions. **IEEE Conference**. 1999

BUSINESS INSIDER. The Internet of Everything **Intelligence Estimates** 2015

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.** 60-67. 2016

GEORGIOU, Orestis; RAZA, Usman. Low power wide area network analysis: Can lora scale?. **IEEE Wireless Communications Letters**, v. 6, n. 2, p. 162-165, 2017.

GOLDSMITH, Andrea. **Wireless communications. Cambridge University Press**. 2005

HAYKIN, Simon S. **Digital communications**. New York: Wiley, 2009.

KUROSE, James. **Redes de computadores e a internet**: uma abordagem top-down. Pearson. 2013

MATLOFF, NORM. Introduction to discrete-event simulation and the simpy language. **Dept of Computer Science. University of California at Davis**. Davis, CA. Retrieved on August. 2008

MIKHAYLOV, K., PETAEJAEJAERVI, J.; HAENNINEN, T. Analysis of capacity and scalability of the LoRa low power wide area network technology. **European Wireless 2016; 22th European Wireless Conference; Proceedings of.** VDE, 2016. p. 1-6.

RAZA, U, KULKARNI, P, SOORIYABANDARA, M. Low power wide area networks: An overview. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 19, n. 2, p. 855-873, 2017.

PALATTELLA, M. R., ACCETTURA, N., VILAJOSANA, X., WATTEYNE, T., GRIECO, L. A., BOGGIA, G., DOHLER M. . Standardized protocol stack for the internet of (important) things. **IEEE communications surveys & tutorials**, 15(3), 1389-1406. 2013

SEMTECH. Datasheet - Wireless, Sensing & timing - SX1276/77/78/79. 2015

TEXAS INSTRUMENTS. Datasheet - Tiva TM4C123GH6PM Microcontroller. 2015

VOIGT, T., BOR, M., ROEDIG, U., ALONSO, J. Mitigating inter-network interference in lora networks. **arXiv preprint** arXiv:1611.00688, 2016.

ZANELLA, A., BUI, N AND CASTELLANI, A., VANGELISTA, L., ZORZI, M. Internet of things for smart cities. **IEEE Internet of Things journal.** (2014): 22-32

ANEXO A – FIRMWARE E HARDWARE DO LORA

O *hardware* foi elaborado através de um sistema embarcado de arquitetura ARM Cortex M4F. Foi utilizado a plataforma fornecida da Texas Instruments, o Tiva TM4C123G LaunchPad (TEXAS, 2010). A Figura 23 apresenta todos os módulos montados em um *case*. Ele é conectado via SPI (*Serial Peripheral Interface Bus*) no módulo LoRa (uma placa de circuito impresso com o circuito integrado, casador de impedância (balun), regulador de tensão, oscilador a cristal, filtros passivos e um conector UHF (Ultra High Frequency) para antena omnidirecional. O diagrama dos principais componentes é apresentado na figura 24. A interface SPI é composta por 3 pinos: MISO para transferência de dados do Mestre-Escravo (do microcontrolador para o módulo), MOSI para o oposto e CLK para o *clock*.

Figura 23 – Rádio LoRa

A programação do SX1276 é feita alternando os registradores, o MISO manda um pacote contendo os primeiros bytes do endereço do registrador e em seguida dois bytes contendo seu valor. As interrupções (Int) são portas de entrada e saída I/O assíncronas que revelam o estado do rádio, por exemplo, quando está no modo RX ou quando há erros de pacote.

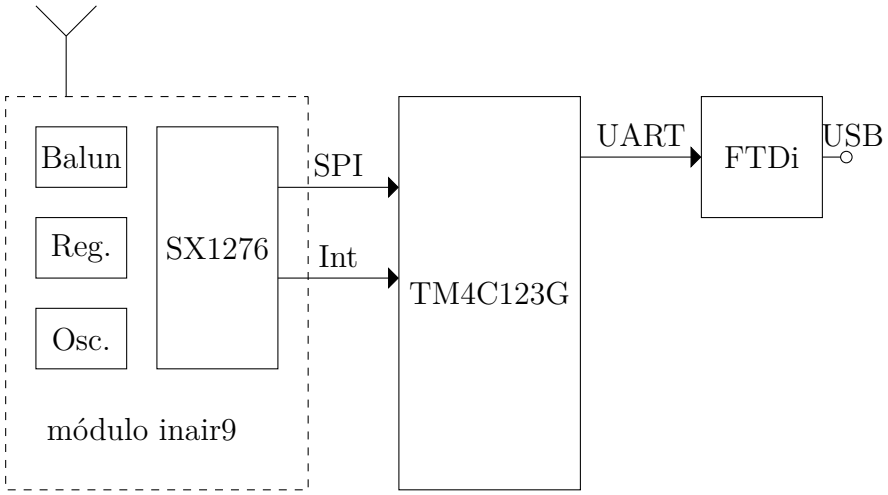



Figura 24 – Diagrama de blocos do kit LoRa, o módulo inair9 é uma placa de circuito impresso com todos os componentes mínimos para operar o RF. Balun é o casador de impedância com saída para o conector SMA. Reg. é o regulador de tensão 3v3, Osci é o oscilador de 32MHz com os devidos filtros, FTDi é um *chipset* que adiciona a interface UART serial para o barramento USB do computador.