

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

LUCAS EDUARDO RIBEIRO

MODELO PARA COMPARAÇÃO DE COBERTURA DE  
LORA E NB-IOT NO BRASIL

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2019

LUCAS EDUARDO RIBEIRO

**MODELO PARA COMPARAÇÃO DE COBERTURA DE  
LORA E NB-IOT NO BRASIL**

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: Telecomunicação e Redes.

Orientador: João Luiz Rebelatto

Coorientador: Glauber Gomes de Oliveira  
Brante

CURITIBA  
2019

#### **Dados Internacionais de Catalogação na Publicação**

Ribeiro, Lucas Eduardo

Modelo para comparação de cobertura de LoRa e NB-IoT no Brasil  
[recurso eletrônico] / Lucas Eduardo Ribeiro.-- 2019.

1 arquivo eletrônico (48 f.) : PDF ; 4,96 MB.

Modo de acesso: 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, 2019.

Bibliografia: f. 44-48.

1. Engenharia elétrica - Dissertações. 2. Internet das coisas - Brasil,  
Sul. 3. Telefonia celular. 4. Sistemas de transmissão de dados -  
Propagação. 5. Sistemas de comunicação sem fio. 6. Redes de sensores  
sem fio. 7. Redes elétricas inteligentes. 8. Métodos de simulação. 9.  
Sistemas de telecomunicação. I. Rebelatto, João Luiz, orient. II. Brante,  
Glauber Gomes de Oliveira, coorient. III. Universidade Tecnológica  
Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica  
e Informática Industrial. IV. Título.

CDD: Ed. 23 -- 621.3

## TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 831

A Dissertação de Mestrado intitulada “**Modelo para Comparação de Cobertura de LoRa e NB-IoT no Brasil**” defendida em sessão pública pelo(a) candidato(a) **Lucas Eduardo Ribeiro**, no dia **31 de julho de 2019**, 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). João Luiz Rebelatto - Presidente – (UTFPR)

Prof(a). Dr(a). Richard Demo Souza - (UFSC)

Prof(a). Dr(a). Marcos Eduardo Pivaro Monteiro- (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, 31 de julho de 2019.

Gostaria de dedicar este trabalho aos professores que me apoiaram, inspiraram e mostraram que podemos e devemos buscar nossos sonhos. Sem a orientação de muitos deles, certamente não estaria tão feliz e realizado.

## AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, gostaria de agradecer ao meu companheiro, Keverton, que sempre me apoiou e incentivou, me acalmando e reconfortando em momentos difíceis e que, com muito carinho e paciência, me acompanhou durante toda esta caminhada, tornando possível a conclusão desta etapa.

Gostaria de agradecer também ao meu orientador, João, que sempre esteve presente, com ótimas ideias e dicas, pelo excelente profissional e orientador exemplar que ele é, além do seu esforço empenhado para que este trabalho fosse realizado.

Agradeço também ao meu coorientador, Glauber, que me iniciou na pesquisa, me inspirando pessoalmente e profissionalmente.

Aos colegas do LABSC, que propiciaram um ambiente amigável e acolhedor. Aos amigos que fizeram parte desta caminhada, por todo o incentivo e todos os momentos de aprendizados juntos.

Por fim, agradeço à minha família, por todos esses anos me dando suporte e carinho, por compartilhar minhas aflições e por sempre estar torcendo por mim, até quando nem eu mesmo acreditava.

## RESUMO

RIBEIRO, Lucas E. Modelo para Comparação de Cobertura de LoRa e NB-IoT no Brasil. 48 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Nesta dissertação, é apresentado um modelo para análise de cobertura das tecnologias LoRa e NB-IoT. O modelo proposto considera os dados reais das estações-rádio base (ERBs) de determinada operadora de telefonia celular, bem como as informações do relevo local, representado por um modelo de elevação digital (DEM). Além disso, adota-se os modelos de propagação Urbano Macro e Rural Macro propostos pelo 3GPP. Esse modelo é testado em duas regiões no sul do Brasil, uma predominantemente rural, com poucas ERBs, e outra majoritariamente urbana, com uma maior densidade de ERBs. Nossos resultados indicam que, para a região rural, quando operando em uma faixa de frequência similar, NB-IoT supera LoRa devido principalmente aos efeitos de suas antenas direcionais, as quais fornecem uma melhor cobertura para dispositivos que estão longe da ERB mas perto do raio principal da antena. Na região urbana, onde a densidade das ERBs é maior, a concentração das ERBs acaba compensando a vantagem do NB-IoT em atender áreas distantes, e LoRa apresenta uma taxa de cobertura maior. Quando operando na banda de 1900 MHz, devido à maior severidade da perda de percurso nessa banda, NB-IoT apresenta uma menor taxa de cobertura do que o LoRa, independente do cenário analisado.

**Palavras-chave:** Cobertura. IoT. LoRa. NB-IoT

## ABSTRACT

RIBEIRO, Lucas E. A Coverage Model for Comparison of LoRa and NB-IoT in Brasil. 48 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

In this dissertation, a model to analyze the coverage provided by LoRa and NB-IoT technologies is presented. The proposed model considers real data from base stations (BS) of a given cellular operator, as well as information about local relief, provided by a digital elevation model (DEM). In addition, was adopted the Urban Macro and Rural Macro propagation models, which were proposed by 3GPP. The proposed model was tested in two regions in south Brazil, one mainly rural with few BS and another mostly urban, with a higher BS density. Our results indicate that for a mainly rural environment, when operating at a similar sub-GHz frequency band, NB-IoT outperforms LoRa due to the directivity associated with NB-IoT antennas, which provides better coverage for devices which are far from BS but near the main bearing. To the mainly urban region, the higher BS density of this region compensates the advantage of NB-IoT when providing coverage for distant areas, and LoRa presents a higher coverage rate. When the NB-IoT is considered to operate in the 1900 MHz band, due to the more severe path loss in this band, NB-IoT presents a lower coverage rate than LoRa, independent of the analyzed region.

**Keywords:** Coverage. IoT. LoRa. NB-IoT.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Relação entre alcance e potência/taxa de transmissão para diferentes tecnologias .....	14
Figura 2	–	Sombreamento com correlação .....	21
Figura 3	–	Topologia de uma rede LoRaWAN .....	24
Figura 4	–	Modos de operação NB-IoT .....	25
Figura 5	–	Padrão de radiação antena CV65BSX-M .....	27
Figura 6	–	Modelo de Elevação Digital .....	29
Figura 7	–	Região 1 - Predominantemente Rural .....	31
Figura 8	–	Região 2 - Predominantemente Urbana .....	32
Figura 9	–	Diagrama em Blocos do Modelo de Simulação Proposto .....	33
Figura 10	–	Função de Distribuição Cumulativa (CDF) para UEs na Região 1 .....	38
Figura 11	–	Cobertura na Região 1 .....	39
Figura 12	–	Função de Distribuição Cumulativa (CDF) para UEs na Região 2 .....	40
Figura 13	–	Cobertura na Região 2 .....	41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Parâmetros Típicos para o modelo de propagação .....	19
Tabela 2	–	Especificações técnicas para LoRa e NB-IoT .....	26
Tabela 3	–	Parâmetros de simulação para LoRa e NB-IoT. ....	28
Tabela 4	–	Comparação métodos para cálculo de distância. ....	30
Tabela 5	–	Parâmetros de Simulação. ....	32

## LISTA DE SIGLAS

3GPP	3rd Generation Partnership Project
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
CDF	Função de Distribuição Cumulativa, do inglês <i>Cumulative Distribution Function</i>
DEM	Modelo de elevação digital, do inglês <i>Digital Elevation Model</i>
ERB	Estação Rádio Base
ERPI	Potência isotrópica radiada equivalente, do inglês <i>Equivalent Isotropically Radiated Power</i>
GPRS	Serviços gerais de pacotes por rádio, do inglês <i>General Packet Radio Service</i>
GSM	Sistema Global para Telefonia Móvel, do inglês <i>Global System for Mobile communication</i>
HARQ	<i>Hibrid Automatic Repeat reQuest</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IoT	Internet das coisas, do inglês <i>Internet of Things</i>
ISM	Industrial, Científica e Médica, do inglês <i>Industrial, Scientific and Medical</i>
LoRa	Long Range
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
LWPAN	Redes de baixo consumo e longo alcance, do inglês <i>Low Power Wide Area Network</i>
MCL	<i>Maximum Coupling Loss</i>
MTC	Comunicação Máquina à Máquina, do inglês <i>Machine-type Communications</i>
NLOS	Sem linha de visada, do inglês <i>Non-Line of Sight</i>
PAN	Redes de área pessoal, do inglês <i>Personal Area Network</i>
PRB	Bloco de recurso físico, do inglês <i>Physical Resource Block</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
RMa	Rural Macro
RSSF	Redes de Sensores Sem Fio
SF	taxa de espalhamento espectral, do inglês <i>Spreading Factor</i>
UE	Equipamento de Usuário, do inglês <i>User Equipment</i>
UMa	Urbano Macro
UMTS	Sistema Universal de Telefonia Móvel, do inglês <i>Universal Mobile Telecommunication System</i>
UNB	Banda ultra estreita, do inglês <i>Ultra Narrow Band</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$d$	Distância entre transmissor e receptor
$f_c$	Frequência da portadora
$h_{UE}$	Altura do equipamento de usuário
$h_{BS}$	Altura da ERB
$h$	Altura média das construções entre uma ERB e UE
$W$	Largura média das ruas
$X$	Sombreamento com distribuição log-normal
$\sigma$	Desvio padrão do sombreamento
$d_{corr}$	Distância de correlação
$R(\Delta x, \Delta y)$	Correlação espacial
$\theta_{HP}$	Ângulo de Meia Potência, do inglês <i>Half-Power Beam Width</i>
$d_{haversine}$	Distância Haversina
$N_p$	Número de Pixels
$N_{BS}$	Número de ERBs
$PL^{\mathfrak{t}}(i, p)$	Perda de percurso entre a ERB $i$ e o pixel $p$ dada uma tecnologia $\mathfrak{t}$
$AG^{\mathfrak{t}}(i, p)$	Ganho da antena $i$ para o pixel $p$ dada uma tecnologia $\mathfrak{t}$
$LinkLoss$	Perdas estimadas
$L^{\mathfrak{t}}(i)$	Perdas adicionais para ERB $i$ dada uma tecnologia $\mathfrak{t}$
$\phi^{\mathfrak{t}}(p)$	Indicador de cobertura para pixel $p$ dada a tecnologia $\mathfrak{t}$
$v^{\mathfrak{t}}$	Taxa de cobertura para tecnologia $\mathfrak{t}$

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1 REVISÃO DA LITERATURA	14
1.2 MOTIVAÇÃO	16
1.3 OBJETIVOS	16
1.3.1 Objetivo Geral	16
1.3.2 Objetivos Específicos	16
1.4 PUBLICAÇÕES	17
1.5 ESTRUTURA DO DOCUMENTO	17
<b>2 PRELIMINARES</b>	<b>18</b>
2.1 PROPAGAÇÃO NO CANAL SEM FIO	18
2.1.1 Propagação em Larga Escala	18
2.1.1.1 Sombreamento com Correlação	20
2.1.2 Propagação em Pequena Escala	20
2.1.3 Link-Budget	21
2.2 LoRa <i>vs</i> NB-IoT	22
2.2.1 LoRa	22
2.2.2 NB-IoT	24
2.3 ANTENA DIRECIONAL	26
<b>3 MODELO DO SISTEMA</b>	<b>28</b>
3.1 MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO	29
3.2 DISTÂNCIA ENTRE DUAS COORDENADAS	30
3.3 REGIÕES ANALISADAS	31
3.4 MODELO DE SIMULAÇÃO	32
3.4.1 Pré-processamento de Dados	33
3.4.2 Simulador	34
3.4.3 Pós-Processamento	35
<b>4 RESULTADOS NUMÉRICOS</b>	<b>37</b>
4.1 REGIÃO 1 (RURAL)	37
4.2 REGIÃO 2 (URBANA)	38
<b>5 CONCLUSÃO</b>	<b>42</b>
5.1 TRABALHOS FUTUROS	43
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>44</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O conceito de internet das coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*) foi cunhado no final dos anos 1990 e ganhou grande popularidade no início do século com a promessa de conectar pessoas e objetos a qualquer hora ou lugar, com qualquer um ou qualquer coisa (SUNDMAEKER et al., 2010). De acordo com Perera et al. (2014b) os objetos inteligentes poderiam interagir diretamente, trocando dados e informações, analisando nossas preferências e necessidades, e então executarem ações sem a necessidade de um comando explícito.

Com a perspectiva de conectar bilhões de aparelhos e pessoas em um ambiente inteligente, através de uma infraestrutura multi-plataforma, multi-tecnologia e multi-protocolo, a expectativa era que até 2020 mais de 50 bilhões de objetos e dispositivos estivessem conectados (COLINA et al., 2016; EVANS, 2011). Contudo segundo pesquisa divulgada em 2018 pela empresa de pesquisa de mercado IoT Analytics, até 2020 deve haver cerca de 22 bilhões de dispositivos conectados à internet, dos quais 9,9 bilhões seriam dispositivos voltados ao mercado de IoT (LUETH, 2018). Apesar dessa queda na estimativa da quantidade de dispositivos, a penetração e onipresença de equipamentos baratos, com capacidade de sensoriamento e comunicação, nas mais diversas áreas tem sustentado a visão anunciada pela internet das coisas (PALATTELLA et al., 2016).

