



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS - CCET
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DA
COMPUTAÇÃO

YAN ROCHA PIMENTA
**SOLUÇÃO DE LPWAN PARA IMPLANTAÇÃO
DE UMA SMARTGRID: UMA SOLUÇÃO
BASEADO NA PREDIÇÃO DE COBERTURA
DE RADIOFREQUÊNCIA**

São Luís - MA

2023

YAN ROCHA PIMENTA

**SOLUÇÃO DE LPWAN PARA IMPLANTAÇÃO DE UMA
SMARTGRID: UMA SOLUÇÃO BASEADO NA
PREDIÇÃO DE COBERTURA DE RADIOFREQUÊNCIA**

Monografia apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro da Computação, a Coordenação do curso de Engenharia da Computação, da Universidade Federal do Maranhão.

Coordenação do Curso de Engenharia da Computação

Universidade Federal do Maranhão

Orientador: Prof. Me. Luiz Henrique Neves Rodrigues

São Luís - MA

2023

YAN ROCHA PIMENTA

SOLUÇÃO DE LPWAN PARA IMPLANTAÇÃO DE UMA SMARTGRID: UMA SOLUÇÃO BASEADO NA PREDIÇÃO DE COBERTURA DE RADIOFREQUÊNCIA

Monografia apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro da Computação, a Coordenação do curso de Engenharia da Computação, da Universidade Federal do Maranhão.

Trabalho **APROVADO**. São Luís - MA, 17 de 07 de 2023:

**Prof. Me. Luiz Henrique Neves
Rodrigues**
Orientador
Universidade Federal do Maranhão

**Prof. Me. Claudio Manoel Pereira
Aroucha**
Examinador Interno
Universidade Federal do Maranhão

Prof. Dr. Luis Claudio de Oliveira Silva
Examinador Interno
Universidade Federal do Maranhão

São Luís - MA
2023

“O sucesso é a soma de pequenos esforços repetidos dia após dia.”

(Robert Collier)

Resumo

Com o crescimento populacional e com o avanço da tecnologia, as cidades inteligentes tornaram-se uma realidade, uma vez que, para atender uma grande população, faz-se necessário o uso de meios que automatizem vários processos. Por conta disso, é inevitável o uso de IoT para implementar soluções inteligentes, como a Smart Grid. Assim, faz-se necessário o conhecimento de redes do gênero LPWAN, como as redes NB-IoT, SigFox e LoRa, apresentadas neste trabalho, pois possuem capacidade de longo alcance com um baixo consumo de energia. Com o auxílio do Radio Mobile foi possível simular a predição de cobertura para 7 ERB's espalhadas por toda ilha de São Luís - MA, a partir disto, constatou-se que grande parte do território dispõem de cobertura para a rede LoRa, tecnologia escolhida para estudo. No entanto, características como a elevação e irregularidades do terreno fez com que todas as comunicações entre as ERB's possuísem grandes perdas na propagação, reafirmando que muitos dispositivos serão atendidos por apenas um ponto de comunicação. Uma solução seria a adoção de outras estações ou repetidoras em locais estratégicos, para atuar como ponto de redundância caso haja uma falha aos demais.

Palavras-chave: IoT; Predição; LoRaWAN.

Abstract

With population growth and the advancement of technology, smart cities have become a reality, since, to serve a large population, it is necessary to use means that automate several processes. Because of this, the use of IoT to implement intelligent solutions such as the Smart Grid is inevitable. Thus, it is necessary to know LPWAN networks, such as NB-IoT, SigFox and LoRa networks, presented in this work, which have long-range capacity with low energy consumption. With the help of Radio Mobile it was possible to simulate the prediction of coverage for 7 ERB's spread throughout the island of São Luís - MA, from this, it was found that a large part of the territory has coverage for the LoRa network, the technology chosen for the study. However, characteristics such as elevation and irregularities of the terrain caused all communications between the ERB's to have large losses in propagation, reaffirming that many devices would be served by only one communication point. One solution would be the adoption of other stations or repeaters in strategic locations, to act as a point of redundancy in case there is a failure to the others.

Keywords: IoT; Prediction; LoRaWAN.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Longevidade das baterias em função do alcance do sinal	16
Figura 2 – Modos de operação para NB-IoT	18
Figura 3 – Espectro dos 400 canais da rede Sigfox	18
Figura 4 – Topologia da Rede Sigfox	19
Figura 5 – Representação dos canais da banda AU915-928	21
Figura 6 – Topologia estrela LoRaWAN	22
Figura 7 – Propagação em espaço livre	25
Figura 8 – Modelo de reflexão terra plana	26
Figura 9 – Difração por um obstáculo	27
Figura 10 – Distribuição das subestações	32
Figura 11 – Configuração dos parâmetros no Radio Mobile	33
Figura 12 – Modos de variabilidades	35
Figura 13 – Configuração das características do rádio	36
Figura 14 – (a) Irradiação vertical (b) Irradiação horizontal (c) Exemplo de antena	36
Figura 15 – Adicionando os membros a rede	37
Figura 16 – Configuração do Cartesian Radio Coverage	38
Figura 17 – Resultado da simulação para todas as ERB's da rede	39
Figura 18 – Cabeçalho do arquivo raster gerado	39
Figura 19 – Corpo do arquivo raster gerado	40
Figura 20 – Área de cobertura total	40
Figura 21 – (a) Área de toda a ilha (b) Área de cobertura	41
Figura 22 – Área de cobertura classificado por ERB	42
Figura 23 – Características de propagação entre a subSM e subCE	43
Figura 24 – Características de propagação entre a subAG e subSM	43
Figura 25 – Mapa de refratividade	50
Figura 26 – Características de propagação entre a subSJ e subAG	52
Figura 27 – Características de propagação entre a subCE e subIQ	53
Figura 28 – Características de propagação entre a subAG e subST	53
Figura 29 – Características de propagação entre a subST e subCE	54
Figura 30 – Características de propagação entre a subCE e subMR	54
Figura 31 – Características de propagação entre a subIQ e subMR	55
Figura 32 – Características de propagação entre a subIQ e subSM	55
Figura 33 – Características de propagação entre a subMR e subST	56
Figura 34 – Características de propagação entre a subST e subSJ	56

Lista de tabelas

Tabela 1 – Classes de <i>End-devices</i> LoRa	23
Tabela 2 – Parâmetros de entrada da modelo previsão de área	29
Tabela 3 – Localização das subestações	31
Tabela 4 – <i>Datasheet</i> Wirnet iStation	32
Tabela 5 – Refratividade da superfície para cada tipo de clima	34
Tabela 6 – Constantes elétricas do solo	34
Tabela 7 – Características de comunicação entre as ERB's	44

Lista de abreviaturas e siglas

3GPP	<i>Third-Generation Partnership Project</i>
ABP	<i>Activation By Personalization</i>
ADR	<i>Adaptative Data Rate</i>
ANATEL	<i>Agência Nacional de Telecomunicações</i>
ANEEL	<i>Agência Nacional de Energia Elétrica</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
AppEUI	<i>Application EUI</i>
AppKey	<i>Application Key</i>
AppSKey	<i>Application Session Key</i>
BPSK	<i>Chaveamento por Deslocamento de Fase Binário</i>
CIoT	<i>Sistema Celular para Internet das Coisas</i>
COST	<i>COoperation in the field of Scientific and Technical</i>
CSS	<i>Chirp Spread Spectrum</i>
DevAdd	<i>Device Address</i>
DevEUI	<i>Device EUI</i>
ERB	<i>Estação de Rádio Base</i>
GSM	<i>Global System for Mobile</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Services</i>
IEEE	<i>Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ITM	<i>Irregular Terrain Model</i>
LAN	<i>Local Area Networks</i>
LoRa	<i>Long Range</i>

LPWAN	<i>Long Power Wide Area Network</i>
LTE	<i>Long-Term Evolution</i>
MME	<i>Ministério de Minas e Energia</i>
M2M	<i>Machine to Machine</i>
NB-IoT	<i>Narrow Band IoT</i>
NSKey	<i>Network Session Key</i>
OTAA	<i>Over The Air Activation</i>
PLC	<i>Power Line Communications</i>
RF	<i>Rádio Frequência</i>
SDR	<i>Rádio Definido por Software</i>
SMS	<i>Short Message Service</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications Service</i>
UNB	<i>Ultra Narrow Band</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivo Geral	13
1.1.2	Objetivos Específicos	13
1.2	JUSTIFICATIVA	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	SMART GRID	14
2.2	INTERNET OF THINGS	15
2.3	TECNOLOGIAS LPWAN	16
2.3.1	NB-IoT	17
2.3.2	SIGFOX	18
2.3.3	LoRa	20
2.3.4	Protocolo LoRaWAN	22
2.4	PROPAGAÇÃO	24
2.4.1	Propagação em Espaço Livre	25
2.4.2	Reflexão	26
2.4.3	Difração	26
2.5	MODELO DE PROPAGAÇÃO	27
2.5.1	Modelo Longley-Rice	28
2.6	MODO DE VARIABILIDADE	30
3	METODOLOGIA	31
4	SOLUÇÃO PROPOSTA	33
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
5.1	ANÁLISE DE COBERTURA POR ERB'S	42
6	CONCLUSÃO	45
	REFERÊNCIAS	46
	ANEXO A – MAPA DE REFRAATIVIDADE	50

APÊNDICES

51

APÊNDICE A – LINK DE COMUNICAÇÃO ENTRE AS ERB'S . . 52

1 Introdução

Com o crescimento populacional e com o avanço da tecnologia, o fomento de cidades inteligentes tornou-se uma realidade, uma vez que, para atender uma grande população, faz-se necessário o uso de meios que automatizem vários processos.

Por conta disso, foi introduzido o conceito de *Internet of Things* (IoT), o qual busca interligar vários equipamentos (celulares, TVs, carros, sensores e etc) à internet. Assim, há a construção de uma rede complexa, a qual conecta bilhões de dispositivos e pessoas, empregando diferentes tecnologias, protocolos e multiplataformas. Desse modo, a IoT busca criar um mundo mais inteligente em que o físico e o virtual estão se entrelaçando para criar um ambiente mais ágil (CARVALHO, 2019).

Pinheiro (2019) descreve que, o uso de medidores inteligentes tanto de água, luz ou gás são exemplos bastante claros sobre o uso desse tipo tecnologia. Para mitigar o problema do fornecimento para grandes centros urbanos, esses equipamentos possuem sensores que informam a sua central sobre casuais eventos, o que resulta em um aumento considerável da qualidade da prestação de serviços.

A implantação da IoT oferece a possibilidade de transformar a indústria, a agricultura, a produção e a distribuição de energia, aumentando a disponibilidade de informações em tempo real, dando assim valor ao produto gerado. Certamente, a implementação em larga escala desses dispositivos prometem transformar muitos aspectos da maneira como vivemos (INTERNET SOCIETY, 2015).

Para Fracari, Santos e Sanchez (2015), o sistema de comunicação é o componente chave para integração desses diversos dispositivos, pois existe a necessidade do uso dessas tecnologias para que seja possível transmitir grandes ou pequenos volumes de dados. Com relação a isso, Lamin (2009) explica que há diversas e diferentes opções atualmente em uso que buscam diferentes formas de viabilizar o tráfego de informações.

Xu et al. (2018) aponta que, as redes de área ampla de baixa potência (LPWAN) são perfeitamente adequadas para as aplicações de IoT, pois precisam apenas transmitir pequenas quantidades de informações a longo alcance. Raza, Kulkarni e Sooriyabandara (2017) complementam que essa tecnologia é projetada para uma ampla cobertura de área e uma excelente propagação de sinal (tanto para ambientes externos como para internos), além de conseguir atingir lugares de difícil acesso, como subsolos.

Neste trabalho será realizado a simulação de predição de cobertura para uma determinada rede do segmento LPWAN, com intuito de analisar, através do percentual de área coberta, se a mesma consegue atender uma solução de *Smart Grid*.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é a proposta de uma solução de rede LPWAN para implantação de uma *SmartGrid*, tendo como base a simulação de rádio frequência, assim, buscando agrupar vários tipos de serviços, principalmente a medição inteligente de energia, água e gás, usando o conceito de internet das coisas (IoT - Internet of Things).

1.1.2 Objetivos Específicos

- Entender a comunicação LPWAN, bem como, exemplos de tecnologias deste seguimento;
- Simular predição de cobertura por meio de software para as Estações de Rádio Base (ERB's) definidas;
- Verificar o percentual de área coberta pela rede IoT escolhida;
- Apontar limitações e possíveis soluções para o projeto desenvolvido.

1.2 JUSTIFICATIVA

O crescimento populacional acarreta no crescente uso de equipamentos para realização de variados serviços. Como há também um grande aquecimento no mercado de internet das coisas, faz-se necessário o estudo de tecnologias de comunicação que conseguem compor de forma extensiva essa variedade de dispositivos, buscando abranger também uma grande área geográfica.

As redes LPWAN's são promissoras para exercer esse propósito, pois conseguem alcançar uma grande área a pequenos custos, o que, conseqüentemente, ocasiona em uma implantação mais barata. Por conta disto, deve-se entender os seus tipos e suas características, para assim determinar qual irá melhor atender às necessidades do projeto.

2 Fundamentação Teórica

Neste capítulo será realizado uma revisão bibliográfica apresentando o conceito de *Smart Grid* e *Internet of Things*, além de caracterizar as redes do tipo LPWAN incluindo alguns exemplos deste seguimento. Por fim, discorrer sobre os meios de propagação apontando modelos que buscam otimizar o estudo de rádio frequência.

2.1 SMART GRID

Falcão (2010) descreve que a expressão “*Smart Grid*” deve ser compreendida mais como um conceito do que uma tecnologia ou equipamento específico, uma vez que busca a utilização acentuada dos recursos de automação, computação e comunicação para a supervisão e controle de redes elétricas. Com isso, acredita-se que a implantação de procedimentos de controle, assim como a otimização da rede serão muito mais eficientes do que as usadas atualmente.

Essa ideia foi introduzida pela primeira vez em 2005 no artigo *Toward A Smart Grid*, escrito por S. Massoud Amin e Bruce F. Wollenberg e publicado na revista IEEE P&E. Nessa, é retratado que para acrescentar inteligência a um sistema de transmissão de energia elétrica, precisa-se ter processos independentes em cada componente, sejam eles na distribuição ou até mesmo na geração. Esses processos devem ter um sistema robusto e capacidade de atuar como agentes individuais que possam se comunicar e cooperar uns com os outros, formando uma grande plataforma de computação distribuída (AMIN; WOLLENBERG, 2005).