Como ressaltado por Perera et al. (2014b) e Perera et al. (2014a) o conhecimento do contexto no qual um objeto ou pessoa está inserido (*context-awareness*) é um requisito essencial para possibilitar interações inteligentes. O conceito de contexto pode ser interpretado como uma informação que pode ser utilizada para caracterizar uma pessoa, objeto ou lugar (ABOWD et al., 1999). Dessa forma, Alcaraz et al. (2010) aponta as redes de sensores sem fio (RSSF) como um dos elementos fundamentais para a IoT, pois é através dessas redes que a maioria dos dados seriam obtidos para formar o contexto necessário aos objetos inteligentes. As RSSF são caracterizadas principalmente pela sua restrição no uso da energia, por possuírem um grande número de nós com capacidade de sensoriamento, e por terem a capacidade de se auto reconfigurarem e adaptarem para garantir que perdas de nós ou falhas de comunicação não atrapalhem o processo de sensoriamento (LOUREIRO et al., 2003).

O mercado de IoT possui uma ampla gama de aplicações distribuída em diversos domínios, tais como: saúde, agricultura, cidades inteligentes, automação residencial, rastreamento, etc. Esta variedade de aplicações exige diferentes requisitos de comunicação

que por sua vez impulsionaram o desenvolvimento de uma grande variedade de tecnologias de comunicação nos últimos anos. Algumas tecnologias de curto alcance como Zigbee, 6LoWPAN, Bluetooth Low Energy e Z-wave acabaram se restringindo a aplicações em redes de área pessoal (PANs, do inglês *Personal Area Networks*) e automação residencial, por não serem adaptadas para transmissão de dados por longas distâncias. Soluções tradicionais baseadas em tecnologias celulares como 2G, 3G e 4G podem cobrir longas distâncias mas ao custo de um consumo muito elevado de energia (MEKKI et al., 2019).

Devido a essa demanda imposta pelo mercado, novas tecnologias surgiram, e estão surgindo, para possibilitar uma comunicação sem fio por longas distâncias, visando dispositivos em locais remotos ou com cobertura pobre, e com um baixo consumo de energia, visto que grande parte desses aparelhos utilizam baterias como fonte de energia (AL-FUQAHA et al., 2015). Tais tecnologias sem fio para IoT são normalmente divididas em duas categorias principais: Redes de baixo consumo e longo alcance (LWPANs, do inglês *Low Power Wide Area Networks*) e Celular (LAURIDSEN et al., 2017). Segundo (SINHA et al., 2017) o LoRaWAN é um dos principais protocolos para LWPANs. Esse protocolo utiliza o esquema de modulação proprietário LoRa (*Long Range*), desenvolvido pela Semtech<sup>1</sup>, que permite uma baixa taxa de transmissão de dados, através de longas distâncias, utilizando baixa potência.

Além do LoRaWAN surgiram outros padrões de comunicação para LWPANs como Sigfox<sup>2</sup>, uma solução fim a fim que utiliza uma técnica de modulação em banda ultra estreita (UNB, do inglês *Ultra Narrow Band*) evitando ruído a custo de reduzir a taxa. Segundo Amaral (2017) já existem redes operacionais de Sigfox no Brasil desde 2017. Existem outras soluções LWPAN como o Weightless-N e o D7AP, contudo, não há conhecimento de redes com essas tecnologias instaladas no Brasil. O Weightless-N é um padrão aberto, desenvolvido pelo Weightless Special Interest Group<sup>3</sup>, projetado para o “*uplink*” de dados de sensores que também utiliza uma banda ultra estreita como o Sigfox (LINKLABS, 2015). O D7AP é um protocolo aberto, especificado pela DASH7 Alliance<sup>4</sup>, baseado no padrão ISO/IEC 18000-7, que opera na faixa do sub-GHZ (AYOUB et al., 2018).

As tecnologias celulares, que vinham sendo representadas até então principalmente pelo GPRS (Serviços gerais de pacotes por rádio, do inglês *General Packet Radio Service*), tem atualmente o Narrowband (NB)-IoT como sua principal

---

<sup>1</sup>[www.semtech.com/lora](http://www.semtech.com/lora)

<sup>2</sup>[www.sigfox.com](http://www.sigfox.com)

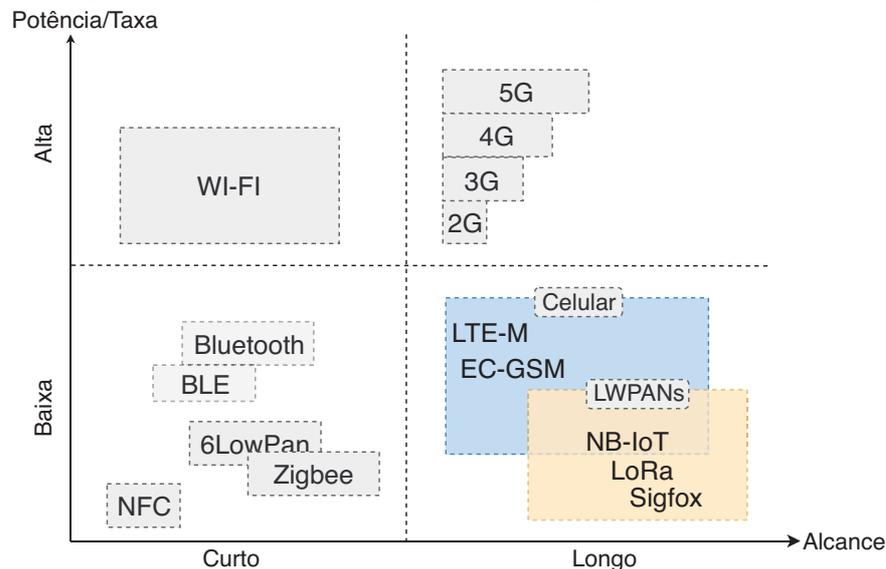
<sup>3</sup>[www.weightless.org/about/what-is-weightless](http://www.weightless.org/about/what-is-weightless)

<sup>4</sup>[dash7-alliance.org](http://dash7-alliance.org)

representante (LAURIDSEN et al., 2017). Padronizado pelo 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), NB-IoT deve suportar um grande número de dispositivos de baixo custo, com baixas taxas de transmissão e com uma alta eficiência energética (AYOUB et al., 2018). Testes com NB-IoT operando no modo *in-band* e utilizando a banda dos 700 MHz, foram realizados no interior do Brasil, para regiões de baixa densidade populacional, e indicam um alcance de até 100 km (INFORCHANNEL, 2019). Além do NB-IoT, o 3GPP definiu mais duas categorias de dispositivos visando o mercado de IoT e MTC (Comunicação Máquina à Máquina, do inglês *Machine-type Communications*): o LTE-M, que é uma solução puramente LTE, não compatível com GSM (Sistema Global para Telefonia Móvel, do inglês *Global System for Mobile communication*) ou UMTS (Sistema Universal de Telefonia Móvel, do inglês *Universal Mobile Telecommunication System*); e o EC-GSM-IoT, que pretende alterar o GSM para se adequar à realidade das comunicações para IoT (SCHLIENZ; RADDINO, 2016; WANG et al., 2017).

A Figura 1, adaptada de (MEKKI et al., 2019), apresenta qualitativamente um comparativo entre alcance e potência/taxa de transmissão para algumas das tecnologias de comunicação sem fio utilizadas para IoT.

**Figura 1 – Relação alcance e taxa de transmissão para diferentes tecnologias.**



Fonte: Adaptado de Mekki et al. (2019)

## 1.1 REVISÃO DA LITERATURA

Por se tratarem de tecnologias recentes, ainda há um vasto campo para pesquisa, principalmente no que tange trabalhos levando em conta cenários realistas. Uma análise

de cobertura considerando um cenário realístico é desenvolvida por Lauridsen et al. (2017), comparando as tecnologias LoRa, Sigfox, GPRS e NB-IoT, para uma região no norte da Dinamarca, onde foram levados em contas os aspectos daquela região e também foram considerados que os dispositivos poderiam estar localizados apenas em endereços válidos (locais com edificações). Os resultados mostraram que NB-IoT fornece, para aquela região, a melhor cobertura entre todas as tecnologias analisadas.

Os autores, Vejlgard et al. (2017), estenderam o trabalho feito na região Dinamarquesa incluindo uma análise de capacidade e comparando a probabilidade de colisão no *uplink*. Para o cenário apresentado, novamente, NB-IoT mostrou um melhor desempenho apresentando a menor probabilidade de falha no *uplink* (VEJLGAARD et al., 2017). Um estudo similar envolvendo cobertura e capacidade em áreas rurais foi desenvolvido por Lauridsen et al. (2016), no qual os autores comparam duas categorias de UE propostas pelo 3GPP, NB-IoT e LTE-M. Os resultados mostraram que, apesar de NB-IoT fornecer uma melhor cobertura, o LTE-M suporta mais dispositivos graças à sua maior banda e menor *overhead*.

A cobertura para tecnologias de IoT é estudada também por Adhikary et al. (2016), que fazem uma análise teórica de cobertura para NB-IoT, na qual os resultados de simulação corroboram um aumento na máxima perda admissível (MCL) na ordem de 20 dB quando comparado com o LTE tradicional. Os autores Mangalvedhe et al. (2016) analisam os problemas relacionados à implantação do NB-IoT em apenas parte das Estações Rádio Base (ERBs), o que poderia causar uma forte interferência entre as células que utilizam NB-IoT e às destinadas ao LTE tradicional. Como mostrado pelos autores, este problema pode ser evitado pulando o bloco de recurso físico (PRB) utilizado por ERBs que não implementaram o NB-IoT. E Grión et al. (2017) utiliza um software proprietário para estimar a cobertura LoRa em duas cidades densamente urbanas na Argentina (Buenos Aires e Córdoba), e compara os resultados teóricos com medidas reais realizadas nessas cidades. Os resultados mostram que a simulação gerou resultados próximos dos que foram realmente medidos, se mostrando um pouco mais rigorosa do que na prática.

Neste trabalho, foi proposto comparar a cobertura provida pelas tecnologias LoRa e NB-IoT operando no modo *standalone* para duas áreas na região Sul do Brasil, que juntas correspondem a um total de aproximadamente 8.182 km<sup>2</sup>. O foco é comparar as tecnologias para um cenário externo (*outdoor*), uma vez que o mesmo leva em conta toda a área e não apenas locais com endereços válidos como considerado em (LAURIDSEN et

al., 2017). Além de comparar a cobertura das tecnologias para duas regiões diferentes, foi avaliado o efeito do NB-IoT operando em duas bandas distintas disponíveis para operação do GPRS (850 e 1900 MHz) (ANATEL, 2018a).

## 1.2 MOTIVAÇÃO

As aplicações em IoT crescem nas mais diversas áreas e domínios, gerando demanda de redes, para o tráfego desses dados, com diferentes características e restrições. Apesar de termos um cenário bem estabelecido para aplicações de pequena distância, o estudo de tecnologias de longo alcance e baixo consumo ainda se mantém principalmente no universo teórico.

Estudos quanto à cobertura no Brasil dessas tecnologias ainda são escassos e desconhecidos pelos autores. Um estudo da cobertura das principais tecnologias dessa área poderia auxiliar a determinação de qual a melhor tecnologia para determinada região e acelerar a utilização e criação de novas aplicações de IoT no Brasil.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral

Comparar a cobertura fornecida pelas duas principais tecnologias para redes de longo alcance e baixo consumo, a saber LoRaWAN e NB-IoT, em dois cenários realísticos um predominantemente rural e outro majoritariamente urbano.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Utilizar dados topográficos e da infraestrutura de uma operadora local a fim de obter um cenário mais realístico possível.
- Apresentar o percentual de usuários que seriam atendidos pelas tecnologias propostas caso as mesmas fossem implementadas considerando a atual infraestrutura de uma operadora local.
- Avaliar a cobertura em duas regiões distintas com o intuito de verificar a influência da topografia e disposição das ERBs na cobertura.

## 1.4 PUBLICAÇÕES

- Artigos submetidos para periódicos<sup>5</sup>:

RIBEIRO, L. E.; TOKIKAWA D. W.; REBELATTO, J. L.; BRANTE, G. Comparison between LoRa and NB-IoT Coverage in Urban and Rural Southern Brazil Regions. **International Journal of Communication Systems**. 2019.

## 1.5 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

O restante deste documento está organizado da seguinte maneira: No Capítulo 2 foram comparados aspectos das tecnologias LoRa e NB-IoT, bem como alguns conceitos importantes sobre transmissão sem fio como perda de percurso, sombreamento e *link-budget*. No Capítulo 3 é apresentado o modelo do sistema, as premissas utilizadas para simulação e as duas regiões selecionadas para esse estudo. No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos através de simulação. Por fim, no Capítulo 5 são apresentados comentários finais e propostas para trabalhos futuros.

---

<sup>5</sup>Aguardando revisão

## 2 PRELIMINARES

### 2.1 PROPAGAÇÃO NO CANAL SEM FIO

#### 2.1.1 Propagação em Larga Escala

Modelos de propagação de larga escala são muito utilizados para determinação da potência média recebida de um sinal no receptor e são úteis para estimar a área de cobertura de um transmissor (RAPPORT, 2002). Estes modelos buscam prever qual a atenuação do sinal sofrida no percurso entre o transmissor e o receptor.

A perda de percurso é uma característica intrínseca ao canal sem fio que prejudica a comunicação. É causada pela dissipação de potência radiada pelo transmissor durante a propagação. Outro tipo de perda presente no canal sem fio é o sombreamento, uma atenuação causada no sinal devido a presença de obstáculos entre o transmissor e o receptor, e ocorre principalmente devido aos efeitos de absorção, reflexão, espalhamento e difração. Enquanto as perdas por radiação ocorrem da escala de metros até quilômetros, as perdas relacionadas ao sombreamento se dão à distâncias da ordem do obstáculo (metros até centenas de metros) (GOLDSMITH, 2005).

Quando o efeito do sombreamento não é levado em conta, a perda de percurso geralmente é considerada constante para uma dada distância entre o transmissor e o receptor, uma vez que está ligada apenas às características de dissipação de potência por radiação. Em modelos onde o sombreamento é levado em conta, as perdas de percurso dependem das características do ambiente de propagação do sinal (obstáculos entre e próximos ao transmissor e receptor). Devido à complexidade para se obter um modelo determinístico preciso, comumente esses sistemas são modelados estocasticamente (GOLDSMITH, 2005).

Utilizar as equações de Maxwell para determinar a propagação de ondas em ambientes reais pode ser extremamente complicado, por isso a maioria dos modelos utilizam técnicas de aproximação de traçado de raios (*ray-tracing*). Existem vários modelos para estimar as perdas em larga escala, dentre eles métodos analíticos e métodos empíricos. Os métodos analíticos não apresentam nenhum tipo de ajuste experimental. Entre os modelos analíticos mais conhecidos estão o modelo do espaço livre e modelo dos dois raios. Em contrapartida, modelos empíricos são baseados em medidas, e normalmente são dados para uma dada faixa de distâncias e frequências em um determinado ambiente

(rural, urbano, industrial, ...). Os modelos Empíricos mais comuns são o modelo log-distância e o modelo de Okumura/Hata (GOLDSMITH, 2005).

Neste trabalho, seguindo Lauridsen et al. (2017), utilizamos para modelar a propagação em larga escala os modelos Rural Macro (RMa) e Urbano Macro (UMa) sem linha de visada (NLOS), os quais foram propostos pelo 3GPP e levam em conta tanto aspectos práticos quanto teóricos para gerar um modelo mais preciso. Segundo 3GPP (2010) a perda de percurso para uma dada distância  $d$  (em metros) entre o transmissor e o receptor é dada por:

$$PL = 161,04 - 7,1 \log_{10} W + 7,5 \log_{10} h - (24,37 - 3,7(h/h_{BS})^2) \log_{10} h_{BS} + \\ + (43,42 - 3,1 \log_{10} h_{BS})(\log_{10} d - 3) + 20 \log_{10} f_c - (3,2(\log_{10} 11,75 h_{UE})^2 - 4,97) + X, \quad (1)$$

onde  $f_c$  representa a frequência da portadora (em GHz),  $h_{UE}$  e  $h_{BS}$  representam respectivamente a altura do equipamento de usuário (UE, *User Equipment*) e das ERBs,  $h$  representa a altura média das construções entre a ERB e o UE,  $W$  representa a largura média das ruas e  $X \sim (0, \sigma)$  uma variável aleatória que representa o sombreamento, com distribuição log-normal de media nula e desvio padrão  $\sigma$ . Em (1), todas as distâncias estão em metros e os logaritmos são base 10.

Como sugerido em (3GPP, 2010), os parâmetros em (1) têm valores diferentes dependendo das características do ambiente, como apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1 – Parâmetros Típicos para o modelo de propagação proposto (3GPP, 2010).**

Parâmetro	Urbano Macro	Rural Macro
Altura dos UEs ( $h_{UE}$ )		1,5 m
Largura das ruas ( $W$ )		20 m
Altura das construções ( $h$ )	20 m	5 m
Desvio padrão – sombreamento ( $\sigma$ )	6	8

Em (1), a frequência da portadora é admitida dentro da faixa de 450 MHz a 6 GHz. Como a frequência da portadora depende da tecnologia e a altura da antena das ERBs, depende da infraestrutura instalada que varia de ERB para ERB, esse parâmetros não são consideradas na Tabela 1 (3GPP, 2010).

### 2.1.1.1 Sombreamento com Correlação

Na prática, dispositivos que estão próximos não estão totalmente descorrelacionados, apresentando um certo grau de correlação em função da distância. Fraile et al. (2004) apresentam um modelo de sombreamento em duas dimensões que leva em conta a distância como parâmetro de correlação. Esse modelo funciona como um filtro para a variável aleatória que descreve o sombreamento, correlacionando os pontos que estão a uma distância menor ou igual que  $d_{\text{corr}}$  (distância de correlação). Assim, pontos que estão separados por uma distância maior que  $d_{\text{corr}}$  não apresentam correlação.

Segundo Fraile et al. (2004) a expressão para a correlação do sombreamento pode ser expressa por,

$$R(\Delta x, \Delta y) = 2 \frac{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}{d_{\text{corr}}}, \quad (2)$$

onde  $R(\Delta x, \Delta y)$  é a correlação espacial para uma dado deslocamento e  $\Delta x$  e  $\Delta y$  correspondem, respectivamente, a deslocamentos em relação ao eixo  $x$  e ao eixo  $y$ . Como demonstrado por Fraile et al. (2004), podemos aplicar a Transformada de Fourier para obter a autocorrelação em (2), que serve de filtro para a variável aleatória que descreve o sombreamento.

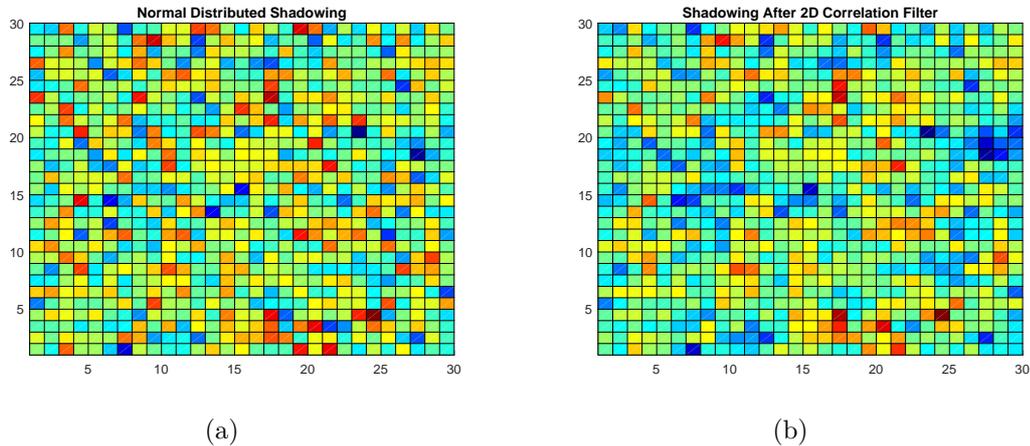
A Figura 2 ilustra o efeito que a correlação apresenta quando plotados, os valores da variável aleatória que representa o sombreamento em uma grade (com pixels quadrados de aproximadamente 93 metros de largura). A Figura 3(a) apresenta essa grade antes de ser aplicado o filtro e a Figura 3(b) a mesma grade após ser aplicado um filtro com distância de correlação igual à 120 metros, o que segundo 3GPP (2010), seria adequado para um ambiente rural.

A cor dos pixels na Figura 2 representa a quantidade de perdas naquela área: quanto mais azul for a cor do pixel maior é a perda por sombreamento naquele ponto, e quanto mais vermelho for a cor do pixel menor é a perda nele. Assim, quando comparado com o cenário sem correlação, percebe-se que após aplicar o filtro surgem pequenos aglomerados onde os pixels são mais azuis ou vermelhos.

### 2.1.2 Propagação em Pequena Escala

A variação rápida na amplitude do sinal recebido que acomete o canal sem fio é chamada de desvanecimento ou *fading*. Esse fenômeno ocorre pois a propagação do sinal no canal sem fio está sujeita ao efeito do multi-percurso, assim o receptor recebe

**Figura 2 – Comparação entre (a) Sombreamento descorrelacionado e (b) sombreamento com distância de correlação de 120 metros. Cada pixel na grade corresponde a uma área de 93m x 93m. Quanto mais azul o pixel, maior as perdas por sombreamento naquela localização, neste exemplo onde o desvio padrão é igual a 1, o valor tende para +3 dB. O contrário também é verdadeiro, quanto mais vermelho o pixel, menores são as perdas, tendendo a -3 dB.**



**Fonte: Autoria própria.**

uma soma de várias versões do sinal, deslocadas no tempo e defasadas. A soma dessas diferentes componentes do sinal pode ser construtiva ou destrutiva, fazendo com que a amplitude do sinal no receptor varie bastante (até três ou quatro ordens de magnitude) (RAPPORT, 2002; TSE; VISWANATH, 2005).

Segundo Rapport (2002), a fase do sinal recebido é aleatória, pois depende da composição dessas diferentes componentes. Devido a esse caráter aleatório do sinal recebido, pequenos deslocamentos na posição do receptor (da ordem de meio comprimento de onda) afetam significativamente a amplitude do sinal recebido e, em vista disso, modelos de desvanecimento são também conhecidos como modelos de propagação em pequena escala.

Por se tratar de um fenômeno que ocorre em pequena escala, de caráter estatístico e com flutuações rápidas, a média das variações em pequena escala é geralmente nula e portanto seu efeito, o desvanecimento, normalmente não é considerado quando analisamos a taxa de cobertura para uma determinada região (GOLDSMITH, 2005).

### 2.1.3 Link-Budget

O *Link Budget* é definido como a relação entre a potência dos sinais na saída da antena do receptor e na entrada da antena do transmissor, incluindo todos os ganhos

e perdas ocorridos no sistema. Ou seja, o *Link Budget* é medida de todas as perdas e ganhos de um sistema de comunicação, do transmissor até o receptor (SEMTECH, 2015). Contudo para sistemas celulares devem ser considerados também os ganhos na antena de recepção e eventuais perdas em cabos na estação transmissora (3GPP, 2015).

O projeto de qualquer sistema de comunicação sem fio acaba, de alguma forma, envolvendo o cálculo do *link budget*, o qual de maneira genérica pode ser expresso como (ZYREN; PETRICK, 1998),

$$P_{tx} = P_{rx} - G_{tx} - G_{rx} + PL + M, \quad (3)$$

onde  $P_{tx}$  é a potência de transmissão,  $P_{rx}$  é a potência média recebida,  $G_{tx}$  e  $G_{rx}$  se referem aos ganhos das antenas transmissoras e receptoras,  $PL$  a perda de percurso estimada e  $M$  é um parâmetro de margem ajustado para compensar o desvanecimento. Todos os valores em (3) estão em dB.

A sensibilidade do receptor pode ser traduzida no MCL, do inglês *Maximum Coupling Loss*, esse parâmetro representa o máximo de potência que pode ser perdida durante uma transmissão para que ainda exista comunicação, ou seja, sem que o receptor esteja em *Outage*.

## 2.2 LoRa vs NB-IoT

### 2.2.1 LoRa

LoRa utiliza um esquema de modulação proprietário (*LoRa Spreading Spectrum*) o qual negocia entre taxa e sensibilidade, permitindo comunicação em longas distâncias com um baixo consumo (AYOUB et al., 2018; SEMTECH, 2018). Técnicas de espalhamento espectral, ou *spread spectrum techniques*, espalham um sinal de banda estreita sobre uma banda maior mantendo a densidade de potência, assim o sinal modulado detém características de ruído, tornando-o mais resistente a atenuações e interferências em frequências específicas, ataques de interferência (*jamming*) ou espionagem (*eavesdropping*) (RAZA et al., 2017).

Nesse método de modulação, quanto maior o fator de espalhamento (SF, maior é o tempo de transmissão da mensagem e maior o alcance. Porém, como o tempo de transmissão é aumentado, há um aumento também de consumo energético (ADELANTADO et al., 2017). Uma vantagem da dessa técnica de modulação

com relação às técnicas tradicionais de espalhamento espectral é que a frequência do sinal chirp varia continuamente, assim o deslocamento (*offset*) de frequência e tempo entre o transmissor e o receptor são equivalentes, simplificando bastante a complexidade do receptor (SEMTECH, 2015).

Segundo Raza et al. (2017), essa técnica permite decodificar um sinal extremamente degradado, mesmo vários dBs abaixo do nível de ruído de fundo (*noise floor*). Além disso, como os fatores de espalhamento são ortogonais, eles funcionam como um terceiro grau de liberdade para a diversidade, pois como o tempo e a frequência, permite mitigar os efeitos do desvanecimento utilizando canais independentes, SF diferentes, para transmitir a mesma mensagem.

Em 2015 foi publicada pela LoRaAlliance<sup>1</sup> a primeira versão do protocolo LoRaWAN, cuja camada física adota o esquema de modulação LoRa e opera na banda sub-GHz ISM (Industrial, Científica e Médica, do inglês *Industrial, Scientific and Medical*). Por operar em uma banda não licenciada a qualidade de serviço não pode ser garantida como em uma banda licenciada, e as transmissões devem respeitar os limites específicos estabelecidos para cada região (máximo tempo no ar, *duty-cycle* e potência de transmissão por exemplo) (SINHA et al., 2017).