Existem várias definições para o conceito de redes inteligentes, mas todas convergem para o uso de elementos digitais e de comunicações nas redes que transportam a energia. Esses elementos possibilitam o envio de uma gama de dados e informação para os centros de controle, onde eles são tratados, auxiliando na operação e controle do sistema como um todo (MME, 2021, p. 21).

De acordo com MME (2021), o início de algo semelhante ao conceito de redes inteligentes se originou na Itália, por volta dos anos 2000. Sendo introduzido com um projeto para instalação em grande escala de medição eletrônica, chamado de “*Telegestore Project*”, previu-se a utilização de cerca de 27 milhões de medidores com capacidade de comunicação por Power Line Communications (PLC), que consistia na transmissão de dados via cabo de energia.

No Brasil, a implantação de redes inteligentes teriam como principais objetivos a busca pelas eficiências comercial e energética. Outros pontos de interesse correspondem ao

aumento da confiabilidade do sistema elétrico, a segurança operacional e sistêmica, bem como a sustentabilidade econômica e ambiental (ANEEL, 2010 apud RIVERA; ESPOSITO; TEIXEIRA, 2013).

Desde 2008, a ANEEL vem buscando maneiras de implantar a metodologia baseada em *Smart Grid* no Brasil, visando desenvolver uma rede de distribuição com mais funcionalidades possíveis (ANEEL, 2010). Em 2015, havia cerca de 200 projetos com esse conceito, tendo um investimento de aproximadamente 1,6 bilhões de reais em pesquisa e desenvolvimento que envolviam 450 instituições (FRACARI; SANTOS; SANCHEZ, 2015).

2.2 INTERNET OF THINGS

Lamin (2009), comenta que em um sistema de telemedicação, como é o caso de projetos que envolvem *Smart Grid*, a rede local de transmissão de dados é o vínculo da interface do módulo de comunicação do medidor para os concentradores.

O conceito de IoT é incorporar uma grande gama de produtos, sistemas e sensores em rede. Desse modo, tem-se a tendência de se aproveitar os avanços da computação, miniaturização eletrônica e interconexões de rede, para oferecer novos recursos que antes não eram possíveis (INTERNET SOCIETY, 2015).

Cunha (2021), alega que a internet vem possibilitando essa interconectividade universal, tanto entre serviços quanto em negócios, culminando em uma revolução na rede global de computadores. O autor ainda menciona que inúmeros países estão criando regulamentações e estimulando o emprego da tecnologia, devido as suas diversas aplicabilidades em diferentes setores.

PLC, GSM, GPRS, UMTS, SMS, LAN, Mesh, são alguns dos exemplos de tecnologias de comunicação disponíveis para realizar a transmissão de dados entre os elementos que compõe a rede inteligente com seu sistema operador (LAMIN, 2009).

Por outro lado, Garcia e Kleinschmidt (2017) explicam que a implantação da IoT tem sido suprida por tecnologias de curto alcance. Alguns exemplos de substituição são a rede mesh usando algoritmos de roteamento com múltiplos saltos ou ainda as redes de longo alcance GSM (Global System for Mobile Communications), usadas, em grande parte, por aparelhos celulares.

Essa abordagem geralmente impacta na eficiência do uso da energia e de equipamentos, aumentando o seu consumo e encarecendo os dispositivos que gerenciam a rede e os dados trafegados, por consequência, aumentando o custo de toda a solução (SANCHEZ-IBORRA; CANO, 2016).

Por conta disso, a escolha do tipo de tecnologia de comunicação necessita da análise

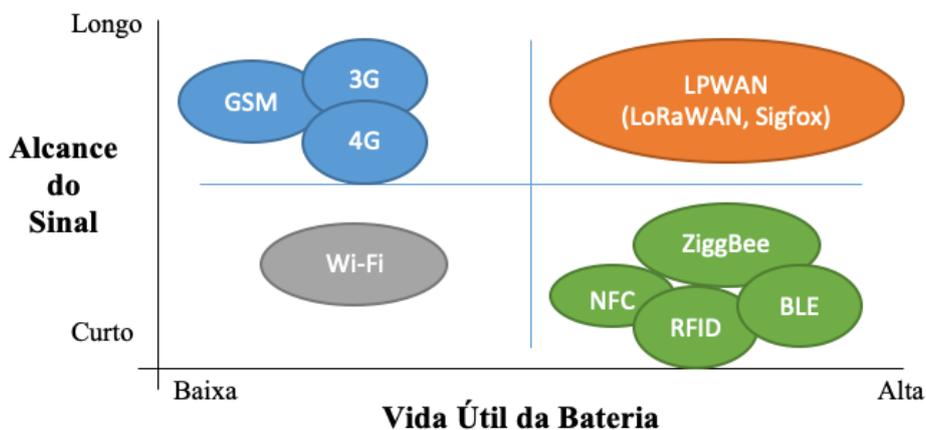
de uma série de fatores, como topologia, preço, disponibilidade, alcance e viabilidade. Destaca-se também que pode haver mais de um meio de propagação de dados para uma mesma gama de equipamentos, uma vez que existem áreas extensas, com grande variedade de terrenos e distintas classes consumidoras (MME, 2021).

2.3 TECNOLOGIAS LPWAN

Uma solução promissora para integrar essa variedade de dispositivos são as redes de longa distância ou redes WAN (Wide Area Network), que também pode ser intitulada como rede de área ampliada ou rede geograficamente distribuída. Com o seu uso, é possível transmitir dados através de grandes distâncias, por meio de uma rede de comunicação que abrange uma ampla extensão e uma área geográfica espaçosa (LAMIN, 2009).

De acordo com Cunha (2021), a rede de comunicação Sigfox, na década dos anos 2000, deu popularidade a tecnologia Low Power Wide Area Network (LPWAN), sendo essa uma tecnologia emergente, que foi desenvolvida para aperfeiçoar a conectividade dos dispositivos que utilizam os conceitos de IoT (CUNHA, 2021).

Figura 1 – Longevidade das baterias em função do alcance do sinal



Fonte: Cunha (2021).

Garcia e Kleinschmidt (2017) complementam que, as redes do tipo LPWAN surgem como uma nova alternativa para a conectividade em IoT e M2M (Machine-to-Machine). Como mostrado na Figura 1, essas possuem longo alcance, baixo consumo de energia, além de serem relativamente mais baratas.

Os requisitos básicos para dispositivos sem fio em redes que atendem grandes áreas são: baixo consumo de energia, comunicações de longa distância, taxa de dados média, baixo custo de manutenção, baixa latência. Especialmente, baixo consumo de energia e comunicação de

longa distância são características indispensáveis, pois muitos dispositivos são implantados em regiões com difícil acesso a alimentação de energia, logo eles deveriam operar com alimentação de bateria que suportem um longo período (CARVALHO, 2019, p. 21).

Uma das principais características das redes LPWAN's é sua faixa de operação em bandas de frequência não licenciadas, principalmente nas larguras de bandas em 169 MHz, 433 MHz, 868/915 MHz e 2,4 GHz. As bandas de frequências não licenciadas definidas no Brasil, pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), estão entre 902 a 907,5 MHz, 915 a 928 MHz, 2,4 a 2,48 GHz, 5,72 a 5,85 GHz (CUNHA, 2021).

Essas tecnologias utilizam a topologia em estrela, o que consiste em diversos dispositivos conectados diretamente ao ponto de acesso. Ressalta-se que essa favorece na melhoria das comunicações entre os dispositivos, além de eliminar a implementação de protocolos de roteamento (EMBARCADOS, 2017).

Embora atualmente existam diversas alternativas para LPWAN em estudo no mundo, no Brasil elas se encontram em diferentes estágios de disponibilidade para aplicação. As que se apresentam em estágios mais avançados para uso são as redes NB-IoT, SigFox e LoRa (GARCIA; KLEINSCHMIDT, 2017).

2.3.1 NB-IoT

Como explicado por Mwakwata et al. (2019), o Narrow Band Internet of Things (NB-IoT) é uma tecnologia recente de acesso por rádio celular baseada em Long-Term Evolution (LTE), introduzida pelo Third-Generation Partnership Project (3GPP) para Low Power Wide Area Networks (LPWAN).

Tendo sido resultado do item de estudo do 3GPP TR 45.820 intitulado “*Suporte de sistema celular para Internet das Coisas (CIoT) de complexidade ultrabaixa e baixo rendimento*”, uma nova tecnologia de rádio de banda estreita foi proposta, sendo denominada de Narrow Band IoT ou NB-IoT (ZAYAS; MERINO, 2017).

De acordo com Zayas e Merino (2017), o 3GPP é o órgão de padronização que especifica os sistemas de comunicações móveis LTE/LTE-Advanced, bem como 3G UTRA e 2G GSM. Os padrões 3GPP são organizados como *Releases*.

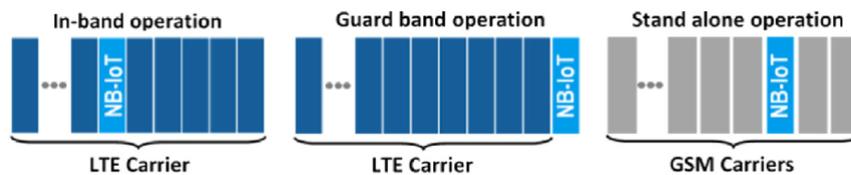
A definição da tecnologia móvel conhecida como Long Term Evolution foi iniciada em 2005, sendo que suas primeiras especificações foram introduzidas no Release 8 em dezembro de 2007. Por sua vez, a tecnologia Narrow Band teve seus estudos iniciados em 2014, pela Huawei e Vodafone, mas apenas no Release 13 de 2016 que 3GPP padroniza o NB-IoT que é empregado atualmente (ZAYAS; MERINO, 2017).

Carvalho (2019) explica que uma tecnologia de banda estreita, tem objetivo de permitir a flexibilização de sua implementação, uma vez que apresenta longa duração da

bateria, baixo custo e complexidade de dispositivos para grandes extensões de cobertura.

O termo banda estreita refere-se à largura de banda NB-IoT de no máximo 200 kHz, sendo capaz de coexistir com GSM, GPRS e LTE (ver Figura 2). Podendo ser suportada apenas com uma atualização sobre a infraestrutura LTE existente, essa pode ser implantada dentro de uma única portadora GSM de 200 kHz, dentro de um único bloco de recurso físico LTE de 180 kHz, ou ainda em uma banda de guarda LTE (CARVALHO, 2019).

Figura 2 – Modos de operação para NB-IoT



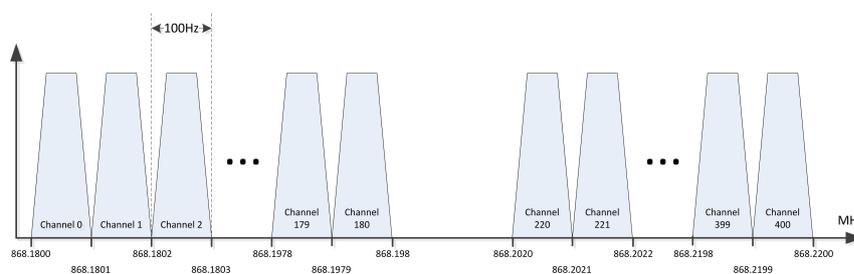
Fonte: Mekki et al. (2018).

É necessário que o NB-IoT tenha baixa complexidade, para assim garantir o objetivo de baixo custo, facilitando também conexões massivas. Os recursos que foram implementados para atingir tal objetivo incluem processamento relaxado de banda, baixo armazenamento de memória e componentes de radiofrequência reduzidos (MWAKWATA et al., 2019).

2.3.2 SIGFOX

A tecnologia Sigfox foi desenvolvida em 2010 pela start-up Sigfox em Toulouse na França, sendo essa uma empresa e operadora de rede LPWAN. Atualmente, ela opera e comercializa sua própria solução de IoT em vários países, de modo que ainda está em fase de implantação em todo o mundo (MEKKI et al., 2018).

Figura 3 – Espectro dos 400 canais da rede Sigfox



Fonte: Margelis et al. (2015).

Essa tecnologia é uma variação da rede de celular, no entanto, nenhuma informação técnica detalhada é divulgada. Ela permite que dispositivos remotos se conectem a um ponto de acesso possuidor de Ultra Narrow Band (UNB), operando na faixa de frequência

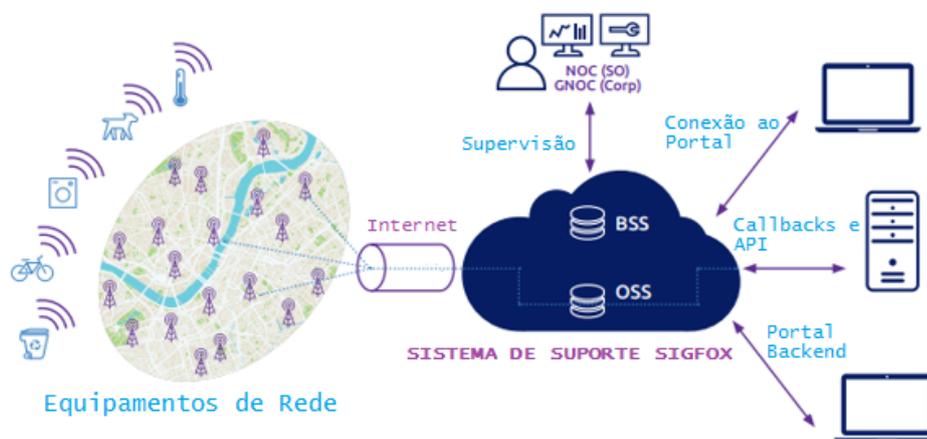
de 868 MHz, com o espectro dividido em 400 canais de 100 Hz, como mostrado na Figura 3, começando em 868,180 MHz para o canal 0 e terminando em 868,220 MHz para o canal 400, onde os canais 181-219 são reservados e não utilizados (MARGELIS et al., 2015).

De acordo com Carvalho (2019), o Sigfox utiliza 192 kHz da banda disponível para troca de mensagens pelo ar. Desse modo, cada mensagem tem 100 Hz de largura e é transferida com uma taxa de dados de 100 ou 600 bits por segundos (bps), dependendo da região.

Mekki et al. (2018) relata que a operação da rede Sigfox é implementada usando ERB's equipadas com rádios definidos por software (SDR) que se comunicam com os servidores. Os dispositivos se conectam a essas estações utilizando modulação BPSK (Chaveamento por Deslocamento de Fase Binário).

O autor explica ainda que no protocolo de comunicação é realizado o uso de pequenas mensagens. O tamanho do protocolo varia de 0 a 12 bytes, possuindo também suporte para comunicação bidirecional com link assimétrico, ou seja, a comunicação no *downlink* (do sistema para o dispositivo) só deve ocorrer seguida por uma transmissão no *uplink* (do dispositivo para o sistema).