O protocolo LoRaWAN utiliza uma topologia estrela que consiste de um conjunto de dispositivos finais (*end-devices*) e um *gateway*. Um dispositivo final pode enviar suas informações a um ou mais *gateways*, pois esses atuam apenas como retransmissores, entregando a mensagem ao servidor de rede (*network server*). O *gateway* LoRa não realiza nenhum tipo de controle sobre as mensagens, ficando a cargo do servidor de rede gerenciar mensagens repetidas e qual o *gateway* responsável por enviar informações a um determinado dispositivo final. Do lado da aplicação, o servidor de aplicação faz a gestão das aplicações, da inclusão de novos dispositivos e encriptação dos dados do *payload* (LAVRIC; POPA, 2017). A Figura 3 ilustra a topologia de uma rede LoRaWAN.

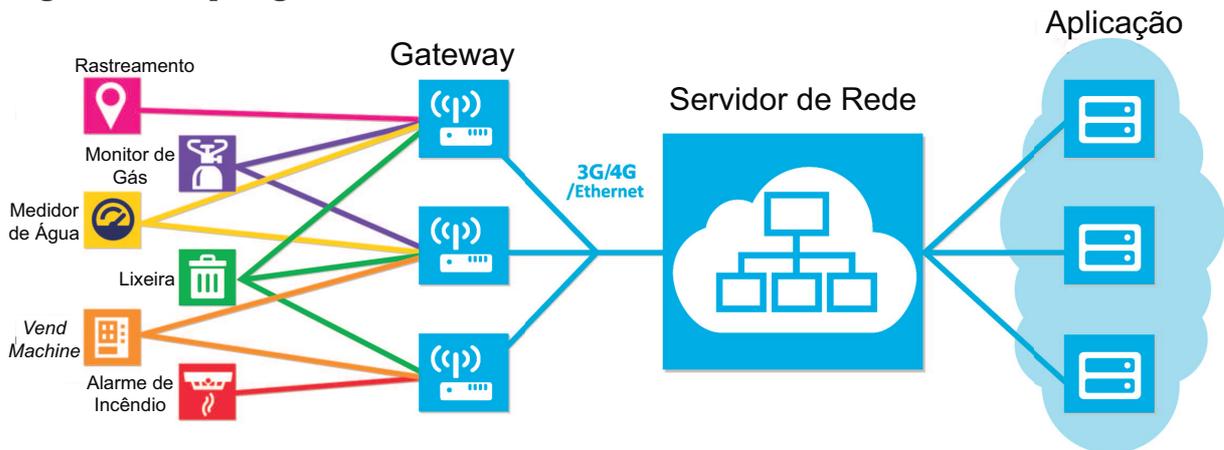
A especificação do LoRaWAN estabelece três classes de dispositivos finais, com diferentes requisitos de latência, que podem operar juntos em uma mesma rede:

- Classe A: Nesta classe, os dispositivos finais são capazes de receber mensagens apenas durante duas janelas de recepção abertas logo depois de uma transmissão. Essa classe possui o menor gasto energético, porém requer requisitos de latência para

---

<sup>1</sup><https://lora-alliance.org>

Figura 3 – Topologia de uma rede LoRaWAN.



Fonte: Adaptado de Techplayon (2017).

o *downlink* relaxados, visto que uma mensagem endereçada a um desses dispositivos deverá esperar uma transmissão para poder ser entregue.

- Classe B: Além das duas janelas de recepção implementadas em dispositivos da classe A, os dispositivos da classe B abrem janelas periódicas para recepção de mensagens. *Beacons* periódicos são enviados do *gateway* para que as janelas de recepção estejam sincronizadas com as transmissões de *downlink*.
- Classe C: Os dispositivos da classe C estão quase sempre escutando por mensagens, as janelas de recepção são fechadas apenas quando o dispositivo está transmitindo, por isso esta classe possui o maior consumo de energia.

## 2.2.2 NB-IoT

NB-IoT foi proposto pelo 3GPP em 2016 como parte da *Release 13* com intuito de melhorar cobertura, eficiência energética e reduzir a complexidade para dispositivos IoT baseados em redes celulares comparados à outras tecnologias celulares (3GPP, 2016). Uma das maiores vantagens dessa tecnologia é que a infraestrutura para suportar essa rede já existe, e bastaria uma atualização de *software* na atual infraestrutura utilizada pelo LTE (*Long Term Evolution*) (RAZA et al., 2017). De fato, apesar do NB-IoT não ser compatível com o 3G, ele é perfeitamente compatível com o GSM, GPRS e LTE, e poderia coexistir com essas tecnologias (WANG et al., 2017).

Segundo Ratasuk et al. (2016), algumas funcionalidades do LTE foram reaproveitadas no NB-IoT a fim de mantê-lo compatível ao LTE, como segurança,

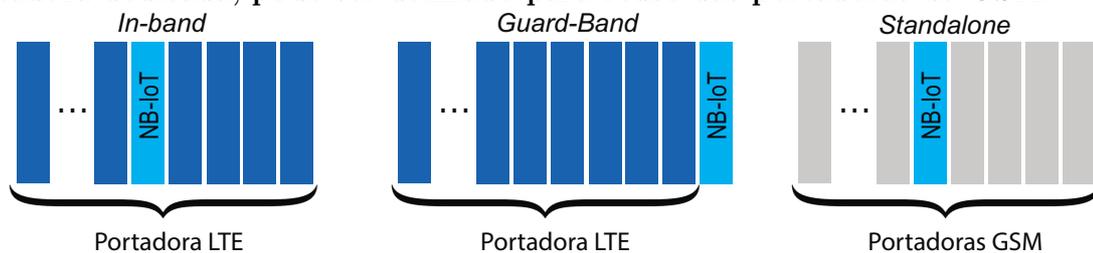
políticas de negócio, autenticação, entre outros. Contudo, várias mudanças foram feitas para reduzir a complexidade e baratear esses dispositivos, como por exemplo suportar apenas operações *Half-duplex*, permitir apenas 1 processo de retransmissão HARQ (*Hybrid Automatic Repeat reQuest*), limitar o pico de taxa abaixo de 250 kbps e não suportar *handover* entre células.

Existem três modos de operação nos quais o NB-IoT pode ser operado (RATASUK et al., 2016), são eles:

- *Standalone*: Com um espectro dedicado, utilizando uma banda de frequência que não se sobreponha à do LTE. Podendo inclusive ser um canal da banda do GSM;
- *Guard-band*: Ocupando a banda de guarda de uma portadora do LTE;
- *In-band*: Dentro da banda de uma portadora do LTE, alocando um bloco de recurso físico (PRB).

A Figura 4 ilustra os possíveis modos de operação do NB-IoT.

**Figura 4 – Modos de operação do NB-IoT. *In-band*: Dentro de uma portadora do LTE. *Guard-band*: Na banda de guarda de uma portadora LTE. *Standalone*: Com uma portadora dedicada, pode ser utilizado para reúso das portadoras do GSM.**



Fonte: Adaptado de Mangalvedhe et al. (2016).

De acordo com Feltrin et al. (2019), o NB-IoT chega a alcançar um aumento de 20 dB no MCL com respeito ao GSM e GPRS. Isso se deve à utilização de uma banda estreita (aumentando a imunidade à ruídos) e a exploração da diversidade no tempo (permite até 2048 repetições no *downlink* e 128 no *uplink*). A largura de banda é 180 kHz, e o espaçamento entre as sub-portadoras é de 15 kHz (ou 3,75 kHz quando necessária uma comunicação mais robusta no enlace de *uplink*), e a máxima modulação aplicável é QPSK (ZAYAS; MERINO, 2017).

Devido ao fato de ser uma tecnologia derivada dos sistemas celulares, o NB-IoT utiliza antenas direcionais. Essas antenas são caracterizadas por receber ou irradiar a onda de forma mais eficiente em determinada direção (BALANIS, 2005).

A Tabela 2 apresenta um panorama para LoRa e NB-IoT.

**Tabela 2 – Especificações técnicas para LoRa e NB-IoT (RAZA et al., 2017).**

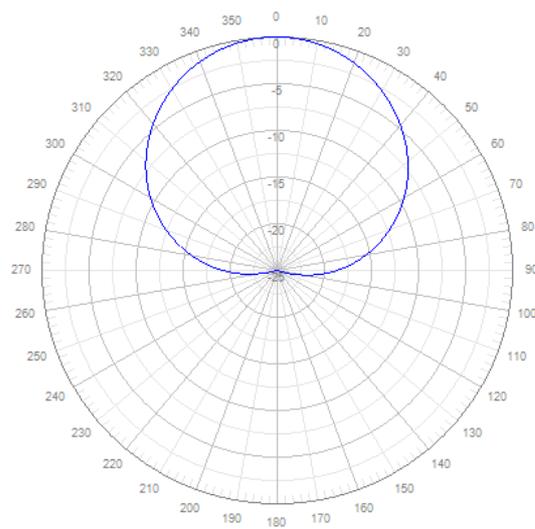
Parâmetro	LoRa	NB-IoT ( <i>downlink/uplink</i> )
Modulação	LoRa	BPSK ou QPSK
Método de Acesso	ALOHA	OFDMA/SC-FDMA
Largura de Banda	125/250/500 kHz	180 kHz
Taxa de Dados	até 27 kbps	250/20 kbps
Bidirecional	<i>Half-Duplex</i>	<i>Half-Duplex</i>
<i>Handover</i>	conexão com múltiplas ERBs	única ERB
Topologia	estrela de estrelas	estrela

### 2.3 ANTENA DIRECIONAL

Um dos principais parâmetros das antenas direcionais é o Ângulo de Meia Potência ( $\theta_{HP}$ , do inglês *Half-Power Beam Width*). Esta propriedade define o ângulo entre as duas direções na qual a intensidade de potência radiada é a metade do valor máximo. Outro parâmetro importante para antenas direcionais é a directividade, esse parâmetro mede a taxa entre a máxima e a média intensidade de potência radiada. A intensidade média é obtida considerando que a antena emite uma potência igual para todas as direções (KRAUS, 1983). O ganho das antenas direcionais depende desses parâmetros e da eficiência da antena, dados que normalmente são fornecidos pelos fabricantes juntamente com um padrão de radiação, esse padrão especifica qual é o ganho da antena em cada direção. Diferentemente das antenas direcionais, as antenas onidirecionais, como as empregadas na tecnologia LoRa, recebem e transmitem energia igualmente em todas as direções no plano azimutal (RIBEIRO, 2012).

O padrão de radiação para as antenas direcionais normalmente é fornecido pelo fabricante da antena, como por exemplo, o mostrado na Figura 5, que apresenta o padrão de radiação azimutal para a antena CV65BSX-M operando a 850 MHz com *tilt* de  $5^\circ$  (COMMSCOPE, 2013). Esse modelo de antena permite a operação em duas bandas (1710 – 2690 MHz | 790 – 960 MHz), tem ângulo de meia potência de  $65^\circ$  ( $\theta_{HP} = 65^\circ$ ) e polarização de  $\pm 45^\circ$  (COMMSCOPE, 2013).

**Figura 5 – Padrão de radiação azimutal, operando à 850 MHz, para uma antena do modelo CV65BSX-M. O ângulo zero indica a direção de maior intensidade da potência radiada.**



**Fonte: Commscope (2013).**

### 3 MODELO DO SISTEMA

No Brasil, existem atualmente quatro bandas disponíveis para uso do GSM (850, 900, 1800 e 1900 MHz), as quais são possíveis candidatas para implementação do NB-IoT (ETSI, 2017). Testes no Brasil, com NB-IoT operando no modo *in-band*, foram realizados na banda 28 (700 MHz). Neste trabalho foram analisadas as coberturas fornecidas pelo NB-IoT (operando no modo *standalone* nas bandas de 850 e 1900 MHz) e LoRa (utilizando a banda de 915 MHz) para duas áreas da região Sul do Brasil, uma majoritariamente rural e outra principalmente urbana.

Para atingir um cenário mais parecido com o real, supondo um caso de atualização do sistema GSM para o NB-IoT, foram utilizados os parâmetros reais da infraestrutura das ERBs de uma operadora local, disponibilizados pela ANATEL (ANATEL, 2018b). A posição e altura das antenas foi reaproveitada para simular a cobertura que a tecnologia LoRa forneceria caso as ERBs LoRa fossem instaladas no mesmo lugar.

Para simplificar o trabalho computacional, foram selecionados dois padrões de radiação para todas as antenas, um para operação em 850 MHz e outro para 1900 MHz. Por ser um modelo de antena comum entre as antenas instaladas nas regiões de interesse e operar nas duas bandas de frequência desejadas, optou-se pela antena CV65BSX-M (COMMSCOPE, 2013).

A Tabela 3 resume os principais parâmetros de simulação que serão utilizados para as tecnologias LoRa e NB-IoT.

**Tabela 3 – Parâmetros de simulação para LoRa e NB-IoT.**

Parâmetro	LoRa (SEMTECH, 2017)	NB-IoT (3GPP, 2015)
Potência de Transmissão	14 dBm	23 dBm
MCL	-157 dB	-164 dB
Padrão de Radiação	Onidirecional	Direcional (COMMSCOPE, 2013)
Frequência da portadora	915 MHz	850 / 1900 MHz
Ganho das antenas	10 dBi	14,67 dBi <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Valor médio. O valor exato para cada antena foi selecionado conforme os dados fornecidos para a infraestrutura instalada (ANATEL, 2018b).

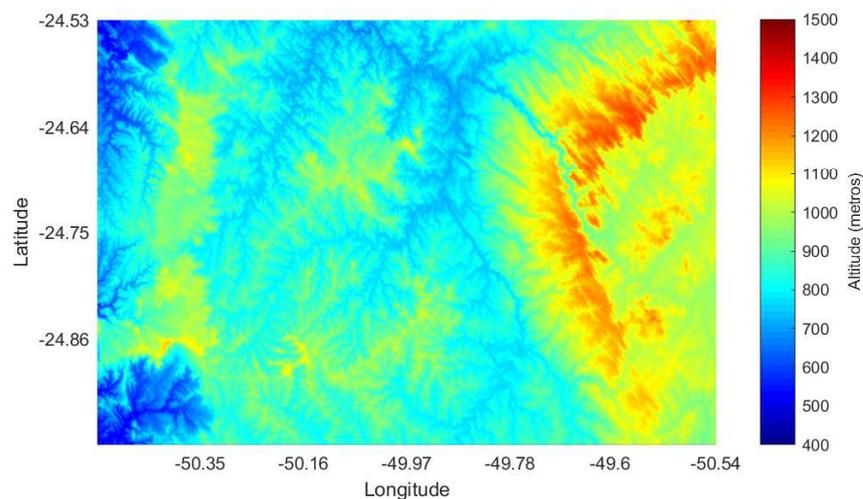
### 3.1 MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO

Um modelo de elevação digital (DEM) fornece dados topográficos de uma determinada região que são úteis para recriar o perfil de um terreno. Esses modelos fornecem uma matriz em que cada elemento corresponde a uma área de uma determinada região estudada e o valor desses elementos representam a elevação daquela área com relação ao nível do mar (RAPPORT, 2002).

O DEM utilizado nas simulações de cobertura para as duas regiões de estudo foram obtidos do INPE (2018), um banco de dados geomorfométricos do Brasil mantido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) que fornece os dados com resolução de 3 arco-segundos (aproximadamente 93 metros) e 1 arco-segundo (INPE, 2018). Utilizar uma resolução muito alta (1 arco-segundo) aumentaria muito o tempo computacional ou limitaria o tamanho da área analisada, por isso a resolução utilizada foi de 3 arco-segundos.

A Figura 6 apresenta um recorte dos dados recuperados do DEM. A cor dos pixels representa a altitude de cada pixel, quanto mais baixo o terreno mais para o azul a cor do pixel tende, quanto mais mais alto, mais ao vermelho.

**Figura 6 – As cores dos pixels representam sua altitude, quanto mais fria a cor (tender ao azul) mais baixo é o terreno, o oposto também é verdadeiro, quanto mais quente (tender ao vermelho), mais alto é terreno.**



**Fonte: Autoria própria.**

### 3.2 DISTÂNCIA ENTRE DUAS COORDENADAS

Para calcular a distância entre dois pontos na superfície terrestre, deve ser levado em conta a característica esférica do globo terrestre. Métodos para calcular a distância baseados em aproximações de terra plana, como a clássica fórmula de Pitágoras, podem ser utilizados para distâncias pequenas, para distâncias menores do que 20 km o erro pode chegar até 30 metros, para latitudes menores que 70°, o que dependendo da aplicação pode ser aceitável (CHAMBERLAIN, 1996).

Por outro lado, quando se deseja calcular distâncias relativamente grandes (da ordem de quilômetros) utilizando coordenadas, normalmente o método empregado é o *Haversine*, pois leva em conta o efeito da curvatura terrestre minimizando assim os erros (RAWLS, 2008). Supondo um ponto  $q_1(lat_1, lon_1)$ , com latitude e longitude  $lat_1$  e  $lon_1$  respectivamente, e um ponto  $q_2(lat_2, lon_2)$ , a distância haversiana  $d_{haversine}$  entre  $q_1$  e  $q_2$  pode ser expressa como

$$a = \sin((\delta_{lat})/2)^2 + \cos(lat_1) * \cos(lat_2) * \sin(\delta_{lon}/2)^2 \quad (4)$$

$$d_{haversine} = 2 * \text{atan2}(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}) * \text{Raio da Terra}, \quad (5)$$

onde  $\delta_{lat}$  é a diferença em radianos entre a latitude do ponto  $q_1$  e  $q_2$ ,  $\delta_{lon}$  a diferença em radianos entre a longitude do ponto  $q_1$  e  $q_2$ ,  $\text{atan2}(\cdot)$  é a função que representa a tangente inversa para 2 argumentos, e o raio da Terra na linha do equador tem aproximadamente 6.378 km (WILLIANS, 2019).

Para ilustrar a diferença entre o método Haversine e de Pitágoras para calcular a distância, a Tabela 4 apresenta a distância entre duas coordenadas, 25°26'16.159"S 49°16'19.276"O e 25°24'36,025"S 49°16'0.883"O, e compara os resultados com o obtido pela API do Google Maps®.

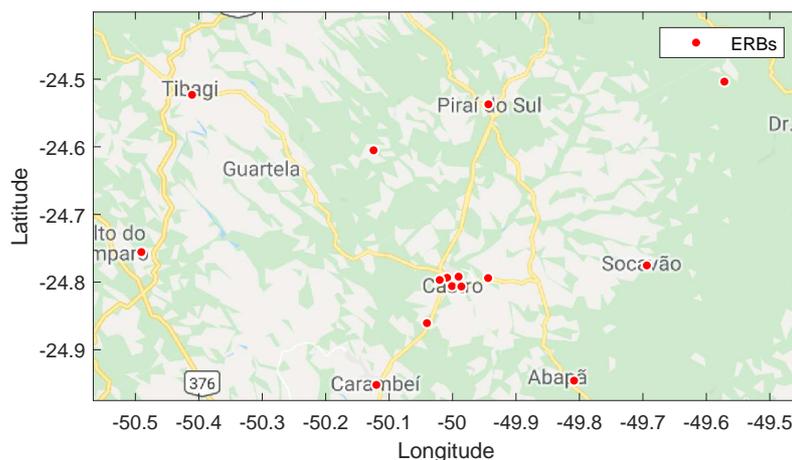
**Tabela 4 – Comparação métodos para cálculo de distância.**

Método	Distância	Erro
Pitágoras	3,148 km	≈ 18 m
Haversine	3,139 km	≈ 9 m
Google Maps	3,13 km	—

### 3.3 REGIÕES ANALISADAS

Para avaliar a influência da disposição das ERBs e do seu número por  $\text{km}^2$ , duas áreas com diferentes densidades de ERBs foram escolhidas: A primeira, chamada neste trabalho de *Região 1*, é constituída de um grupo de pequenas cidades (Castro, Carambeí, Tibagi e Piraí do Sul) situadas no segundo planalto paranaense (MINEROPAR, 2001), esta região foi escolhida pela sua grande importância para o agronegócio, atualmente a região é a maior produtora de leite do país (IBGE, 2017b), e pelo fato de ter uma baixa concentração de ERBs por  $\text{km}^2$  (15 ERBs em uma área de  $7.560,6 \text{ km}^2$ , ou seja, 1 ERB a cada  $504 \text{ km}^2$ ), sendo composta basicamente de áreas rurais como indicado na Figura 7. Na figura, os marcadores em vermelho indicam a posição real das ERBs da operadora analisada, obtidos de (ANATEL, 2018b).

**Figura 7 – A Região 1 é composta principalmente áreas rurais no segundo planalto paranaense e tem 15 ERBs distribuídas em  $7.560,6 \text{ km}^2$ .**

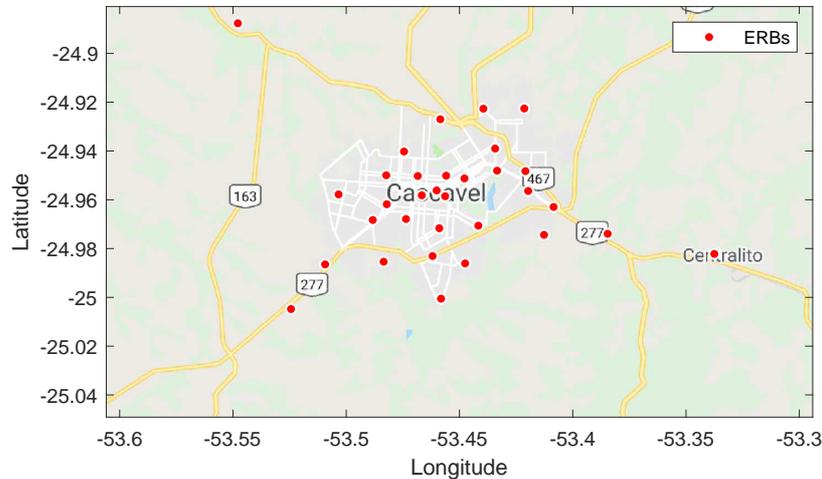


**Fonte: Autoria própria.**

A segunda região, *Região 2*, é um recorte da área urbana do município de Cascavel no oeste paranaense, contendo 32 ERBs em uma área aproximada de  $622 \text{ km}^2$  (1 ERB a cada  $19,4 \text{ km}^2$ ). O município possuía, no censo de 2010, uma população estimada de 286.205 ocupando a 5ª posição no *ranking* de maior população do estado (IBGE, 2017a). A Figura 8 retrata o recorte dessa região.

Diferentemente de Lauridsen et al. (2017), neste trabalho considera-se que os dispositivos podem estar em qualquer lugar dentro da região selecionada, ou seja, cada pixel da grade gerada pode conter um UE. Como os dados de endereços para regiões rurais não estavam disponíveis, considerou-se que todos os pixels do mapa conteriam um UE, dessa forma a análise pode ser vista como um *pior caso*, onde todos os pixels da grade

**Figura 8 – A Região 2 é majoritariamente urbana, retrata um recorte da área urbana do município de Cascavel - PR, com 32 ERBs distribuídas em aproximadamente 622 km<sup>2</sup>.**



**Fonte: Autoria própria.**

teriam um endereço válido. Além disso, também foi levado em conta que os dispositivos poderiam estar localizados dentro de benfeitorias (*indoor*), o que foi simulado adicionando 20 dB sobre as perdas de um cenário considerado externo.

A Tabela 5 resume os principais parâmetros de simulação para as regiões analisadas.

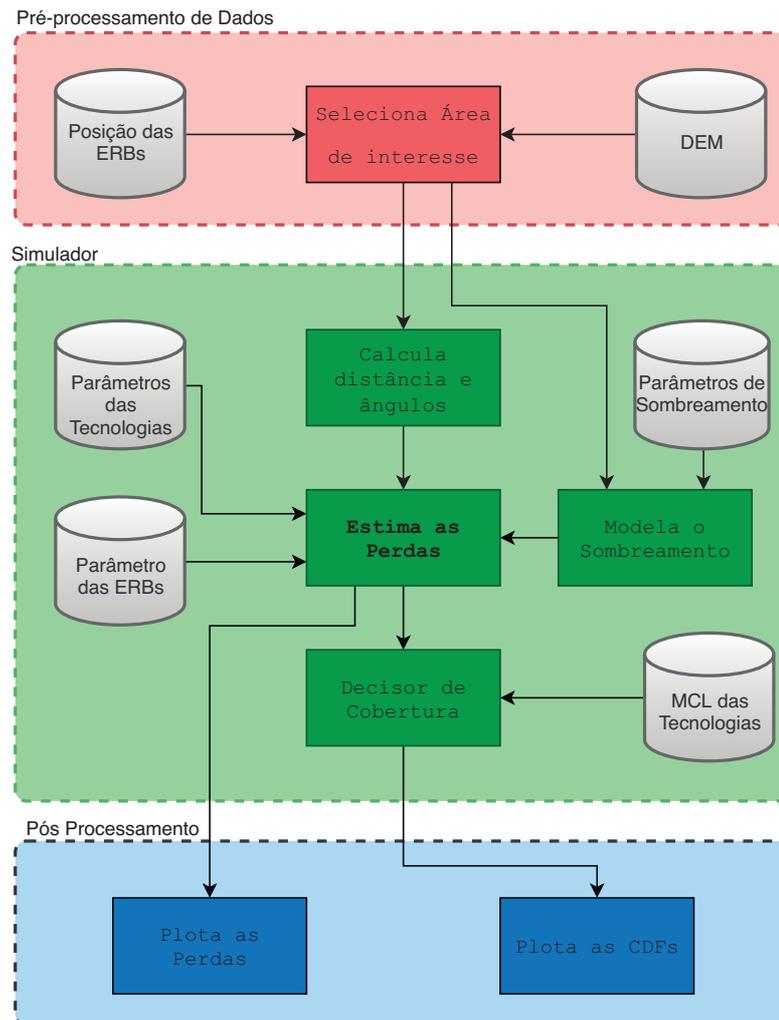
**Tabela 5 – Parâmetros de Simulação.**

Parâmetro	Região 1 (Rural)	Região 2 (Urbano)
Área	7.560,6 km <sup>2</sup>	622 km <sup>2</sup>
Densidade de ERBs	504 km <sup>2</sup> /BS	19,4 km <sup>2</sup> /BS
Distância de correlação	120 m	50 m
Resolução do mapa	93m x 93m	
Mapa do terreno	DEM (INPE, 2018)	
Perda de Percurso	Rural Macro NLOS	Urbano Macro NLOS

### 3.4 MODELO DE SIMULAÇÃO

O diagrama em blocos da Figura 9 ilustra o procedimento adotado para determinar a porcentagem de cobertura nas regiões propostas. O processo foi dividido em três etapas, que seguem explicadas abaixo.