Figura 4 – Topologia da Rede Sigfox



Fonte: Carvalho (2019).

A topologia em estrela da Sigfox é semelhante a uma arquitetura usada na rede de celular, como mostrado na Figura 4, uma vez que apresenta uma ampla implantação de estações de rádios base, as quais são destinadas a cobrir até países inteiros. Essa estrutura permite que os nós periféricos carreguem os dados coletados diretamente para os servidores da Sigfox, o que os torna acessíveis aos assinantes por meio de uma API (Application Programming Interface) entregue na Web, no entanto, cada dispositivo final pode enviar até 140 mensagens por dia (SANCHEZ-IBORRA; CANO, 2016).

A Sigfox ainda afirma que todo ponto de acesso pode lidar com até um milhão de dispositivos finais, com uma área de cobertura de 30 a 50 km em áreas rurais e de 3 a 10 km em áreas urbanas (AUGUSTIN et al., 2016).

2.3.3 LoRa

LoRa do inglês *Long Range* ou *Longo Alcance*, é uma nova tecnologia de rede de comunicação sem fio concebida pela Semtech Corporation e promovida através da LoRa Alliance (TEIXEIRA; ALMEIDA, 2017).

De acordo com SEMTECH (2022), essa tecnologia é uma técnica de modulação de espalhamento espectral derivada da tecnologia de *Chirp Spread Spectrum* (CSS), sendo também uma plataforma sem fio de longo alcance e baixo consumo de energia que se tornou a plataforma sem fio de IoT.

LoRa devices and networks such as the LoRaWAN enable smart IoT applications that solve some of the biggest challenges facing our planet: energy management, natural resource reduction, pollution control, infrastructure efficiency, and disaster prevention (SEMTECH, 2022, p. 1).

A rede LoRa se manteve no Brasil através de comunidades de usuários e doutrinadores, como um modelo aberto, em que, questões da rede como cobertura, configuração, etc., passam a ser aspectos importantes dentro do desenvolvimento do projeto. (GARCIA; KLEINSCHMIDT, 2017)

Diversos sistemas sem fio legados utilizam da modulação FSK (Frequency Shifting Keying) como camada física, pois esta modulação é muito eficiente no alcance de baixa potência. O LoRa é fundamentado na modulação de espectro espalhado chirp, que mantém as mesmas características de baixa potência da modulação FSK, mas aumenta consideravelmente o alcance da comunicação (LORA ALLIANCE, 2015b).

A modulação CSS é uma técnica de codificação para transmissão digital de sinais, que usa uma tecnologia de espalhamento do sinal a ser transmitido no espectro de frequência, gerando um sinal da portadora chirp. Ela realiza a variação de taxa de transmissão em função da sensibilidade dos receptores, ou seja, a utilização de uma mesma largura de banda por canal, a partir dos três parâmetros chave da modulação (CUNHA, 2021).

De acordo com Garcia e Kleinschmidt (2017), esses parâmetros são o *Spreading Factor* ou *Fator de espalhamento*, que podem ser adotados como 7, 8, 9 ou 10, sabendo que quanto maior, mais informações são transmitidas por bit, gerando assim um aumento de processamento. O segundo *Bandwidth* ou *Largura de banda*, que podem ser 125 kHz, 250 kHz ou 500 kHz para um dado fator de espalhamento, uma largura de banda mais estreita, amplifica a sensibilidade de recepção e aumenta o tempo de transmissão. E, por fim, o *Forward Error Correction*, que regula a detecção e correção de erros.

Essas configurações determinaram o *Bit Rate*, o máximo *Payload Size* e o *Time on Air* (tempo de transmissão ou duração do pacote no ar), influenciando o tamanho das mensagens, o seu alcance e consumo de energia (LORA ALLIANCE, 2015a apud GARCIA; KLEINSCHMIDT, 2017).

Além disso, esse tipo de parametrização permite que exista a possibilidade do conceito de Adaptive Data Rate (ADR), em que o LoRa pode controlar a taxa de dados e a potência de saída do RF em cada end-device, visando otimizar taxas de transmissão, diminuir o consumo de energia e aumentar a capacidade da rede (GARCIA; KLEINSCHMIDT, 2017).

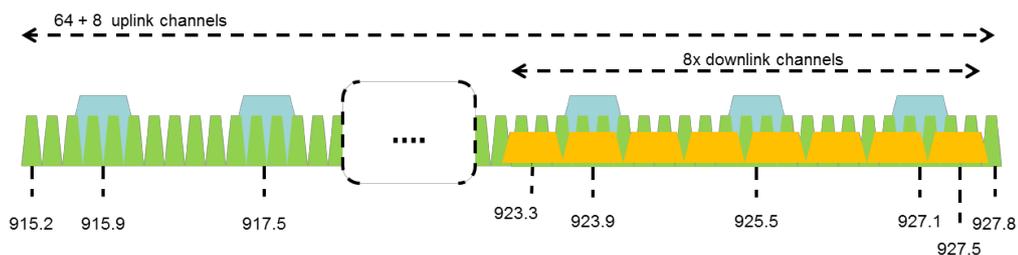
Existem diversas vantagens em se aplicar modulação CSS, já que devido ao alargamento do espectro de frequência, sinais de baixa potência não interferem em outros sistemas. Além disso, há uma melhora na rejeição à interferência, pois pelo alargamento do espectro é mais difícil de afetar o sinal por completo. Ademais, destaca-se a capacidade anti-jamming, de fazer com que o sinal troque de faixa dependendo da técnica utilizada e do código aplicado na transmissão e na recepção (TEIXEIRA; ALMEIDA, 2017).

As especificações referente aos canais distribuídos pela frequência na rede LoRa variam de acordo com a região, que se baseia nas diferentes alocações regionais de espectro e requisitos regulatórios (LORA ALLIANCE, 2015b).

O LoRa opera em faixas Sub GHz. No Brasil, a banda utilizada, apontada pela LoRa Alliance (2021), é AU915-928, ou seja, o intervalo entre 915 a 928 MHz, o que permite alcançar uma distância de 5 Km em áreas urbanas e até 15 km em áreas rurais com baixo consumo de energia (GARCIA; KLEINSCHMIDT, 2017).

Os canais de *uplink* são primeiro divididos em 64 canais, de 0 a 63, começando em 915,2 MHz e incrementando linearmente em 200 kHz até 927,8 MHz, além de mais 8 canais numerados de 64 a 71 que começam em 915,9 MHz e terminam em 927,1 MHz, sendo dividido em 1,6 MHz cada. Para os canais de *downlink*, são destinados 8 canais numerados de 0 a 7 começando em 923,3 MHz e incrementando em 600 kHz até 927,5 MHz (LORA ALLIANCE, 2021). A distribuição dos canais está presente na Figura abaixo.

Figura 5 – Representação dos canais da banda AU915-928



Fonte: LoRa Alliance (2021).

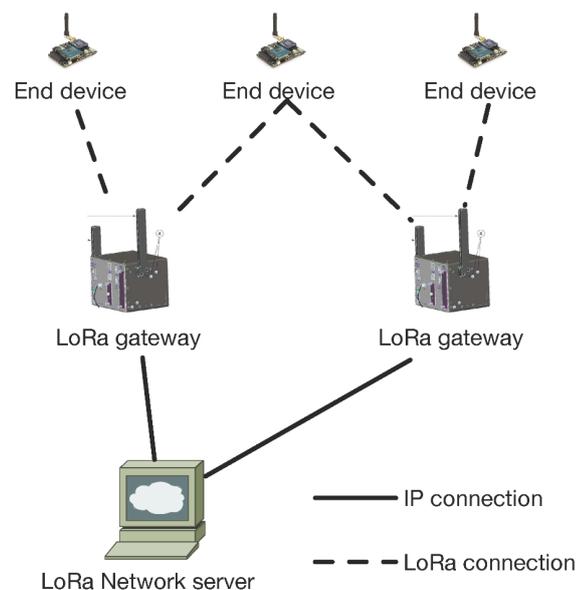
2.3.4 Protocolo LoRaWAN

A rede LoRa é o tipo de modulação do sinal, ou seja, a camada física, sendo que podem ser utilizados vários protocolos. Porém, o que foi desenvolvido para aplicação exclusiva em redes LoRa é o LoRaWAN (TEIXEIRA; ALMEIDA, 2017).

LoRaWAN define o protocolo de comunicação e a arquitetura do sistema para a rede, enquanto a camada física LoRa habilita o link de comunicação de longo alcance. O protocolo e a arquitetura de rede têm maior influência na determinação da vida útil da bateria de um nó, na capacidade da rede, na qualidade do serviço, na segurança e na variedade de aplicações atendidas pela rede. (LORA ALLIANCE, 2015b, p. 7)

A arquitetura de rede LoRaWAN é implantada em uma topologia estrela, no qual, os gateways retransmitem mensagens entre os dispositivos finais e um servidor de rede central (LORA ALLIANCE, 2022), como mostrado na figura abaixo:

Figura 6 – Topologia estrela LoRaWAN



Fonte: Augustin et al. (2016).

Cunha (2021), discorre sobre esses três elementos da seguinte forma:

- **End-devices:** é o elemento responsável pelo envio de dados e recebimento de comandos, ele que estabelece a comunicação entre o gateway e o nó;
- **Gateway:** é o componente que recebe, armazena e encaminha os dados oriundos dos end-devices, repassando-os para o network server. Por conta disto, ele é o elemento central da rede, realizando a conexão entre os dispositivos finais e o servidor da rede LoRa;

- **Network Server:** é a estrutura simples de recepção do servidor, que basicamente recebe mensagens originadas do gateway ou envia mensagens para o mesmo, a partir de mensagens criptografadas entre nós e o servidor.

Em uma rede LoRaWAN os dispositivos finais não estão associados a um gateway específico. Em vez disso, os dados transmitidos por um nó geralmente são recebidos por vários gateways. Sendo assim, cada um encaminhará o pacote recebido do nó final para o servidor da rede (LORA ALLIANCE, 2015b).

Ainda no que se refere a camada LoRaWAN, a transferência de dados é executada em canais diferentes. Diante disso, os *end-devices* são pré-configurados conforme as classes de dispositivos (Classes A, B e C). Cunha (2021) explica que tais classes de dispositivos são categorizadas basicamente em função do consumo energético e sua latência nas comunicações com a rede. Abaixo segue um resumo sobre os tipos de dispositivos.

Tabela 1 – Classes de *End-devices* LoRa

Classes	A	B	C
Tipo	Alimentado por Bateria	Baixa Latência Alimentado por Bateria	Sem Latência Alimentação Externa
Comunicação	Bidirecional	Bidirecional	Bidirecional
Mensagem	Unicast	Unicast e Multicast	Unicast e Multicast
Latência mensagens	Longos Intervalos	Longos Intervalos	Mensagens podem ocorrer a qualquer momento
Quem e quando, inicia a Comunicação?	<i>End-device</i> , quando algo acontece	<i>NetWork Server</i> , podendo iniciar em intervalos fixos e regulares	<i>End-devices</i> e <i>Network Server</i> , a qualquer momento

Fonte: Adaptado de Garcia e Kleinschmidt (2017).

SEMTECH (2019) informa que todos os dispositivos devem suportar a operação Classe A. Os da Classe B comportam os modos A e B, e os Classe C contém todos os três modos de operação.

Esses modos de operação têm a ver com a forma como os dispositivos se comunicam com a rede. Além disso, como explicado por Augustin et al. (2016), a comunicação não é realizada de dispositivo a dispositivo, os pacotes só podem ser transmitidos de um dispositivo para o servidor de rede ou vice-versa.

Em relação a ativação dos *end-devices* na rede, o protocolo LoRaWAN suporta dois métodos: Ativação pelo ar (OTAA – Over The Air Activation) e Ativação por personalização (ABP – Activation By Personalization) (TEIXEIRA; ALMEIDA, 2017).

De acordo com Augustin et al. (2016), o processo de ativação deve fornecer aos nós terminais as seguintes informações:

- **Device Address** (DevAdd): é um identificador de 32 bits do end-device. Seis bits são usados como identificador de rede e 25 bits são usados como o endereço de rede do dispositivo final;
- **Application EUI** (AppEUI): é um identificador de aplicação global no espaço de endereço IEEE EUI 64 (Extended Unique Identifier), que identifica de maneira exclusiva o proprietário do dispositivo final;
- **Network Session Key** (NSKey): é uma chave usada pelo servidor de rede e o end-device para calcular e verificar o código de integridade de todas as mensagens de dados;
- **Application Session Key** (AppSKey): é uma chave usada pelo servidor de rede e end-device para criptografar e descriptografar as mensagens de dados.

Como Garcia e Kleinschmidt (2017) descrevem, a ativação via OTAA se baseia nos envios do identificador global único DevEUI, do AppEUI e na chave de aplicação AppKey. Tais dados são utilizados na camada de aplicação para validar e ativar o dispositivo em determinada rede. Com a ativação, ocorre a aceitação na rede “*join accept*”, a qual contém o DevAdd, a NSKey e a AppSKey.

Via ABP, o DevAdd, a NSKey e a AppSKey são gravadas na fabricação do dispositivo. Com isso, ele já está pronto para comunicar assim que conectado na rede (GARCIA; KLEINSCHMIDT, 2017).

2.4 PROPAGAÇÃO

O estudo do comportamento das ondas de rádio se dá por meio do entendimento de sua propagação, isso acontece quando essas partem de um sistema transmissor para um sistema receptor. Características como a morfologia da terra, assim como desníveis ou aclives acentuados, podem afetar o desempenho da propagação. Outros fatores como a cobertura do solo, locais que tem uma grande quantidade de cobertura vegetal ou que possuem edificações, também causam perturbações nas ondas propagadas (PINHEIRO, 2019 apud COUDÉ, 1988).

A comunicação via rádio terrestre geralmente baseia-se na reflexão de ondas eletromagnéticas em várias superfícies ou na difração destas ondas ao redor de vários objetos. Com estes modos adicionais de propagação, existem vários caminhos de propagação entre o transmissor e o receptor, e o receptor geralmente recebe um sinal significativo de mais do que um

único caminho. Este fenômeno é chamado de propagação multicaminho. Com várias ondas chegando na mesma posição, propriedades de propagação podem diferir significativamente das propriedades da propagação em espaço livre. Existem três modos básicos de propagação que se aplicam à propagação terrestre: espaço livre, reflexão e difração (HAYKIN; MOHER, 2008a, p. 459).