Figura 9 – Diagrama em blocos ilustrando o modelo de simulação proposto. A simulação foi dividida em três seções. A primeira parte (Pré-processamento de Dados) os parâmetros de topologia são carregados e as ERBs e áreas fora da região desejada são descartadas. Em seguida, as distâncias e ângulos entre cada ERB e UE são calculadas, que juntamente com o sombreamento, o padrão de radiação das antenas e parâmetros das tecnologias serão utilizados pelo bloco “Estimador de Perdas” que estima a potência média perdida. Depois de estimar as perdas, a cobertura para cada pixel é determinada comparando a perda estimada com o MCL. Por fim, no módulo de Pós Processamento são geradas as CDFs e plotadas as perdas para cada pixel e sua ERB servidora.



Fonte: Autoria própria.

### 3.4.1 Pré-processamento de Dados

Neste passo de pré-simulação, os dados do terreno (latitude, longitude, elevação) são recuperados do DEM, com uma resolução de 3 arco-segundos, e carregados no ambiente de simulação. Nesta fase são carregados também os dados de localização (latitude, longitude e altura das antenas) das ERBs e ganho das antenas. No bloco

“Seleciona Área de Interesse” os dados de posição das ERBs são atrelados à grade fornecida pelo DEM, e por fim a área de interesse bem como as ERBs, que estão localizadas dentro dela, são recortadas da área total para evitar simulações com tempo muito elevado de processamento. Como resultado deste bloco temos uma grade com  $N_p$  pixels, onde cada pixel está associado à uma latitude, longitude e elevação, bem como existem  $N_{BS}$ , de um total de  $N_p$  pixels que contém uma ERB, e a cada um desses  $N_{BS}$  pixels está associada à altura da antena da ERB naquela localidade, conforme fornecido por (ANATEL, 2018b).

### 3.4.2 Simulador

Os dados de topologia gerados na etapa anterior são utilizados neste módulo para criar um padrão, ou grade, de sombreamento e para calcular as distâncias e ângulos entre cada pixel e cada ERB. Na sequência, o bloco “Estimador de perdas” estima as perdas totais para cada *link*, as quais em seguida serão comparadas com o MCL para determinar se um pixel está ou não coberto. Mais especificamente:

- “Calcula Distância e Ângulos”: Este bloco é responsável por calcular a distância entre o  $p$ -ésimo pixel e a  $i$ -ésima ERB,  $\forall p \in \{1, \dots, N_p\}$ ,  $i \in \{1, \dots, N_{BS}\}$ . A distância entre cada pixel e ERB é calculada como apresentado na Seção 3.2. A altura dos dispositivos e ERBs também é levada em conta no cálculo da distância. Vale lembrar que a altura dos UEs foi fixada em 1,5 metros enquanto a altura para as antenas das ERBs foram tiras do banco de dados da ANATEL, e correspondem à atual infraestrutura implantada da operadora avaliada.
- “Modela o Sombreamento”: Neste bloco, a grade fornecida pela módulo de Pré-processamento de dados é utilizada juntamente com dados da distância de correlação e desvio padrão do sombreamento para gerar um padrão de sombreamento que juntamente será utilizado para estimar a perda de percurso.
- “Estima as Perdas”: Este bloco pega as distâncias, ângulos e padrão de sombreamento gerado pelos processos anteriores e juntamente com parâmetros das tecnologias (frequência da portadora) e parâmetros das ERBs (ganho das antenas e padrão de radiação) para estimar as perdas totais no processo de transmissão.

Seja  $p \in \{1, \dots, N_p\}$  o índice do  $p$ -ésimo pixel no conjunto de  $N_p$  pixels que representam a área estudada, e  $i \in \{1, \dots, N_{BS}\}$  representa a  $i$ -ésima ERB do número total de  $N_{BS}$  ERBs. Assim, podemos estimar as perdas para o UE do pixel  $p$  com relação a ERB  $i$  através da expressão.

$$LinkLoss^{\mathfrak{t}}(i,p) = PL^{\mathfrak{t}}(i,p) + L^{\mathfrak{t}}(i) - AG^{\mathfrak{t}}(i,p), \quad (6)$$

onde  $LinkLoss^{\mathfrak{t}}(i,p)$  representa as perdas estimadas para o UE do pixel  $p$  com relação a ERB  $i$  dada a tecnologia  $\mathfrak{t} \in \{\text{LoRa}, \text{NB-IoT}\}$ ,  $PL^{\mathfrak{t}}(i,p)$  é a perda de percurso estimada entre a ERB  $i$  e o pixel  $p$  obtida da Equação (1),  $AG^{\mathfrak{t}}(i,p)$  é o ganho das antenas da ERB  $i$  para o pixel  $p$ . O  $LinkLoss$  pode ser visto também como a soma das perdas em (3). Vale ressaltar que devido ao efeito da direcionalidade das antenas, o ganho varia de pixel para pixel quando utilizando o NB-IoT. Além disso, para o NB-IoT deve ser incluído nesse parâmetro o ganho da antena do UE, uma vez que a potência transmitida não é considerada ERPI<sup>2</sup> (3GPP, 2015). E  $L^{\mathfrak{t}}(i)$  representa perdas adicionais, tais como perdas nos cabos (quando aplicável) e perdas ligadas a atenuação causada à dispositivos localizados *indoor*.

- “Decisor de Cobertura”: Uma vez que as perdas foram calculadas, este módulo compara o mínimo *link loss* (entre o pixel e o conjunto de ERBs) com o MCL específico de cada tecnologia, a fim de determinar se um pixel é coberto ou não por aquela tecnologia.

Podemos definir uma variável indicadora  $\phi^{\mathfrak{t}}(p) \in \{0,1\}$  que indica quando o  $p$ -ésimo pixel é coberto pela tecnologia  $\mathfrak{t}$  ou não, de tal forma que  $\phi^{\mathfrak{t}}(p) = 1$  que o pixel  $p$  está coberto pela tecnologia  $\mathfrak{t}$  e  $\phi^{\mathfrak{t}}(p) = 0$  quando não está. Assim, temos que

$$\phi^{\mathfrak{t}}(p) = \begin{cases} 1, & \text{se } \min_i LinkLoss^{\mathfrak{t}}(i,p) < \text{MCL}^{\mathfrak{t}}; \\ 0, & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (7)$$

onde  $\text{MCL}^{\mathfrak{t}}$  é o limite de potência que pode ser perdida pela tecnologia  $\mathfrak{t}$  como apresentado na Tabela 3, e o  $LinkLoss^{\mathfrak{t}}(i,p)$  representa as perdas estimadas para o UE do pixel  $p$  com relação a ERB  $i$ , calculado de acordo com (6).

Dessa forma, pode-se definir a taxa de cobertura ( $v^{\mathfrak{t}}$ ) para uma determinada tecnologia  $\mathfrak{t}$  como

$$v^{\mathfrak{t}} = \frac{\sum_{p=1}^{N_p} \phi^{\mathfrak{t}}(p)}{N_p}. \quad (8)$$

### 3.4.3 Pós-Processamento

No módulo de pós processamento duas tarefas são executadas independentemente. Primeiro o  $LinkLoss$  é plotado para as duas regiões nos diferentes cenários, permitindo

---

<sup>2</sup>Potência isotrópica radiada equivalente, do inglês *Equivalent Isotropically Radiated Power*.

assim uma análise visual das áreas com falta de cobertura. Em seguida as funções de distribuição cumulativa (CDFs), que representam a porcentagem de pixels que estão cobertos pelas tecnologias, são calculadas e plotadas.

## 4 RESULTADOS NUMÉRICOS

A seguir são apresentados os resultados da comparação entre LoRa e NB-IoT para as duas regiões analisadas, conforme apresentado nas seções anteriores. A primeira parte apresenta os resultados para a Região 1 (majoritariamente rural, com uma baixa densidade de ERBs), enquanto a segunda parte apresenta os dados para a denominada Região 2 (predominantemente urbana, com uma alta densidade de ERBs por km<sup>2</sup>).

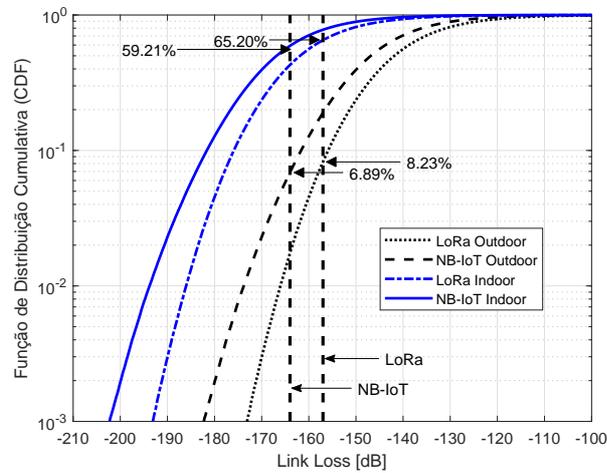
### 4.1 REGIÃO 1 (RURAL)

A Figura 10 representa a CDF das perdas (*Link Loss*) para LoRa and NB-IoT, sendo considerado duas bandas de operação para o NB-IoT, 850 e 1900 MHz. As linhas verticais pontilhadas representam o MCL para o LoRa e para o NB-IoT, conforme indicado na Tabela 3, de tal forma que a parte à esquerda do limite representa a porcentagem de pixels que estão em *outage* (não cobertos pela tecnologia indicada). Como mencionado na Seção 3.3, foi considerado uma atenuação adicional de 20 dB para representar os UEs que estão localizados dentro de benfeitorias (*indoor devices*).

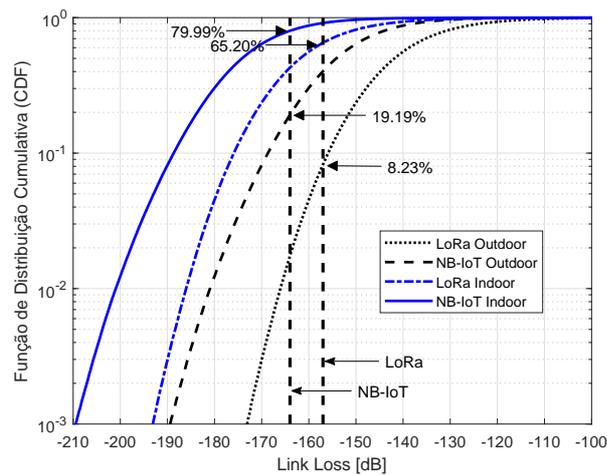
Na Figura 10 pode ser visto que, quando considerado dispositivos em ambiente externo, a porcentagem de pixels cobertos foi de aproximadamente 91,77% para usuários LoRa e 93,11% para usuários operando com NB-IoT em 850 MHz. Quando comparamos com o resultado do NB-IoT operando na banda de 1900 MHz, a média de cobertura para essa região cai para 80,81%. Quando analisado o cenário *indoor* a porcentagem diminui consideravelmente, não atingindo nem 50% de cobertura em todos os quadros. LoRa e NB-IoT a 850 MHz aproximam-se de 40%, com 34,80% e 40,79% respectivamente, enquanto NB-IoT operando a 1900 MHz, gera uma atenuação mais severa, conforme descrito em (1), fornecendo cobertura à apenas 20,01% dos pixels dessa área.

A Figura 11 ilustra visualmente a cobertura na Região 1, para dispositivos externos, apresentando o *Link Loss* entre cada pixel e a ERB com o melhor *link budget* para aquele pixel. Quanto mais azul a cor do pixel, maiores as perdas e conseqüentemente maior é a possibilidade de que aquele pixel não esteja coberto. O oposto é verdadeiro, quanto mais vermelha a cor do pixel menores as perdas. Pode-se perceber pela Figura 11 o efeito da direcionalidade das antenas quando NB-IoT é implementado ao invés de LoRa.

Figura 10 – Função de Distribuição Cumulativa (CDF) para UEs na Região 1. (a) NB-IoT operando a 850 MHz (b) NB-IoT operando a 1900 MHz.



(a) Região 1 - LoRa and NB-IoT (a 850 MHz)



(b) Região 1 - LoRa and NB-IoT (a 1900 MHz)

Fonte: Autoria própria.

## 4.2 REGIÃO 2 (URBANA)

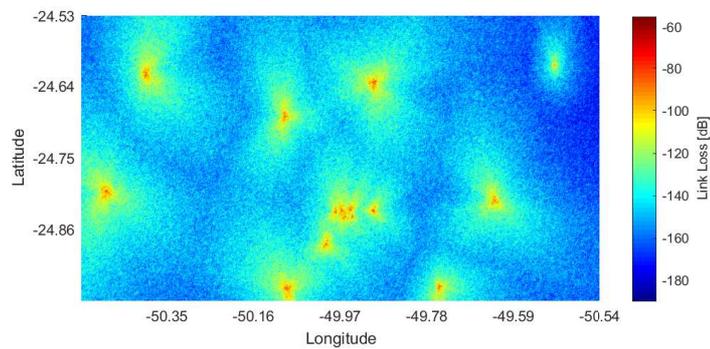
As Figuras 12 e 13 apresentam os mesmos resultados que as Figuras 10 e 11, mas agora considerando a Região 2, com uma maior densidade de ERBs por  $\text{km}^2$ .