Haykin e Moher (2008a) completam que o sinal recebido, geralmente, é a combinação dos vários modos de propagação. Considerando que não existe uma visada direta entre o transmissor e o receptor, além de que a comunicação se baseia na reflexão e no modo de difração, com isso, a informação transmitida pode chegar no receptor por vários caminhos.

2.4.1 Propagação em Espaço Livre

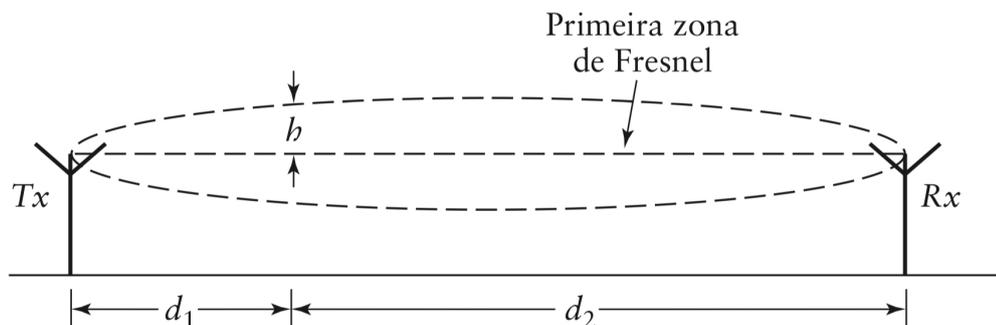
De acordo com Haykin e Moher (2008a), a propagação em espaço livre está sujeita ao caminho entre o transmissor e o receptor, assim como a uma certa área não provida de obstáculos, como visto na Figura 7.

A área limpa necessária é relacionada com a separação entre os dois: transmissor e receptor. Considera-se também o comprimento de onda da transmissão. Um conhecimento prático chamado de zona de Fresnel, que define uma elipsóide de revolução entre os dois pontos, deve ser mantido, sem obstrução de objetos, para uma propagação aproximada à de espaço livre. O raio da primeira zona de Fresnel obedece a posição entre a antena de transmissão e recepção, sendo dado por:

$$h = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (2.1)$$

em que λ é o comprimento de onda de transmissão, d_1 é a distância para o transmissor e d_2 é a distância para o receptor, para um ponto em particular ao longo do caminho (HAYKIN; MOHER, 2008a).

Figura 7 – Propagação em espaço livre



Fonte: Haykin e Moher (2008a).

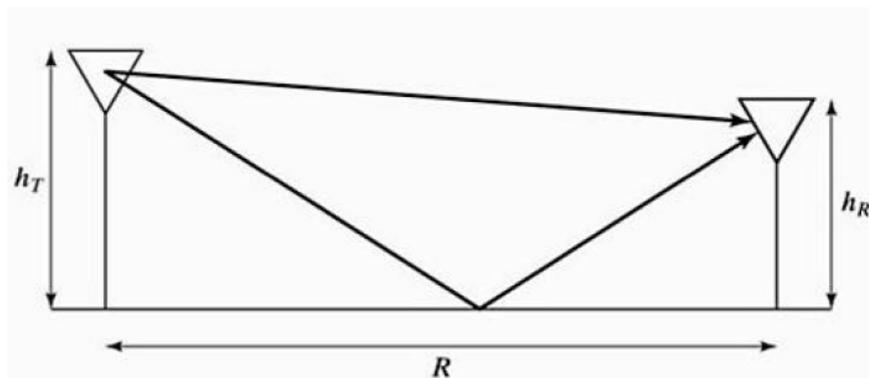
Haykin e Moher (2008a) ainda ressaltam que objetos dentro da primeira zona de Fresnel irão afetar a transmissão e causarão desvios do modelo de propagação em espaço livre.

2.4.2 Reflexão

A reflexão em rádio frequência se refere ao batimento de ondas eletromagnéticas em objetos tais como edifícios, montanhas e veículos. De acordo com Haykin e Moher (2008a), normalmente a reflexão atenua ainda mais o sinal, podendo também afetar sua fase.

A superfície terrestre exerce um papel fundamental em modelos de propagação terrestre, em tais modelos a propagação da onda de rádio não utiliza reflexão ionosférica. Possuindo algumas dezenas de quilômetros, esses modelos também desconsideram os efeitos causados pela curvatura da terra, assim, utilizando o conceito de terra plana (HAYKIN; MOHER, 2008b).

Figura 8 – Modelo de reflexão terra plana



Fonte: Haykin e Moher (2008b).

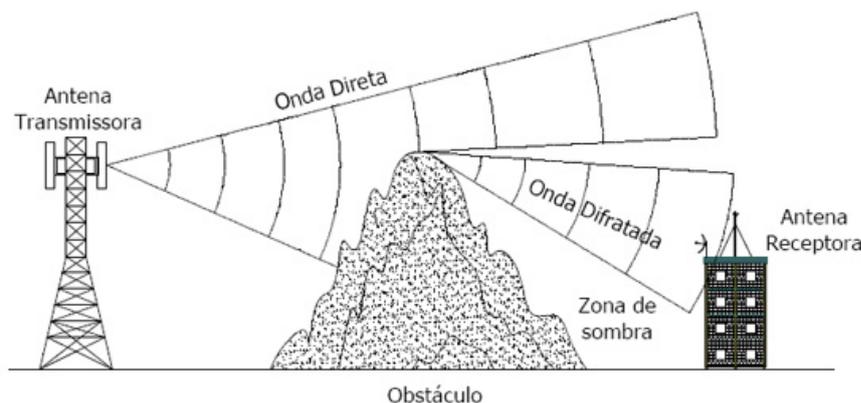
Assim, é constituído de uma antena transmissora fixa com altura h_T que transmite para uma antena receptora fixa, com altura h_R , ambas em relação ao solo (ver Figura 8). No decorrer da propagação acontecem duas situações diferentes: uma, é a propagação direta da frente de onda até o receptor; a outra, é a propagação da frente de onda refletida pela superfície da terra (HAYKIN; MOHER, 2008b).

2.4.3 Difração

Como explicado por Haykin e Moher (2008a), a difração trata-se da capacidade das ondas eletromagnéticas de contornar objetos (como um edifício), ou terrenos (como morros) e atravessar objetos (como árvores e outras formas de vegetação).

Um simples obstáculo como na Figura 9, pode ser representado por um modelo simples e prático para avaliar a atenuação do sinal. Conhecido como obstáculo gume de faca, ocorrendo principalmente em áreas rurais, onde as irregularidades do terreno são as principais responsáveis por efeitos de difração na propagação da energia (SILVA, 2004).

Figura 9 – Difração por um obstáculo



Fonte: Ibytes (2022).

Diferente do acima, em áreas urbanas e suburbanas das cidades, as quinas dos prédios e residências não se ajustam de forma precisa ao sistema do tipo gume de faca. Com isso, há carência de se definir um modelo geométrico que melhor se aproxime da situação real. A hipótese da difração por uma aresta tem mostrado resultados satisfatórios para resolver esse problema (SILVA, 2004).

2.5 MODELO DE PROPAGAÇÃO

É comum não saber as características de forma exata do meio e do canal de propagação. Logo, não se sabe exatamente como a onda irá se comportar durante todo o percurso, desde a sua transmissão até sua recepção. Por conta disso, para buscar entender o comportamento da onda durante sua propagação recorre-se a modelos de rádio propagação (HUFFORD; LONGLEY; KISSICK, 1982).

A predição de cobertura tem sido um desafio desde que as primeiras transmissões foram feitas. Com o passar dos anos, muitos modelos de propagação foram propostos para prever a propagação de rádio frequência, cada modelo melhorava seu antecessor. . . Todos os modelos de predição têm parâmetros que podem ser ajustados para uma área específica. Modelos tradicionais necessitam de ajustes na base da célula, enquanto modelos avançados precisam ser ajustados para cenários que se aplicam a grupos de células. Esse processo de calibração é complexo e necessita de ferramentas especializadas (CARVALHO, 2019, p. 37).

De acordo com Carvalho (2019), o modelo Korowajczuk foi formulado por *Korowajczuk* para o uso no *CelPlan Technologies*, tendo o objetivo de suprir as lacunas deixadas pelos modelos tradicionais ao realizar previsões reais. Ele emprega o uso de morfologias fracionárias, o que melhorou consideravelmente as previsões, no entanto, ainda havia situações em que o resultado não era satisfatório.

O modelo COST 231, COST de *COoperation in the field of Scientific and Technical research*, foi um dos meios adotadas na Europa para estimular o desenvolvimento técnico/científico entre indústrias, institutos de pesquisa e universidades. Para tanto, o estudo dedica-se a analisar a evolução das comunicações móveis e terrestres, englobando aspectos do sistema rádio, dos problemas de propagação e de aplicações de faixa larga. Esse modelo é uma extensão dos resultados obtidos por Okumura e Hata, que abrangem as bandas de frequência entre 1500 MHz e 2000 MHz (SILVA, 2004).

O modelo Lee foi uma solução desenvolvida devido a uma grande campanha de coleta de dados executada nos EUA, durante os anos 80. Por conta de sua simples formulação matemática, é comumente utilizado em simulações e modelagem de propagação. A suposição fundamental do modelo é que a perda do caminho de propagação depende de fatores naturais do terreno e fatores de estruturas criadas pelo homem. Assim, a estratégia do modelo consiste em tentar separar os impactos desses dois fatores (CARVALHO, 2019).

Silva (2004) ainda descreve sobre o modelo de Erceg, baseado na solução da terra plana, equaciona a atenuação de propagação em função da distância, separadas por um ponto de quebra do raio da primeira zona de Fresnel no ponto de reflexão. Para distâncias inferiores ao ponto, a atenuação observada consiste nos pontos de máxima variação do sinal na região de interferência, para distâncias além do ponto de quebra tem-se um comportamento similar ao que foi definido na zona de difração.

2.5.1 Modelo Longley-Rice

De acordo com Chamberlin e Luebbers (1982), o modelo Longley-Rice foi elaborado para determinar a perda de propagação para trajetórias, em que há poucas informações disponíveis. Também conhecido como ITM (*Irregular Terrain Model*), que opera entre frequências de 20 MHz a 20 GHz, focando na energia do sinal recebido, desprezando detalhes específicos do canal de comunicação (HUFFORD; LONGLEY; KISSICK, 1982).

Como descrito por Hufford, Longley e Kissick (1982), em situações reais os níveis de recepção de um sinal se comportam de maneira aleatória, devido às mudanças de condições atmosféricas e do relevo. A precisão de previsão tende a ser limitada por técnicas de aproximação usadas para compensar dados de entrada definidos de forma imprecisa. Para tentar estimar o nível de recepção, são usadas as equações de Maxwell para aproximação dos aspectos físicos da realidade fornecendo níveis de potência do sinal no receptor, bem

como os desvios de sinais previstos durante a transmissão estatística por ser baseado em equações matemáticas.

Tabela 2 – Parâmetros de entrada da modelo previsão de área

Parâmetros do Sistema	
Frequência	20 MHz a 20GHz
Distância	1 km a 2.000 km
Altura da antena	0,5 m a 3.000 m
Polarização	vertical ou horizontal
Parâmetros Ambientais	
Parâmetro de irregularidade do terreno, Δh	
Constantes de aterramento elétricos	
Refração da superfície	250 a 400 N-unidades
Clima	1 a 7 climas
Parâmetros de Implantação	
Critérios de localização	aleatório, cuidadoso ou muito cuidadoso
Parâmetros Estatística	
Confiabilidade e nível de confiança	0,1% a 99,9%

Fonte: Traduzido de Hufford, Longley e Kissick (1982).

Segundo Chamberlin e Luebbers (1982), os parâmetros de entrada para o modelo Longley-Rice incluem um perfil de terreno em que vai haver a propagação, alturas da antena do transmissor e receptor, frequência, distância, polarização e refratividade da superfície (parâmetros de entrada completo em Tabela 2).

O modelo considera que o objeto receptor esteja em uma das três regiões de recepção: linha de visão, difração e dispersão. Essas regiões são delimitadas a partir dos dados do terreno e da localização das antenas. A linha de visão acontece se não houver bloqueio físico entre as duas antenas, a difração ocorre entre o limite da sombra e um ângulo de depressão experimentalmente definido e a dispersão é assumida para dominar abaixo desse ângulo (CHAMBERLIN; LUEBBERS, 1982).

Conforme Pinheiro (2019), o modelo Longley-Rice já passou por diversas atualizações e alterações, desde a sua concepção até o presente momento. Uma das alterações mais importantes foi a introdução da propagação em ambientes urbanos, tendo a inclusão das perdas adicionais ocasionadas por ruídos urbanos próximo a antena receptora, que são denominadas como fator urbano.

Rappaport (2009) descreve que uma de suas limitações é o fato de o modelo não oferecer um meio de determinar correções. Alguns fatores são determinadas pelas questões ambientais nas vizinhanças imediatas do receptor, ou por considerar fatores de correção

para ponderar os efeitos dos prédios e da folhagem, além de que, caminhos múltiplos não são considerados.

2.6 MODO DE VARIABILIDADE

De acordo com Hufford, Longley e Kissick (1982), na predição de rádio frequência existem três dimensões para o conceito de variabilidade que é aplicada: *localização*, *tempo* e *situação*. Essas proporções são utilizadas para caracterizar a qualidade da recepção. Para tal fim, é necessário utilizar o quantil que é a percentagem de tempo que se pode esperar o sinal atingir um determinado nível.

- **Variabilidade de Tempo:**

Carvalho (2019) explica que essa grandeza possui características com as variadas formas, em que os sinais de rádio são atenuados num cenário ou situação definidos, numa localização determinada, durante um período prolongado de tempo. Pequenas variações devido à propagação multipercurso e similares são obviamente excluídos da estatística de variabilidade do tempo.

De acordo com Hufford, Longley e Kissick (1982, p. 29) “. . . Por este caminho por 95% do tempo a atenuação não ultrapassou 32,6 dB”;

- **Variabilidade de Localização:**

Diferente da primeira, este modo de variação tem a ver com a recepção do sinal com relação a localização. Por mais que o terreno seja estatisticamente análogo, podem haver diferenças, dependendo do terreno a porcentagem pode variar (CARVALHO, 2019).

Hufford, Longley e Kissick (1982, p. 30) complementa, “. . . Nessa situação, haverá de 70% dos locais de caminho onde a atenuação não superior a 32,56 dB para, pelo menos, 95% do tempo”. Um valor razoável é de 90%;

- **Variabilidade de Situação:**

Por fim, esta trata-se da variação do sinal com relação a “variáveis ocultas”, em outras palavras, as variáveis que não são reconhecidas, que permanecem após os parâmetros do sistema já definido, bem como os ambientais e os de emprego (CARVALHO, 2019).