Pode-se perceber pela Figura 13(a) que, devido à alta concentração de ERBs, a quantidade de pixels que não servidos por ambas as tecnologias é menor que 1% para os dispositivos localizados em ambientes externos, para todos os cenários onde a frequência de operação é menor que 1 GHz. Para dispositivos localizados *indoor*, com 20 dB a mais de perdas com relação ao cenário *outdoor*, a porcentagem de pixels cobertos cai para 79,61%

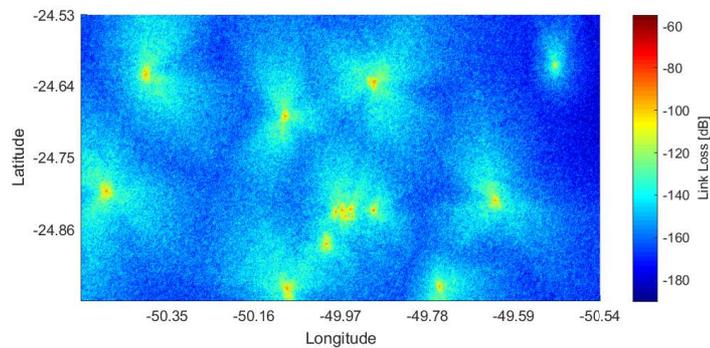
para LoRa e 78,77% para NB-IoT à 850 MHz. Mesmo para NB-IoT operando à 1900 MHz (a pior configuração dentre as três candidatas), a cobertura ainda alcança 53,67% dos dispositivos. Um resultado importante obtido para a Região 2 é que diferentemente da Região 1, LoRa apresentou uma taxa de cobertura ligeiramente melhor que NB-IoT.

Os gráficos da Figura 13 revelam onde estão as áreas com pior cobertura na

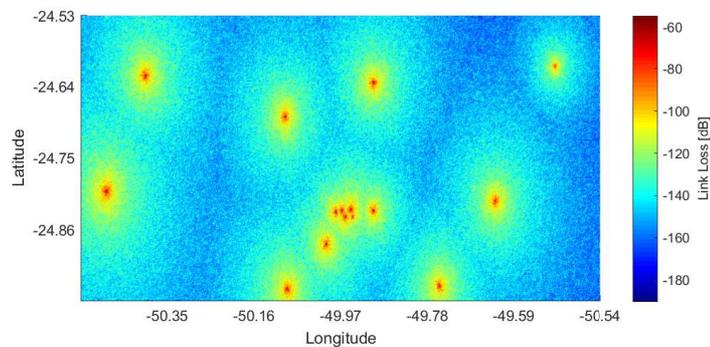
**Figura 11 – Link loss para Região 1. (a) NB-IoT operando a 850 MHz; (b) NB-IoT operando a 1900 MHz; (c) LoRa. Quanto mais azul a cor do pixel maiores são as perdas naquela área.**



(a) Região 1 - NB-IoT (a 850 MHz)



(b) Região 1 - NB-IoT (a 1900 MHz)

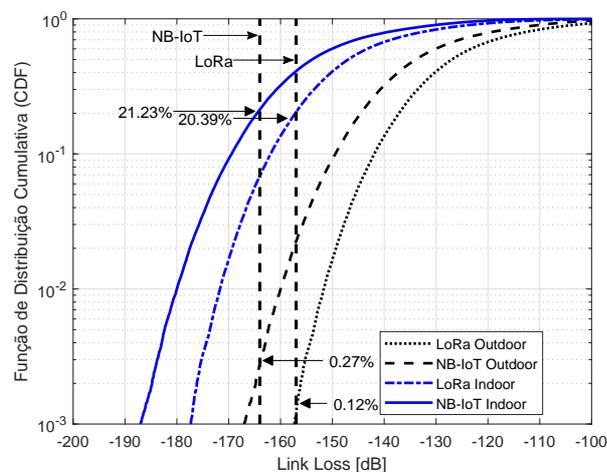


(c) Região 1 - LoRa

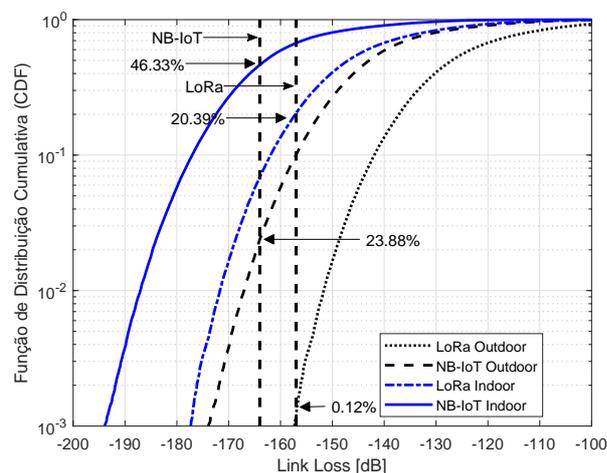
**Fonte: Autoria própria.**

Região 2. Visto que a cobertura para o cenário externo nessa região é acima de 99%, decidiu-se plotar o gráfico de perdas para o cenário *indoor*. Apesar de em um modo geral o NB-IoT apresentar maiores perdas que o LoRa, seu MCL ser mais robusto compensa essas perdas, não prejudicando sua cobertura, como pode ser visto pelas Figuras 14(c) e 14(a) que apresentam quase a mesma porcentagem de cobertura para LoRa e NB-IoT, enquanto NB-IoT tem perdas bem mais acentuadas.

**Figura 12 – Função de Distribuição Cumulativa (CDF) para UEs na Região 2. (a) NB-IoT operando a 850 MHz (b) NB-IoT operando a 1900 MHz.**



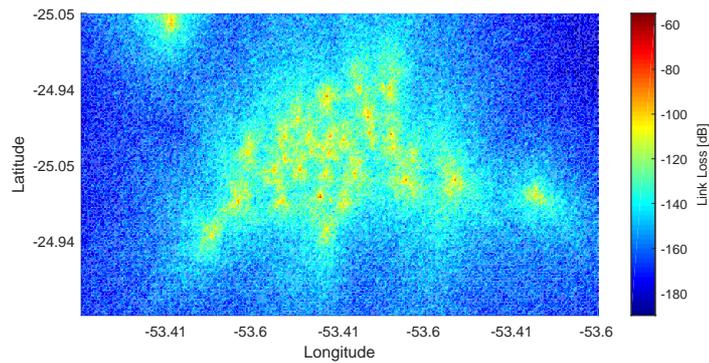
(a) Região 2 - LoRa and NB-IoT (a 850 MHz)



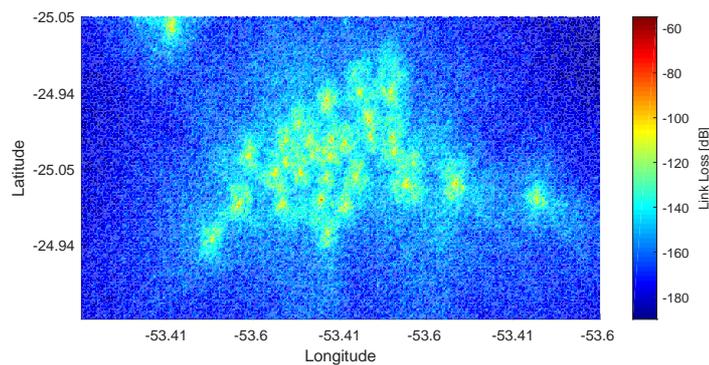
(b) Região 2 - LoRa and NB-IoT (a 1900 MHz)

**Fonte: Autoria própria.**

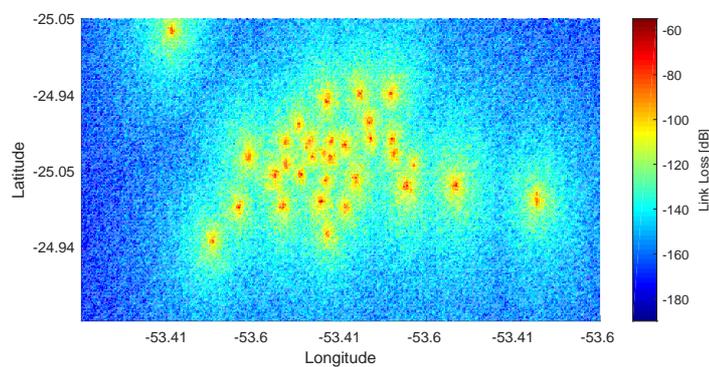
Figura 13 – Link loss para Região 2. (a) NB-IoT operando a 850 MHz; (b) NB-IoT operando a 1900 MHz; (c) LoRa. Quanto mais azul a cor do pixel maiores são as perdas naquela área.



(a) Região 2 - NB-IoT (a 850 MHz)



(b) Região 2 - NB-IoT (a 1900 MHz)



(c) Região 2 - LoRa

Fonte: Autoria própria.

## 5 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi adaptar a simulação de cobertura proposta por Lauridsen et al. (2017), para regiões no Brasil, a fim de avaliar a influência da infraestrutura de rede caso fosse implantado uma das tecnologias propostas (LoRa ou NB-IoT). Para tal, foi levado em conta a infraestrutura de uma operadora local, as bandas de frequência permitidas no Brasil e duas regiões foram escolhidas, uma principalmente rural, com uma baixa densidade de ERBs, e outra principalmente urbana, com uma alta densidade de ERBs por km<sup>2</sup>.

Os resultados mostraram que, para a área principalmente rural, considerando que os dispositivos estão localizados em áreas externas, a cobertura atinge de 93,11% para NB-IoT operando à 850 MHz, 91,77% para LoRa e 81,81% para NB-IoT operando à 1900 MHz. Contudo, a cobertura de dispositivos localizados dentro de casas, prédios ou construções é baixa, chegando no melhor caso, quando é atendida pela NB-IoT à 850 MHz, a apenas 40,79%. Quando atendida pelo LoRa, essa porcentagem cai para 34,80% e menos de 20,01% quando atendida pelo NB-IoT à 1900 MHz. A taxa de cobertura para a região majoritariamente urbana, considerando um cenário de dispositivos externos, alcança mais do que 97,61% para ambas as tecnologias e ambas as faixas de frequência do NB-IoT. Quando adicionamos 20 dB de perda para simular o efeito de dispositivos estarem localizados *indoor*, a taxa de cobertura cai para 79,61% para LoRa, 78,77% para NB-IoT à 850 MHz e 53,67% para NB-IoT à 1900 MHz.

Dentre as tecnologias analisadas, NB-IoT operando à 1900 MHz tem, em todos os cenários, a pior taxa de cobertura. Os resultados mostraram ainda que NB-IoT operando à 850 MHz apresenta a melhor taxa de cobertura para a região com baixa densidade de ERBs, mas quando o cenário muda para uma região principalmente urbana e com alta densidade de ERBs, LoRa provê a melhor taxa de cobertura. Isso pode ser atribuído ao fato de NB-IoT utilizar antenas direcionais, as quais fornecem uma melhor cobertura próxima ao raio principal da antena mas deixa as outras direções descobertas. Portanto, podemos concluir que a infraestrutura (posicionamento e quantidade de ERBs) tem influência na escolha de uma dessas tecnologias com base na taxa de cobertura.

## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Uma sequência natural dando continuação à comparação dessas duas tecnologias, é comparar o consumo de energia para as áreas propostas. Modelos de consumo de energia para LoRa são propostos por Bouguera et al. (2018) e Lauridsen et al. (2018) respectivamente. Bouguera et al. (2018) discute o *trade-off* existente entre alcance, fator de espalhamento (SF) e potência de transmissão. Além disso, os autores definem e comparam três cenários de operação do LoRaWAN para uma aplicação específica. No primeiro caso, o UE não espera nenhuma mensagem da aplicação, sem nenhuma mensagem de confirmação, outro cenário onde apenas a primeira das janelas de recepção é esperada e um terceiro cenário onde as duas janelas de recepção são demoduladas.

Lauridsen et al. (2018) propõem um modelo para estimar a duração da bateria de dispositivos NB-IoT e, para tanto, eles realizam medições de consumo com dois aparelhos de marcas diferentes e comparam os resultados com o estimado pelo 3GPP. Em seguida, estabelecem um modelo de consumo, o qual é utilizado para gerar uma estimativa do tempo de vida de uma bateria alimentando esses aparelhos.

Por fim, Martinez et al. (2019) apresenta os mecanismos de economia de energia implementados pelo NB-IoT e discute alguns aspectos que devem ser levados em conta quando comparando LoRa e NB-IoT, como por exemplo, o serviço de garantia de entrega de mensagens fornecido pelo NB-IoT, que utiliza mensagens de confirmação para reenviar uma mensagem caso haja falha. Esse serviço, utilizando mensagens de confirmação no LoRaWAN, é impraticável, visto que esse protocolo opera em banda não licenciada (ISM) e tem restrições de *duty-cycle*, dessa forma os usuários são forçados a utilizar outras estratégias, como número de repetições fixas.