De acordo com Hufford, Longley e Kissick (1982, p. 31) “. . . Em 90% dos casos como, haverá pelo menos 70% dos locais em que a atenuação não será, superior a 32,6 dB, pelos menos, 95% do tempo”. Ou seja, 30% quando há grande confiança na situação e 70% quando não há muita confiança com relação ao ambiente.

3 Metodologia

O projeto possui objetivo de apresentar uma solução de radiocomunicação, utilizando tecnologia LPWAN para implantação de uma *Smart Grid*. O seu desenvolvimento foi determinado em duas partes, a primeira é a realização da predição em software de aplicação apropriada para tal fim, a segunda diz respeito a análise do que foi obtido na primeira parte.

A tecnologia adotada para o ambiente de predições foi a LoRa, pois como descrito pela LoRa Alliance (2015b), essa possui capacidade de longo alcance, em que um único gateway ou estação base pode atender vários quilômetros ou até mesmo cidades inteiras, ousando cobrir países completos com uma quantidade mínima de infraestrutura. Destaca-se ainda que, com a topologia em estrela, a rede elimina processos de roteamento, fazendo com que os dispositivos finais sejam conectado diretamente ao(s) ponto(s) de acesso.

O software escolhido para análise da predição de cobertura foi o Radio Mobile, pois esse se aproveita do modelo de propagação Longley-Rice (descrito na Seção 2.5.1), além de ser uma aplicação de uso gratuito indicado ao radioamadorismo. Comumente, ele é utilizado para simulação de cobertura de ERB's ou repetidora (PINHEIRO, 2019).

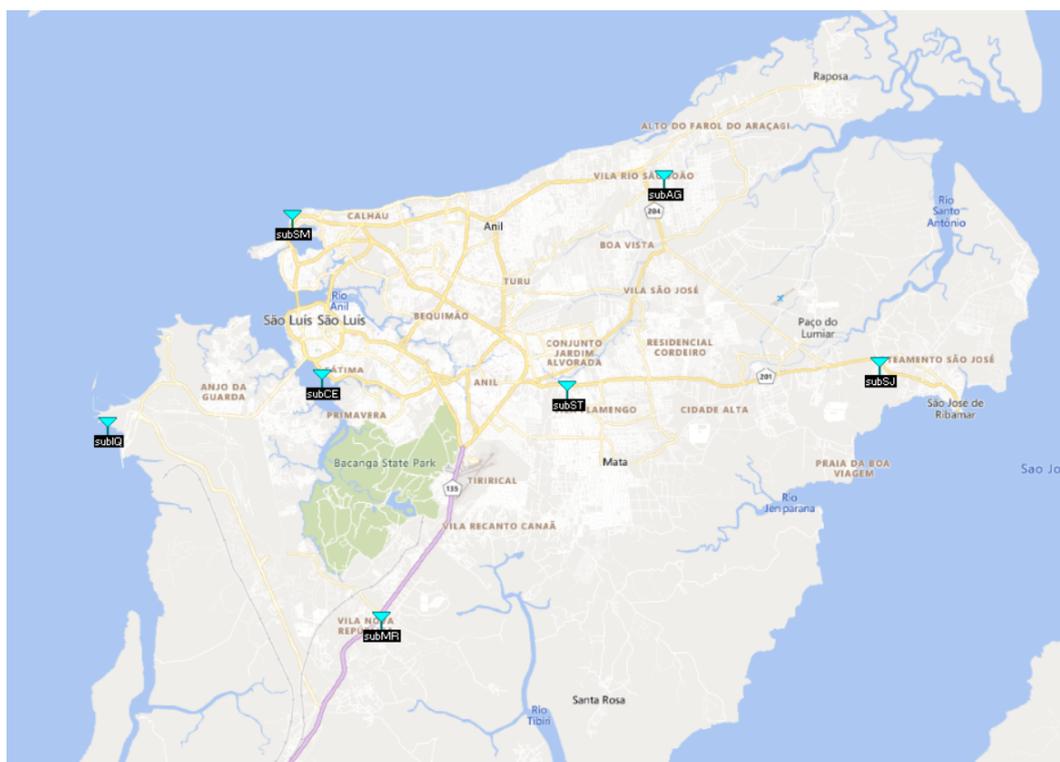
As localizações das Estações de Rádios Base (ERB's) foram escolhidas baseadas nas subestações de energia da concessionária Equatorial, localizada na ilha de São Luís - MA. As localizações são demonstradas na Tabela 3, na Figura 10 é apresentada a distribuição dessas por toda grande ilha.

Tabela 3 – Localização das subestações

ID	Subestação	Latitude(°)	Longitude(°)
subAG	Araçagi	-2.476311	-44.16513
subCE	Centro	-2.5517443	-44.2934986
subIQ	Itaqui	-2.569576	-44.3741685
subMR	Maracanã	-2.6434207	-44.2712797
subST	Santa Terezinha	-2.556275	-44.2016009
subSJ	São José de Ribamar	-2.5470152	-44.0843792
subSM	São Marcos	-2.4912842	-44.3048399

Fonte: Próprio Autor.

Figura 10 – Distribuição das subestações



Fonte: Próprio Autor.

A antena a ser utilizada é da fabricante Kerlink modelo Wirnet iStation, abaixo é descrito o *datasheet* do modelo supracitado:

Tabela 4 – *Datasheet* Wirnet iStation

Modelo	Faixa
Wirnet iStation	863/928 MHz
Parâmetros de entrada	
Potência de transmissão	27 dBm
Frequência mínima	863 MHz
Frequência máxima	928 MHz
Polariação	Vertical
Tipo de antena	Omnidirecional
Ganho da antena	2.6 dBi

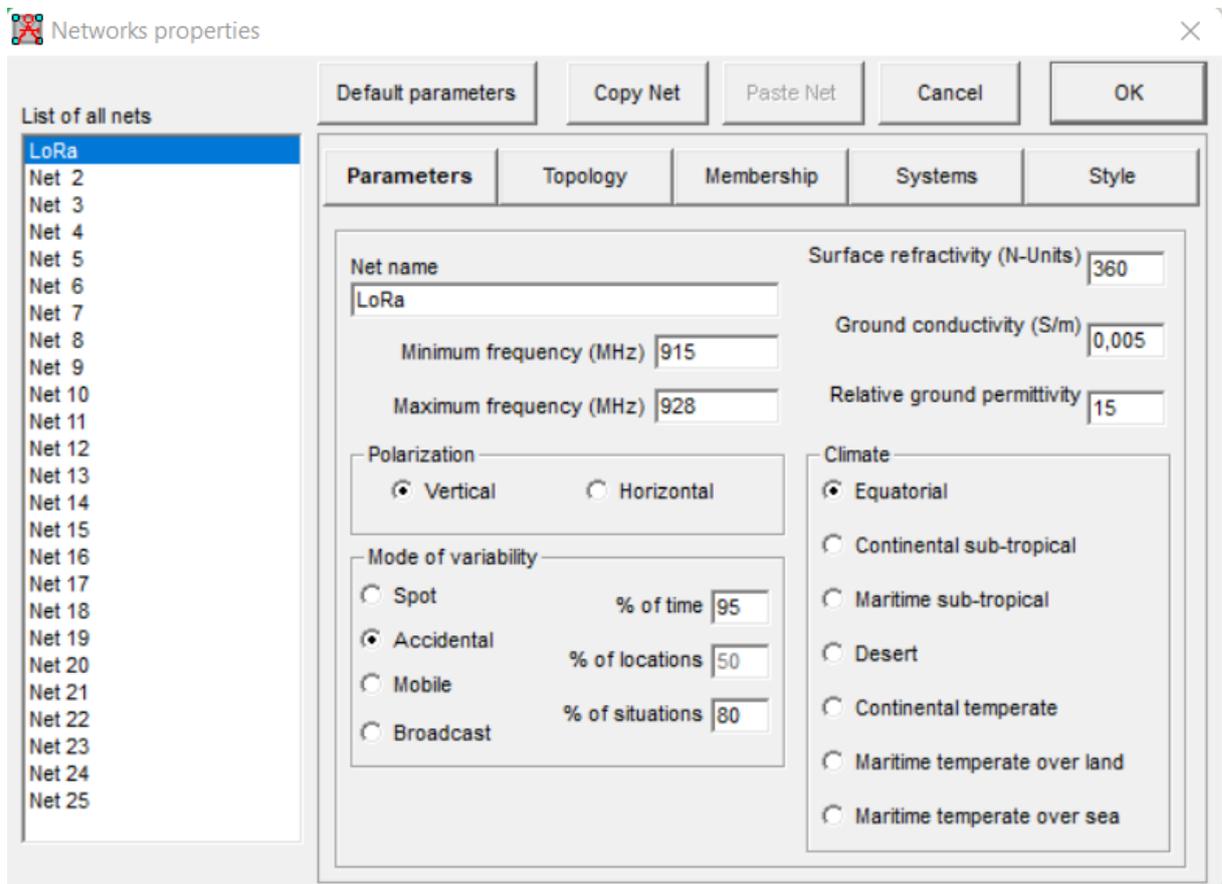
Fonte: Adaptado de Kerlink (2020).

4 Solução Proposta

No decorrer deste capítulo serão apresentadas as etapas de criação para a análise de cobertura no Rádio Mobile. Para essa simulação, é necessário configurar o Networks Properties (Propriedades da Rede) e preencher os seguintes campos: *Parameters* (Parâmetros), *Memberships* (Membros) e *Systems* (Sistemas).

Em *Parameters* são configurados as características da rede, como frequência máxima e mínima em MHz, polarização, modo de variabilidade, clima, refratividade da superfície, condutividade do solo e permissividade relativa do solo (ver Figura 11).

Figura 11 – Configuração dos parâmetros no Radio Mobile



Fonte: Próprio Autor.

O nome da rede foi escolhido como “*LoRa*”, range entre a frequência mínima e a máxima é descrita no datasheet Kerlink (2020) presenta na Tabela 4, no entanto, o datasheet descreve que o padrão usado no Brasil varia de 915 à 928 MHz, a polarização também se encontra na Tabela.

Os valores de refratividade próximos ao solo são representados por uma unidade

de N partes por milhão, adicionalmente, com o clima é possível estimar a atmosfera e sua variação no decorrer do tempo (PINHEIRO, 2019). Na Tabela 5, os valores de refratividade do solo por clima são mostrados e no Anexo A é apresentando a divisão global de refratividade.

Tabela 5 – Refratividade da superfície para cada tipo de clima

	N-Unidades
Equatorial (Congo)	360
Subtropical Continental (Sudão)	320
Subtropical Marítimo (Costa Leste da África)	370
Deserto (Saara)	280
Continental Temperado	301
Temperado Marítimo (Reino Unido e Costas Continentais Oestes)	320
Temperatura Marítima, sobre o mar	350

Para valores de atmosfera média, use o clima continental com $N = 301$ N-unidades

Fonte: Traduzido de Hufford, Longley e Kissick (1982).

As condições atmosféricas, como o clima, variam de acordo com as diferentes regiões do mundo, e, conseqüentemente, afetam o índice de refração do ar livre e desempenham um papel importante na determinação da força e das propriedades de desvanecimento dos sinais de rádio. Um exemplo, seria como o índice de refração do ar perto da superfície da terra determina a forma que um raio de rádio é dobrado ou refratado ao passar pela atmosfera (RADIO MOBILE, 2022a).

Tabela 6 – Constantes elétricas do solo

	Permissividade Relativa	Condutividade (siemens por metro)
Terreno médio	15	0,005
Terreno pobre	4	0,001
Terreno bom	25	0,020
Água fresca	81	0,010
Água do mar	81	5,000

Para a maioria das situações, use a constante para solo médio

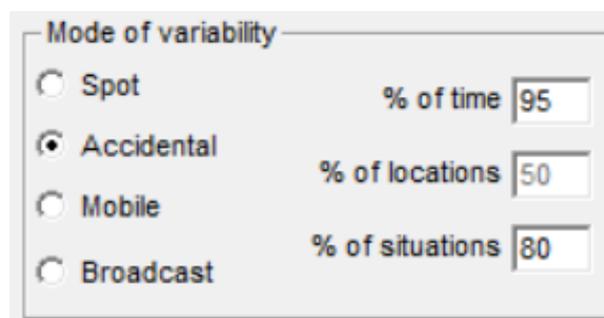
Fonte: Traduzido de Hufford, Longley e Kissick (1982).

A permissividade relativa e a condutividade do solo são pontuadas pela Tabela 6, acima.

Analisando ambas as Tabelas acima, bem como o mapa presente no Anexo A, foi determinada a refratividade da terra como 360 N. Já a permissividade relativa e condutividade como 15 e 0,005, respectivamente.

De acordo com a documentação do Radio Mobile (2022a), o modelo Longley-Rice estabelece quatro modos de variabilidade (ver Figura 12). A escolha de um modo determina o significado dos valores de confiabilidade e confiança usados na simulação. O modo de variabilidade pode ser considerado o “ponto de vista” para considerar o significado de “confiabilidade” e “confiança”.

Figura 12 – Modos de variabilidades



Mode of variability	Value
<input type="radio"/> Spot	% of time 95
<input checked="" type="radio"/> Accidental	% of locations 50
<input type="radio"/> Mobile	% of situations 80
<input type="radio"/> Broadcast	

Fonte: Próprio Autor.

- *Modo Spot* ou Modo de Mensagem Única, diz respeito apenas uma tentativa de mensagem ou comunicação;
- *Modo Accidental* ou Modo Individual, é sobre a avaliação de interferência;
- *Modo Mobile* ou Modo Móvel é para unidades que se movem durante a comunicação;
- *Modo Broadcast* ou Modo de Transmissão é para unidades estacionárias.

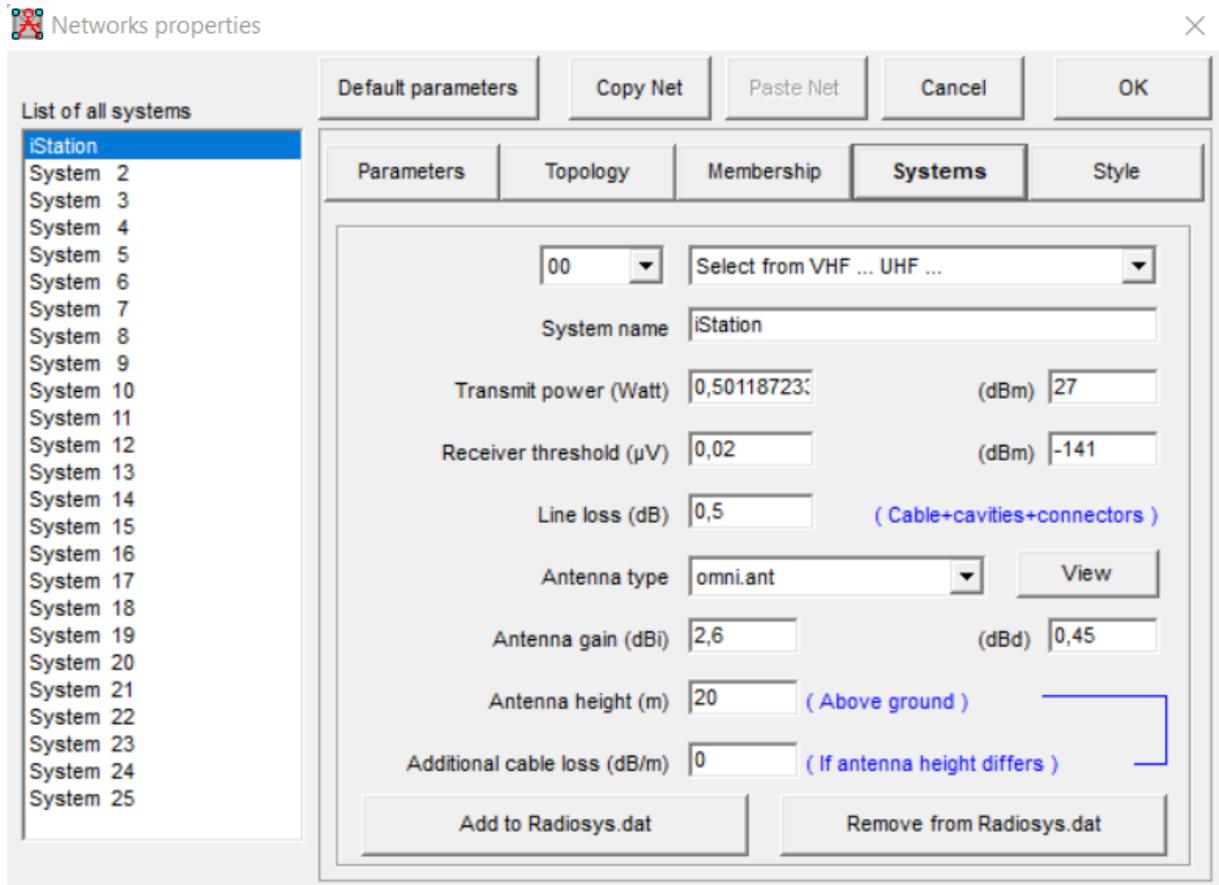
O modo de variabilidade escolhido foi o *Modo Accidental*. Como descrito por Carvalho (2019), esse modo aborda as estatísticas de interesse para um único receptor, como por exemplo, um rádio em uma casa, ou TV, ou um enlace de dados ponto a ponto. Confiabilidade, nesse caso, é simplesmente a variabilidade do tempo. A confiança é uma combinação de localização e situação.

Afirmando que, “em 80% das situações a atenuação não exceda o seu máximo, em pelo menos 95% do tempo”. Diante disso, “em 80% das situações” representa a medida de confiança, e “em pelo menos, 95% do tempo” é a medida de confiabilidade.

Em *Systems* são cadastradas as antenas que serão usadas para geração da área de cobertura, bem como suas características de funcionamento. As configurações como a potência, o ganho e tipo de antena, presentes na Figura 13, são retiradas do datasheet do equipamento (KERLINK, 2020) que será instalado.

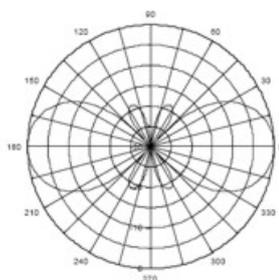
Foi dado o nome *iStation* para a configuração realizada, a altura das antenas foram colocadas a 20 m em relação ao solo e o seu tipo omnidirecionais.

Figura 13 – Configuração das características do rádio

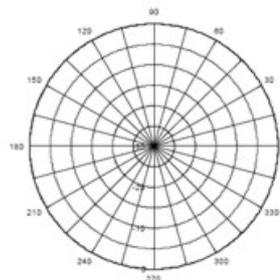


Fonte: Próprio Autor.

Figura 14 – (a) Irradiação vertical (b) Irradiação horizontal (c) Exemplo de antena



(a)



(b)



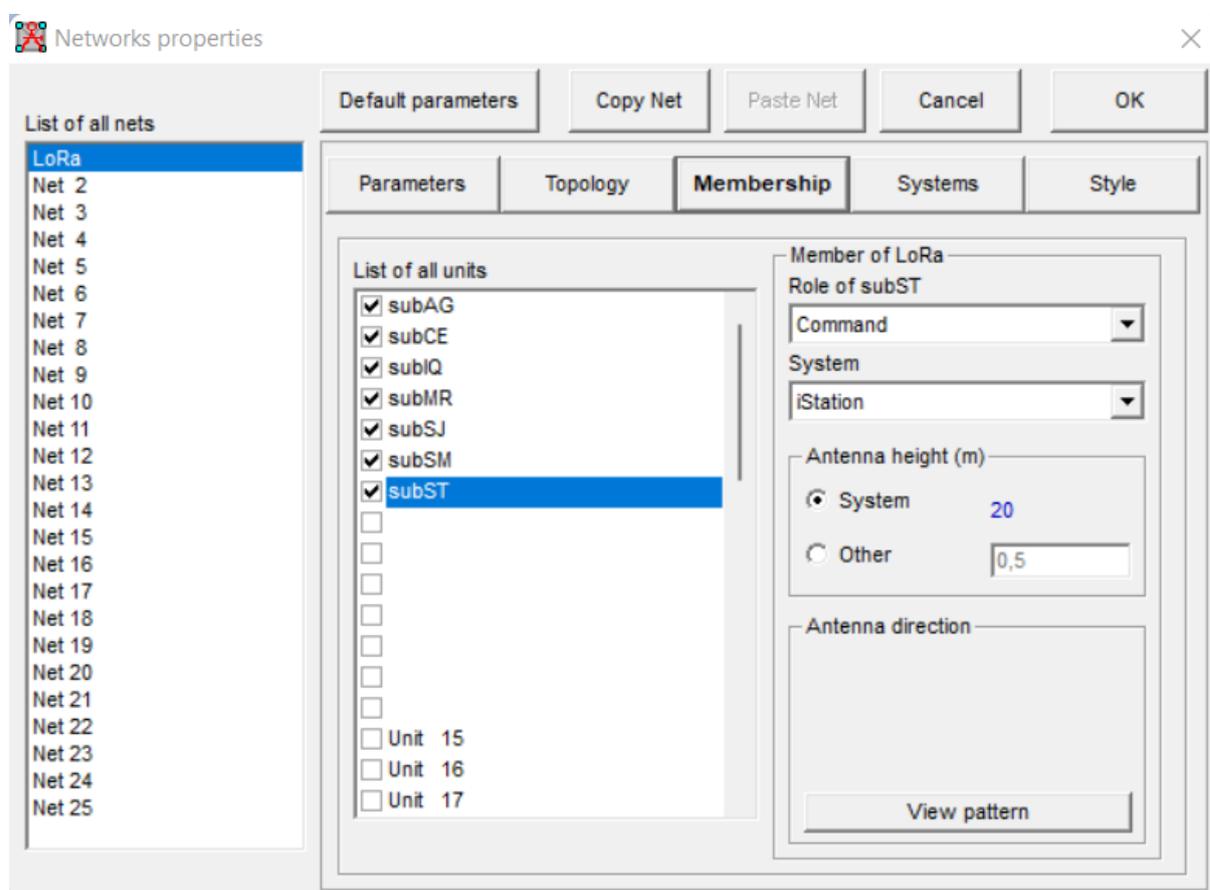
(c)

Fonte: Automações (2010).

As antenas omnidirecionais irradiam ou absorvem as ondas eletromagnéticas em todas as direções ao seu redor, com o mesmo ganho ou intensidade. Na Figura 14 (c) é apresentado um exemplo desse tipo. Verificando os diagramas de irradiação nas Figura 14 (a) e (b), é possível notar que a irradiação horizontal nem precisaria ser pontuada, já que é representada apenas uma circunferência (AUTOMAÇÕES, 2010).

Com a configuração das antenas em systems, é possível associá-las com os *Memberships* que correspondem às unidades que farão parte da rede, a localização dos membros pode ser colocada a partir da *Units Properties* (Unidades de Propriedades). Após a criação das unidades elas podem ser adicionadas à rede como membros, sendo associadas a um tipo de antena já pré-configurada.

Figura 15 – Adicionando os membros a rede



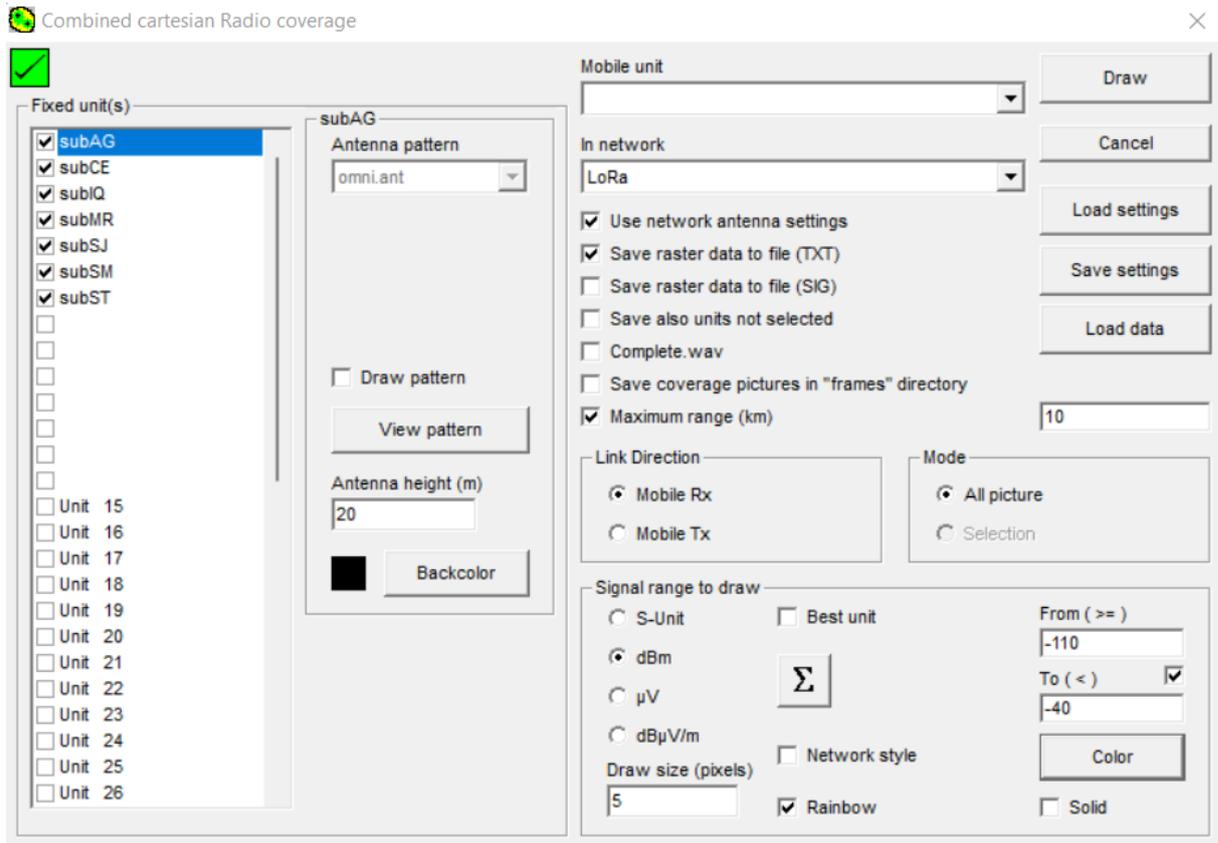
Fonte: Próprio Autor.

Pela Figura 15, é possível observar que foi adicionado todas as ERB's apresentadas na Tabela 3 dado no início desse capítulo. Além disso, para cada elemento da rede a configuração da antena adotada foi a “*iStation*” e sua altura foi deixada na já escolhida em *Systems*.

Depois das etapas de configurações da rede é, executado o processo de simulação da cobertura utilizando a ferramenta *Cartesian Radio Coverage* (ver Figura 16).

Com a configuração da janela na Figura 16, a cobertura cartesiana presente no mapa atual é coberta de acordo com pequenos pixels de tamanho variável. Nesse método, é possível um único site ou vários sites, serem usados para produzir uma cobertura única ou combinada com o melhor sinal disponível em cada posição no mapa.

Figura 16 – Configuração do Cartesian Radio Coverage



Fonte: Próprio Autor.

A rede escolhida foi a LoRA configurada nesse capítulo, com o range de cobertura de 10 *km*, e o arquivo raster de cobertura da rede será salvo em TXT para a realização de outra análise.

Os sites a serem analisados são selecionados em *Fixed unit(s)* e um site móvel colocado em *Mobile unit* é usado para cada pixel analisado. Foi selecionado as 7 ERB's já configuradas como unidades fixas. Como não teremos nenhuma unidade móvel optou-se por escolher uma unidade não configurada.

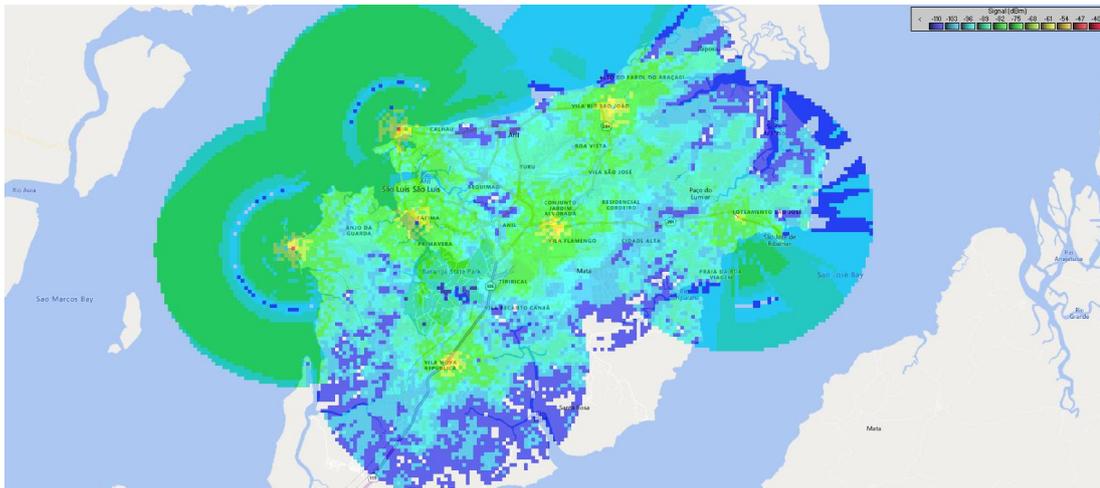
O plote de cobertura foi feito utilizando o modelo *Rainbow*, com tamanho de pixel 5, tendo a potência de recepção em dBm com range de -40 a -110 (ver Figura 16), configurando 12 cores para o mapa de energia.