## REFERÊNCIAS

- 3GPP. *TR 36.814 V9.0.0; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (Release 9)*. 650 Route des Lucioles - Sophia Antipolis Valbonne - France, 2010. v. 9, n. 3, 1–104 p. Disponível em: <<http://www.qtc.jp/3GPP/Specs/36814-900.pdf>>.
- 3GPP. *TR45.820 - Cellular System Support for Ultra Low Complexity and Low Throughput Internet of Things*. 650 Route des Lucioles - Sophia Antipolis Valbonne - France, 2015. V2.1.0.
- 3GPP. *Standardization of NB-IoT Completed*. June 2016. [Online]. Disponível em: <[http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1785-nb\\_iot\\_complete](http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1785-nb_iot_complete)>.
- ABOWD, G. D.; DEY, A. K.; BROWN, P. J.; DAVIES, N.; SMITH, M.; STEGGLES, P. Towards a better understanding of context and context-awareness. In: **Proceedings of the 1st International Symposium on Handheld and Ubiquitous Computing**. London, UK: Springer-Verlag, 1999. (HUC '99), p. 304–307. ISBN 3-540-66550-1. Disponível em: <<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=647985.743843>>.
- ADELANTADO, F.; VILAJOSANA, X.; TUSET-PEIRO, P.; MARTINEZ, B.; MELIA-SEGUI, J.; WATTEYNE, T. Understanding the limits of lorawan. **IEEE Communications Magazine**, v. 55, n. 9, p. 34–40, Sep. 2017. ISSN 0163-6804.
- ADHIKARY, A.; LIN, X.; WANG, Y. . E. Performance evaluation of nb-iot coverage. In: **IEEE 84TH VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE (VTC-FALL)**. **2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)**. 2016. p. 1–5.
- AL-FUQAHA, A.; GUIZANI, M.; MOHAMMADI, M.; ALEDHARI, M.; AYYASH, M. Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 17, n. 4, p. 2347–2376, Fourthquarter 2015. ISSN 1553-877X.
- ALCARAZ, C.; NAJERA, P.; LOPEZ, J.; ROMAN, R. Wireless sensor networks and the internet of things: Do we need a complete integration? In: **1st International Workshop on the Security of the Internet of Things**. 2010.
- AMARAL, B. do. **Sigfox lança sua rede para IoT no Brasil**. Abril 2017. Disponível em: <<https://teletime.com.br/07/04/2017/sigfox-lanca-sua-rede-para-iot-no-brasil/>>.
- ANATEL. **Plano de Atribuição, Distribuição e Destinação de Radiofrequências**. Maio 2018. [Online]. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/setorregulado/atribuicao-destinacao-e-distribuicao-de-faixas>>.
- ANATEL. **Relatório das Estações por localidade**. 2018. [Online]. Disponível em: <<https://sistemas.anatel.gov.br/stel/>>.

AYOUB, W.; SAMHAT, A. E.; NOUVEL, F.; MROUE, M.; PRÉVOTET, J. Internet of mobile things: Overview of lorawan, dash7, and nb-iot in lpwans standards and supported mobility. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, p. 1–1, 2018. ISSN 1553-877X.

BALANIS, C. A. **Antenna theory: analysis and design**. 3. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. ISBN 0-471-66782-X.

BOUGUERA, T.; DIOURIS, J.-F.; CHAILLOUT, J.-J.; JAOUADI, R.; ANDRIEUX, G. Energy consumption model for sensor nodes based on lora and lorawan. **Sensors**, v. 18, n. 7, 2018. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/18/7/2104>>.

CHAMBERLAIN, R. G. **What is the best way to calculate the great circle distance between 2 points?** 1996. Disponível em: <<http://www.faqs.org/faqs/geography/infosystems-faq/>>.

COLINA, A. L.; VIVES, A.; ZENNARO, M.; BAGULA, A.; PIETROSEMOLI, E. **IoT in Five days**. March 2016.

COMMSCOPE. **Product Specifications - CV65BSX-M**. May 2013. [Online]. Disponível em: <[https://www.commscope.com/catalog/antennas/pdf/part/2839/CV65BSX-M\\_CV65BSX-2X2.pdf](https://www.commscope.com/catalog/antennas/pdf/part/2839/CV65BSX-M_CV65BSX-2X2.pdf)>.

ETSI. **TS 136 101 - User Equipment (UE) radio transmission and reception**. Apr. 2017. [Online]. V14.3.0.

EVANS, D. **The Internet of Things: How the next evolution of internet is changing everything**. April 2011. Disponível em: <[https://www.cisco.com/c/dam/en\\_us/about/ac79/docs/innov/IoT\\_IBSG\\_0411FINAL.pdf](https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf)>.

FELTRIN, L.; TSOUKANERI, G.; CONDOLUCI, M.; BURATTI, C.; MAHMOODI, T.; DOHLER, M.; VERDONE, R. Narrowband iot: A survey on downlink and uplink perspectives. **IEEE Wireless Communications**, v. 26, n. 1, p. 78–86, February 2019. ISSN 1536-1284.

FRAILE, R.; GOZALVEZ, J.; LAZARO, O.; MONSERRAT, J.; CARDONA, N. Effect of a two dimensional shadowing model on system level performance evaluation. **COST 273 TD (04)**, v. 190, 01 2004.

GOLDSMITH, A. **Wireless Communications**. Cambridge University Press, 2005.

GRIÓN, F. J.; PETRACCA, G. O.; LIPUMA, D. F.; AMIGÓ, E. R. Lora network coverage evaluation in urban and densely urban environment simulation and validation tests in autonomous city of buenos aires. In: XVII WORKSHOP ON INFORMATION PROCESSING AND CONTROL (RPIC). **2017 XVII Workshop on Information Processing and Control (RPIC)**. 2017. p. 1–5.

IBGE. **IBGE Cidades - Panorâma Cascavel**. 2017. [Online]. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/cascavel/panorama>>.

IBGE. **IBGE Cidades - Panorâma Castro**. 2017. [Online]. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/castro/panorama>>.

INFORCHANNEL. **TIM confirma funcionamento da rede NB-IoT com longo alcance.** May 2019. [Online]. Disponível em: <<https://inforchannel.com.br/2019/03/19/tim-confirma-funcionamento-da-rede-nb-iot-com-longo-alcance>>.

INPE. **Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil.** 2018. [Online]. TOPODATA - Divisão de Sensoriamento Remoto. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/index.php>>.

KRAUS, J. D. **Antenas.** Rio de Janeiro - RJ: Guanabara Dois, 1983. ISBN 085-7030-020-4.

LAURIDSEN, M.; KOVACS, I. Z.; MOGENSEN, P.; SORENSEN, M.; HOLST, S. Coverage and capacity analysis of lte-m and nb-iot in a rural area. In: **IEEE 84TH VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE (VTC-FALL). 2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall).** 2016. p. 1–5.

LAURIDSEN, M.; KRIGSLUND, R.; ROHR, M.; MADUENO, G. An empirical nb-iot power consumption model for battery lifetime estimation. In: **2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring).** 2018. p. 1–5. ISSN 2577-2465.

LAURIDSEN, M.; NGUYEN, H.; VEJLGAARD, B.; KOVACS, I. Z.; MOGENSEN, P.; SORENSEN, M. Coverage comparison of gprs, nb-iot, lora, and sigfox in a 7800 km<sup>2</sup> area. In: **IEEE 85TH VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE (VTC SPRING). 2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring).** 2017. p. 1–5.

LAVRIC, A.; POPA, V. Lora? wide-area networks from an internet of things perspective. In: **9TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONICS, COMPUTERS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE (ECAI). 2017 9th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI).** 2017. p. 1–4.

LINKLABS. **What is Weightless?** Novembro 2015. [Online]. Disponível em: <<https://www.link-labs.com/blog/what-is-weightless>>.

LOUREIRO, A. A.; NOGUEIRA, J. M. S.; RUIZ, L. B.; MINI, R. A. d. F.; NAKAMURA, E. F.; FIGUEIREDO, C. M. S. Redes de sensores sem fio. In: **SN. Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC).** 2003. p. 179–226.

LUETH, K. L. **State of the IoT 2018: Number of IoT devices now at 7B ? Market accelerating.** August 2018. [Online]. Disponível em: <<https://iot-analytics.com/state-of-the-iot-update-q1-q2-2018-number-of-iot-devices-now-7b/>>.

MANGALVEDHE, N.; RATASUK, R.; GHOSH, A. Nb-iot deployment study for low power wide area cellular iot. In: **IEEE 27TH ANNUAL INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PERSONAL, INDOOR, AND MOBILE RADIO COMMUNICATIONS (PIMRC). 2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC).** 2016. p. 1–6. ISSN 2166-9589.

MARTINEZ, B.; ADELANTADO, F.; BARTOLI, A.; VILAJOSANA, X. Exploring the performance boundaries of nb-iot. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 6, n. 3, p. 5702–5712, June 2019. ISSN 2327-4662.

MEKKI, K.; BAJIC, E.; CHAXEL, F.; MEYER, F. A comparative study of lpwan technologies for large-scale iot deployment. **ICT Express**, v. 5, n. 1, p. 1 – 7, 2019. ISSN 2405-9595. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959517302953>>.

MINEROPAR. **Atlas Geológico do Estado do Paraná**. 2001. Disponível em: <<http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/MapasPDF/atlasgeo.pdf>>.

PALATTELLA, M. R.; DOHLER, M.; GRIECO, A.; RIZZO, G.; TORSNER, J.; ENGEL, T.; LADID, L. Internet of things in the 5g era: Enablers, architecture, and business models. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 34, n. 3, p. 510–527, March 2016. ISSN 0733-8716.

PERERA, C.; LIU, C. H.; JAYAWARDENA, S.; CHEN, M. A survey on internet of things from industrial market perspective. **IEEE Access**, IEEE, v. 2, p. 1660–1679, 2014.

PERERA, C.; ZASLAVSKY, A.; CHRISTEN, P.; GEORGAKOPOULOS, D. Context aware computing for the internet of things: A survey. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, IEEE, v. 16, n. 1, p. 414–454, 2014.

RAPPORT, T. S. **Wireless Communications: Principles and Practice**. 2. ed. Prentice-Hall, 2002. ISBN 0-13-042232-0.

RATASUK, R.; VEJLGAARD, B.; MANGALVEDHE, N.; GHOSH, A. Nb-iot system for m2m communication. In: IEEE WIRELESS COMMUNICATIONS AND NETWORKING CONFERENCE WORKSHOPS (WCNCW). **2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)**. 2016. p. 428–432.

RAWLS, A. W. **A SYSTEMATIC APPROACH FOR IMPROVING PREDICTED ARRIVAL TIME USING HISTORICAL DATA IN ABSENCE OF SCHEDULE RELIABILITY**. 2008. Dissertação (Mestrado) — University of North Carolina Wilmington, 2008.

RAZA, U.; KULKARNI, P.; SOORIYABANDARA, M. Low power wide area networks: An overview. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 19, n. 2, p. 855–873, Secondquarter 2017. ISSN 1553-877X.

RIBEIRO, J. A. J. **Engenharia de Antenas: Fundamentos, Projetos e Aplicações**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2012. ISBN 978-85-365-2195-4.

SCHLIENZ, J.; RADDINO, D. **Narrowband Internet of Things**. August 2016. 1MA266\_0e. Disponível em: <[https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl\\_downloads/dl\\_application/application\\_notes/1ma266/1MA266\\_0e\\_NB\\_IoT.pdf](https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma266/1MA266_0e_NB_IoT.pdf)>.

SEMTECH. **AN1200.12 - LoRa Modulation Basics**. May 2015. [Online]. Rev. 2.

SEMTECH. **SX1272/73 - 860 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver**. March 2017. [Online]. Rev. 3.1.

SEMTECH. **What is LoRa?** Nov. 2018. [Online]. Disponível em: <<https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>>.

SINHA, R. S.; WEI, Y.; HWANG, S. H. A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT. **ICT Express**, Elsevier B.V., v. 3, n. 1, p. 14–21, 2017. ISSN 24059595. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ict.2017.03.004>>.

SUNDMAEKER, H.; GUILLEMIN, P.; FRIESS, P.; WOELFFLÉ, S. **Vision and Challenges for Realizing the Internet of Things**. Publications Office of the European Union, 2010. ISBN 978-92-79-15088-3.

TECHPLAYON. **LoRa Technology, It's Features and Application**. June 2017. [Online]. Disponível em: <<http://www.techplayon.com/lora-technology-benefits-application>>.

TSE, D.; VISWANATH, P. **Fundamentals of Wireless Communication**. Cambridge University Press, 2005.

VEJLGAARD, B.; LAURIDSEN, M.; NGUYEN, H.; KOVACS, I. Z.; MOGENSEN, P.; SORENSEN, M. Coverage and capacity analysis of sigfox, lora, gprs, and nb-iot. In: IEEE 85TH VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE (VTC SPRING). **2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)**. 2017. p. 1–5.

WANG, Y. . E.; LIN, X.; ADHIKARY, A.; GROVLEN, A.; SUI, Y.; BLANKENSHIP, Y.; BERGMAN, J.; RAZAGHI, H. S. A primer on 3gpp narrowband internet of things. **IEEE Communications Magazine**, v. 55, n. 3, p. 117–123, March 2017. ISSN 0163-6804.

WILLIAMS, D. R. **Earth Fact Sheet**. April 2019. National Aeronautics and Space Administration - NASA. Disponível em: <<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html>>.

ZAYAS, A. D.; MERINO, P. The 3GPP NB-IoT system architecture for the internet of things. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS (ICC'17). **2017 IEEE International Conference on Communications (ICC'17)**. 2017. p. 277–282. ISSN 2474-9133.

ZYREN, J.; PETRICK, A. **Tutorial on Basic Link Budget Analysis**. June 1998. Application Note - AN9804.1. Disponível em: <<http://www.sss-mag.com/pdf/an9804.pdf>>.