5 Resultados e Discussões

Como já explicado pela Radio Mobile (2022b), a propagação de rádio frequência é a análise de como suas ondas transitam de um local transmissor para um receptor. Destaca-se que essa pode ser afetada pela elevação ou obstáculos que estejam no terreno (como árvores, edifícios ou outras elevações), além de que condições atmosféricas e outras situações relacionadas ao clima também prejudicam na qualidade do sinal.

A Figura 17 representa o resultado da simulação de cobertura descrita no Capítulo anterior. Pela imagem, observa-se que boa parte da área da grande ilha consegue ser atendida pelas 7 ERB's estabelecidas para simulação.

Figura 17 – Resultado da simulação para todas as ERB's da rede



Fonte: Próprio Autor.

A aplicação também permite obter a intensidade do sinal para cada coordenada geográfica por meio de um arquivo raster. Abaixo, é mostrado o cabeçalho do arquivo, em que se tem as 7 unidades fixas com suas respectivas localizações e com a altitude do local.

Figura 18 – Cabeçalho do arquivo raster gerado

1	Range	70,0dB	-110,0dBm			
2	Fixed unit	1	subAG	-02,47631	-044,16513	39,5
3	Fixed unit	2	subCE	-02,55174	-044,29350	0,0
4	Fixed unit	3	subIQ	-02,56958	-044,37416	16,3
5	Fixed unit	4	subMR	-02,64342	-044,27128	31,6
6	Fixed unit	5	subSJ	-02,54701	-044,08438	36,3
7	Fixed unit	6	subSM	-02,49128	-044,30484	9,1
8	Fixed unit	7	subST	-02,55627	-044,20160	36,0

Fonte: Próprio Autor.

Além disso, abaixo do cabeçalho é listado cada ponto do mapa, exibindo o R_x da melhor unidade para cada ponto específico (ver Figura 19). Durante o processo de predição haverá localidades nas quais as antenas estarão cobrindo uma área em comum, nesse caso o software irá escolher o maior R_x relativo e fixá-lo no raster (PINHEIRO, 2019).

Figura 19 – Corpo do arquivo raster gerado

```

1  \begin{lstlisting}[language=bash]
2  Latitude Longitude Rx(dB) Best unit
3  -02,41315 -044,34979 027,5 6
4  -02,41315 -044,22558 017,6 1
5  -02,47305 -044,21487 -002,6 0
6  -02,47305 -044,21273 005,7 7
7  -02,47733 -044,02856 001,5 5
8  -02,47947 -044,39262 027,6 6
9  -02,50514 -044,38406 029,5 3
10 -02,50514 -044,38192 029,5 0

```

Fonte: Próprio Autor.

Tendo conhecimento dessas informações, é possível gerar um mapa de cobertura sobre a ilha entre o intervalo estabelecido de $-110 < R_x < -40$. Na Figura 20 é apresentado o seguinte mapa, criado através do raster.

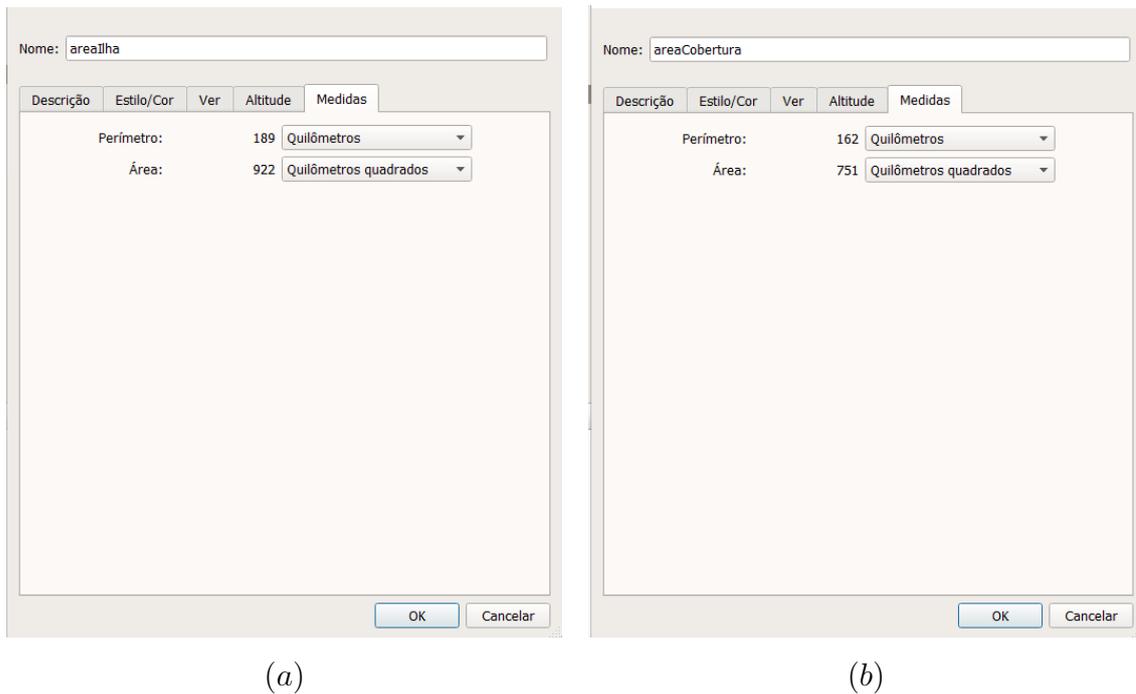
Figura 20 – Área de cobertura total



Fonte: Próprio Autor.

Sabendo a área total de toda a ilha de São Luís, bem como a área coberta com sinal de RF, mostradas nas Figuras 21 (a) e (b). Foi possível calcular o percentual de área coberta analisando os dois polígonos formados.

Figura 21 – (a) Área de toda a ilha (b) Área de cobertura



Fonte: Próprio Autor.

Pelo resultado, 81,45% da área dispõe de cobertura da rede em toda a ilha, isso tendo uma sensibilidade de até -110 dBm, que dia acordo com Carvalho (2019) é um nível aceitável para propagação. Por outro lado, cerca 18,55% representa o espaço que apresenta ausência de sinal.

Carvalho (2019) em sua tese de mestrado intitulada “*Solução de Comunicação sem Fio em Frequência SUB-GHZ Baseada em Tecnologia LPWA para IoT*”, obteve um total de 98,84% de área coberta utilizando 5 ERB’s distribuídas na cidade de São Luís - MA, isso por meio da tecnologia Wi-SUN, que é outro exemplo de LPWAN.

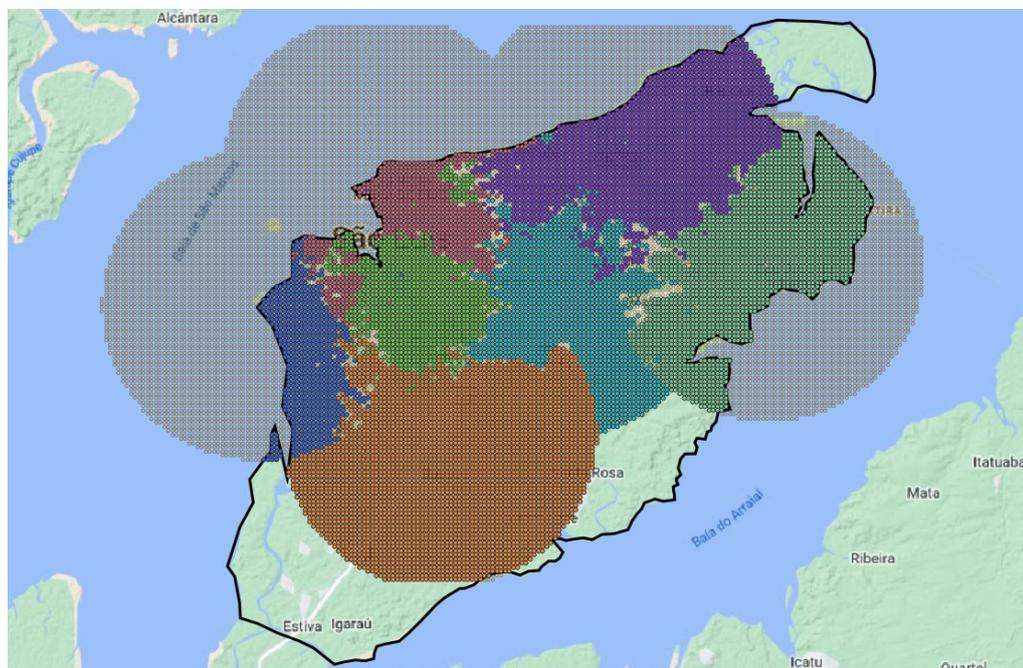
Não muito diferente desse, Pinheiro (2019) em seu trabalho “*Análise de cobertura de área geográfica a partir de dados disponibilizados por software de predição de cobertura de radiofrequência*”, chegou-se a um total de cerca de 98,70% de cobertura sobre o território de São Luís - MA, isso fazendo uso de 6 ERB’s dispostas pela cidade.

O que diferencia este trabalho dos demais citados acima é o fato de que a predição de cobertura está sendo feita para toda a ilha de São Luís - MA que apresenta uma área mais extensa. Além de que, as características das redes escolhidas podem favorecer um território mais vasto.

Outro dado interessante a ser destacado é apresentado na Figura 22, que mostra a área coberta classificada por ERB. Nota-se que as torres das subAG, subMR e subSJ são as que possuem maior cobertura com qualidade de sinal, o que pode ser explicado pela elevação do terreno onde as mesmas estão localizadas (ver Figura 18). Isso também

impacta nas ERB's subCE, subSM e subIQ, que estão dispostas em lugares com baixa elevação, apresentam assim, uma dificuldade na propagação RF.

Figura 22 – Área de cobertura classificado por ERB



Fonte: Próprio Autor.

5.1 ANÁLISE DE COBERTURA POR ERB'S

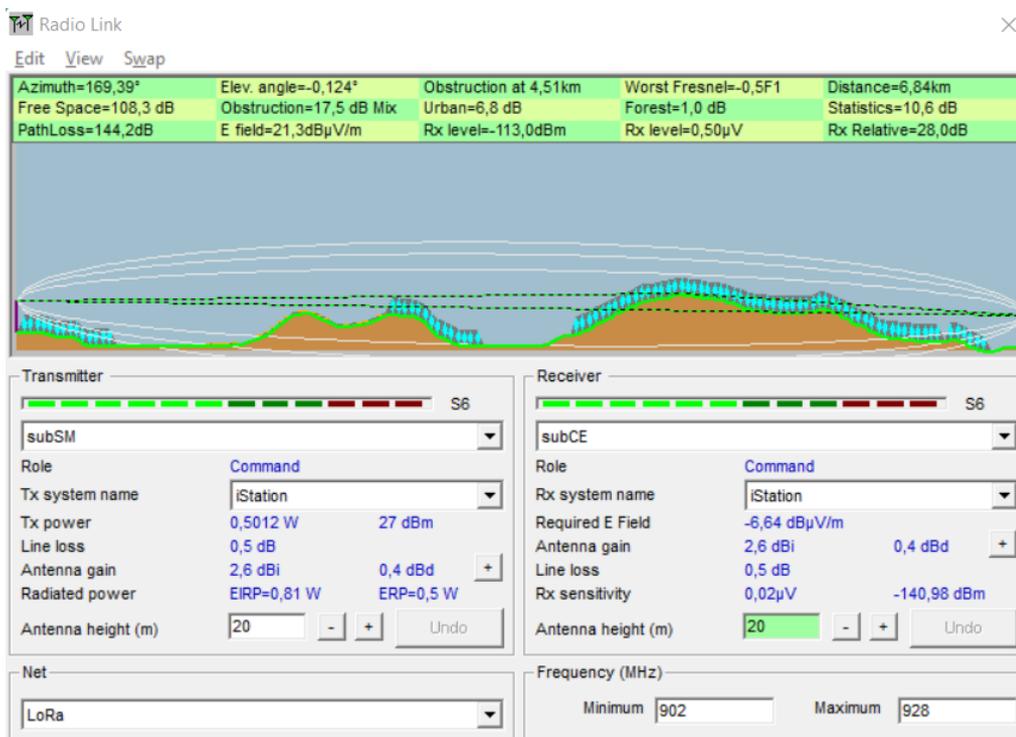
Primeiro, é válido ressaltar que como a tecnologia escolhida foi a LoRa. Seguindo os conceitos de seu funcionamento, as ERB's não devem se comunicar entre si, pois são apenas pontos de coleta de informações instalados para comunicar com a variedade de dispositivos que se encontram em sua área de cobertura.

Nas Figuras 23 e 24 são apresentados os links de comunicação entre as ERB's subCE - subSM e subAG - subSM, respectivamente.

A menor distância entre duas ERB's é de 6,84 Km, compartilhado entre a subCE e subSM, no entanto, elas possuem um dos piores caso de perdas na propagação, tendo um total de 144,2 dB (ver Tabela 7 e Figura 23). Tais perdas acontecem por questões no espaço livre, obstruções ou área de vegetação.

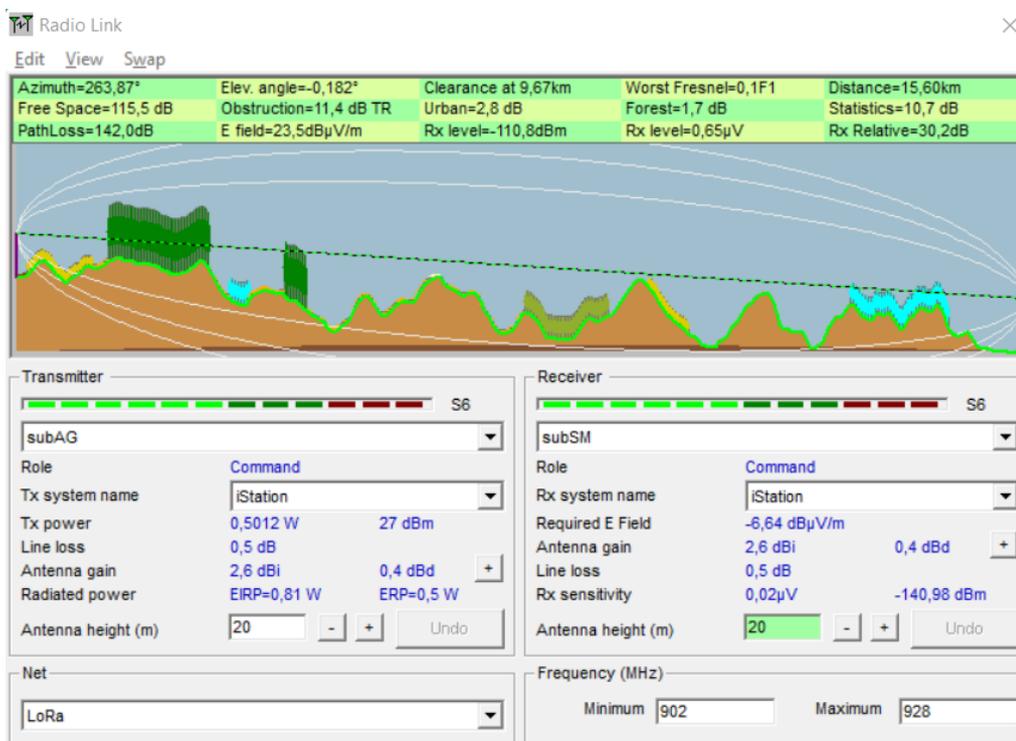
Pela Figura 23 é notório que a irregularidade do terreno entre esses dois pontos é o principal causador dessa perda, tendo a primeira zona de Fresnel totalmente obstruída. Por conta disso, grande parte dos dispositivos instalados não conseguirão se comunicar com as duas torres de forma redundante, além de que os encontrados entre a fenda, ocasionada pelas ondulações no terreno, teriam uma pobre comunicação ou nem possuiriam.

Figura 23 – Características de propagação entre a subSM e subCE



Fonte: Próprio Autor.

Figura 24 – Características de propagação entre a subAG e subSM



Fonte: Próprio Autor.

Por outro lado, a subAG e subSM são os pontos de comunicação que dispõem da maior distância, tendo 15,60 Km separando as duas torres. Seu pior caso de recepção é de 30,2 dB sobre o sinal necessário para atender a 95% do tempo em 80% das situações. O nível de recepção do sinal é -110,8 dBm, que de acordo com Pinheiro (2019) é um valor aceitável, levando em consideração a distância.

Na Tabela a seguir são apresentadas as características de propagação entre as ERB's que possuem área de cobertura em comum, como por exemplo a subCE que compartilha terreno de propagação com as subSM, subIQ, subMR e subST.

Tabela 7 – Características de comunicação entre as ERB's

Links de Comunicação	Distance(km)	PathLoss(dB)	Rx Level(dBm)	Rx Relative(dB)
subAG - subSJ	11,92	135,6	-104,4	36,6
subAG - subSM	15,60	142,0	-110,8	30,2
subAG - subST	9,76	126,5	-95,3	45,7
subCE - subIQ	9,17	142,6	-111,4	29,6
subCE - subMR	10,48	141,3	-110,1	30,9
subCE - subSM	6,84	144,2	-113,0	28,0
subCE - subST	10,21	142,0	-110,8	30,2
subIQ - subMR	14,06	146,6	-115,4	25,5
subIQ - subSM	11,62	136,8	-105,6	35,4
subMR - subST	12,39	143,7	-112,5	28,4
subST - subSJ	13,05	140,4	-109,2	31,8

Fonte: Próprio Autor.

Todas as informações apresentadas na Tabela acima são evidenciadas no Apêndice A, para mais conhecimento recomenda-se a sua visualização.

Uma boa ação a ser realizada é a adoção de pontos de redundância, como implantação de outras ERB's ou repetidoras próximas a essas que já foram simuladas, pois como já apresentado, o raio de cobertura para ambientes urbanos é de 10 Km. Logo, pela Tabela 7, não se terá redundância em 8 das situações caracterizadas, além de que, o ponto de maior vulnerabilidade estão nas ERB's localizadas nas bordas do campo geral de propagação que conseguem cobrir áreas que as demais dificilmente alcançariam.

6 Conclusão

Parte-se do ponto de que é inevitável o uso de IoT para implementar a Smart Grid. Por isso, é necessário o conhecimento de redes do gênero LPWAN, como as apresentadas NB-IoT, SigFox e LoRa, que possuem capacidade de longo alcance para baixo consumo de energia, além da facilidade para implementação.

Com o auxílio do Radio Mobile foi possível simular a predição de cobertura para 7 ERB's espalhadas por toda ilha de São Luís - MA. A partir disso, constatou-se que 81,45% desse território dispõem de cobertura para a rede LoRa, tecnologia escolhida para efetuar o estudo.

No entanto, características como a elevação e irregularidades do terreno fez com que todas as comunicações entre as ERB's possuísem grandes perdas na propagação, reafirmando que muitos dispositivos serão atendidos por apenas um ponto de comunicação. Uma solução seria a adoção de outras estações ou repetidoras em locais estratégicos, para atender caso venha a acontecer algum problema aos demais.

De forma geral, a proposta do trabalho foi atendida. Como mostrado, a adoção de uma tecnologia do segmento LPWAN consegue atender uma ampla área geográfica com poucos pontos de implantação, além de que o emprego de tecnologias como a LoRa, baseada em código aberto, oferece mais autonomia para atuação com a rede.

Para complementar esta pesquisa, uma sugestão de trabalho seria a elaboração desta simulação para outros tipos de rede de IoT, implementando com base em suas características de funcionamento e propagação, ou elaborar de forma física a toda a estrutura, implantando um ou mais gateways, bem como, os end-devices e o network server, para se comparar a simulação efetuada em software com o desempenho real.

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Projeto Estratégico: Programa Brasileiro de Rede Elétrica Inteligente*. Brasília - DF, 2010. 21 p. Disponível em: <<https://silo.tips/download/chamada-n-o-011-2010-projeto-estrategico-programa-brasileiro-de-rede-eletrica-in>>. Acesso em: 17 ago. 2022. Citado na página 15.
- AMIN, S. M.; WOLLENBERG, B. Em direção a uma rede inteligente: fornecimento de energia para o século 21. *IEEE Power and Energy Magazine*, v. 3, n. 5, p. 34–41, 2005. Citado na página 14.
- AUGUSTIN, A. et al. A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. *Sensors*, v. 16, n. 9, 2016. Citado 4 vezes nas páginas 20, 22, 23 e 24.
- AUTOMAÇÕES. *Redes Wireless: Conceitos Básicos IV*. 2010. Disponível em: <<https://automacoes.net/2010/03/23/redes-wireless-conceitos-basicos-iv/>>. Acesso em: 09 abr. 2023. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.
- CARVALHO, G. B. *Solução de Comunicação sem Fio em Frequência SUB-GHZ Baseada em Tecnologia LPWA para IoT*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Computação e Sistemas) — Universidade Estadual do Maranhão, São Luís - MA, 2019. Citado 9 vezes nas páginas 12, 17, 18, 19, 27, 28, 30, 35 e 41.
- CHAMBERLIN, K.; LUEBBERS, R. An evaluation of longley-rice and gtd propagation models. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. 30, n. 6, p. 1093–1098, 1982. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.
- COUDÉ, R. *Radio Mobile-RF propagation simulation software*. [S.l.: s.n.], 1988. Citado na página 24.
- CUNHA, M. P. da. *Análise e Caracterização da Cobertura LoRa® para Ambiente Indoor na Frequência de 915 MHz*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações) — Universidade Federal Fluminense, Niterói - RJ, 2021. Citado 6 vezes nas páginas 15, 16, 17, 20, 22 e 23.
- EMBARCADOS. *Introdução ao LPWAN (Low Power Wide Area Network)*. 2017. Disponível em: <<https://embarcados.com.br/introducao-ao-lpwan/>>. Acesso em: 18 mar. 2023. Citado na página 17.
- FALCÃO, D. M. Integração de Tecnologias para Viabilização da Smart Grid. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (SBSE). Belém - PA, 2010. Citado na página 14.
- FRACARI, F.; SANTOS, I. dos; SANCHEZ, G. Smart grid: uma nova forma de controle de Energia Elétrica. *Rev. de Empreendedorismo, Inovação e Tecnologia*, v. 2, n. 1, p. 15–22, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 15.
- GARCIA, P. S. R.; KLEINSCHMIDT, J. H. Tecnologias Emergentes de Conectividade na IoT: Estudo de redes LPWAN. In: XXXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE

TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS. São Pedro - SP, 2017. Citado 7 vezes nas páginas 15, 16, 17, 20, 21, 23 e 24.

HAYKIN, S.; MOHER, M. *Introdução aos sistemas de comunicação*. [S.l.]: Bookman, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.

HAYKIN, S.; MOHER, M. *Sistemas Modernos de Comunicação Wireless*. [S.l.]: Bookman, 2008. Citado na página 26.

HUFFORD, G. A.; LONGLEY, A. G.; KISSICK, W. A. A guide to the use of the its irregular terrain model in the area prediction mode. *U. S. Department of Commerce*, 1982. Citado 6 vezes nas páginas 27, 28, 29, 30, 34 e 50.

IBYTES. *Difração das ondas*. 2022. Disponível em: <<https://www.abytes.com.br/a-difracao-das-ondas-eletromagneticas-devido-a-obstaculos/>>. Acesso em: 01 abr. 2023. Citado na página 27.

INTERNET SOCIETY. *The Internet of Things: An Overview*. [S.l.], 2015. Disponível em: <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/48790442/ISOC-IoT-Overview-20151014_0-libre.pdf?1473746977=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DThe_Internet_of_Things_An_Overview_Under.pdf&Expires=1678286533&Signature=MzbpEbc~-q9zMXreg93vdFoF0B-fXBrWJcfQUSl2QOiRdA6qBFAMY2pTD7dJJRbcONXVSjMqyXD_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA>. Acesso em: 01 out. 2015. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 15.

KERLINK. *Wirnet iStation: Product description*. [S.l.], 2020. 39 p. Disponível em: <https://www.ime.de/shop/www.ime.de/produktdatenblaetter/A41831_2.pdf>. Acesso em: 08 abr. 2023. Citado 3 vezes nas páginas 32, 33 e 35.

LAMIN, H. *Medição eletrônica em baixa tensão: aspectos regulatórios e recomendações para implantação*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade de Brasília, Brasília - DF, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 12, 15 e 16.

LORA ALLIANCE. *LoRa[®] Specifications*. [S.l.], 2015. Disponível em: <<https://www.lora-alliance.org/portals/0/specs/LoRaWAN%20Specification%201R0.pdf>>. Acesso em: 16 abr. 2017. Citado na página 21.

LORA ALLIANCE. *LoRaWAN[™]: What is it?* [S.l.], 2015. Disponível em: <<https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/what-is-lorawan.pdf>>. Acesso em: 01 set. 2022. Citado 5 vezes nas páginas 20, 21, 22, 23 e 31.

LORA ALLIANCE. *RP002-1.0.3 LoRaWAN[®]: Regional Parameters*. [S.l.], 2021. 94 p. Disponível em: <<https://hz137b.p3cdn1.secureserver.net/wp-content/uploads/2021/05/RP002-1.0.3-FINAL-1.pdf?time=1687630688>>. Acesso em: 25 jun. 2023. Citado na página 21.

LORA ALLIANCE. *What is LoRaWAN[®] Specification*. 2022. Disponível em: <<https://lora-alliance.org/about-lorawan/>>. Acesso em: 26 ago. 2022. Citado na página 22.

MARGELIS, G. et al. Low Throughput Networks for the IoT: Lessons learned from industrial implementations. In: *2015 IEEE 2nd World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 181–186. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.

MEKKI, K. et al. Overview of cellular lpwan technologies for iot deployment: Sigfox, LoRaWAN, and NB-IoT. In: *2018 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 197–202. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. *Relatório: Smart Grid*. [S.l.], 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/energia-eletrica/relatorio-smart-grid-1/documentos/relatorio-smart-grid.pdf/@@download/file/RELAT%C3%93RIO%20SMART%20GRID.pdf>>. Acesso em: 12 ago. 2022. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 16.

MWAKWATA, C. B. et al. Narrowband Internet of Things (NB-IoT): From Physical (PHY) and Media Access Control (MAC) Layers Perspectives. *Sensors*, n. 11, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.

PINHEIRO, P. M. R. *ANÁLISE DE COBERTURA DE ÁREA GEOGRÁFICA A PARTIR DE DADOS DISPONIBILIZADOS POR SOFTWARE DE PREDIÇÃO DE COBERTURA DE RADIOFREQUÊNCIA*. Monografia (Engenharia da Computação) — Universidade Estadual do Maranhão, São Luís - MA, 2019. Citado 8 vezes nas páginas 12, 24, 29, 31, 34, 40, 41 e 44.

RADIO MOBILE. *ITM model propagation settings*. 2022. Disponível em: <http://radiomobile.pe1mew.nl/?Calculations___ITM_model_propagation_settings>. Acesso em: 09 abr. 2023. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.

RADIO MOBILE. *Radio propagation*. 2022. Disponível em: <http://radiomobile.pe1mew.nl/?Calculations___Propagation_calculation___Radio_propagation>. Acesso em: 10 abr. 2023. Citado na página 39.

RAPPAPORT, T. S. *Comunicação sem fio: Princípios e práticas*. [S.l.]: Prentice Hall, 2009. Citado na página 29.

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. Citado na página 12.

RIVERA, R.; ESPOSITO, A.; TEIXEIRA, I. S. Redes elétricas inteligentes (smart grid): oportunidade para adensamento produtivo e tecnológico local. *BNDS*, n. 40, p. 43–83, 2013. Citado na página 15.

SANCHEZ-IBORRA, R.; CANO, M.-D. State of the art in LPWAN Solutions for Industrial IoT Services. *Sensors*, v. 16, n. 5, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 19.

SEMTECH. *Lora® and LoraWAN®: A Technical Overview*. [S.l.], 2019. Disponível em: <https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa_and_LoRaWAN-A_Tech_Overview-Downloadable.pdf>. Acesso em: 02 set. 2022. Citado na página 23.

SEMTECH. *What Is LoRa®?* 2022. Disponível em: <<https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>>. Acesso em: 29 ago. 2022. Citado na página 20.

SILVA, R. M. L. *Características da Propagação Ponto-Área na Faixa de 2 a 15 GHz com Aplicação em Comunicações Móveis*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro - RJ, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.

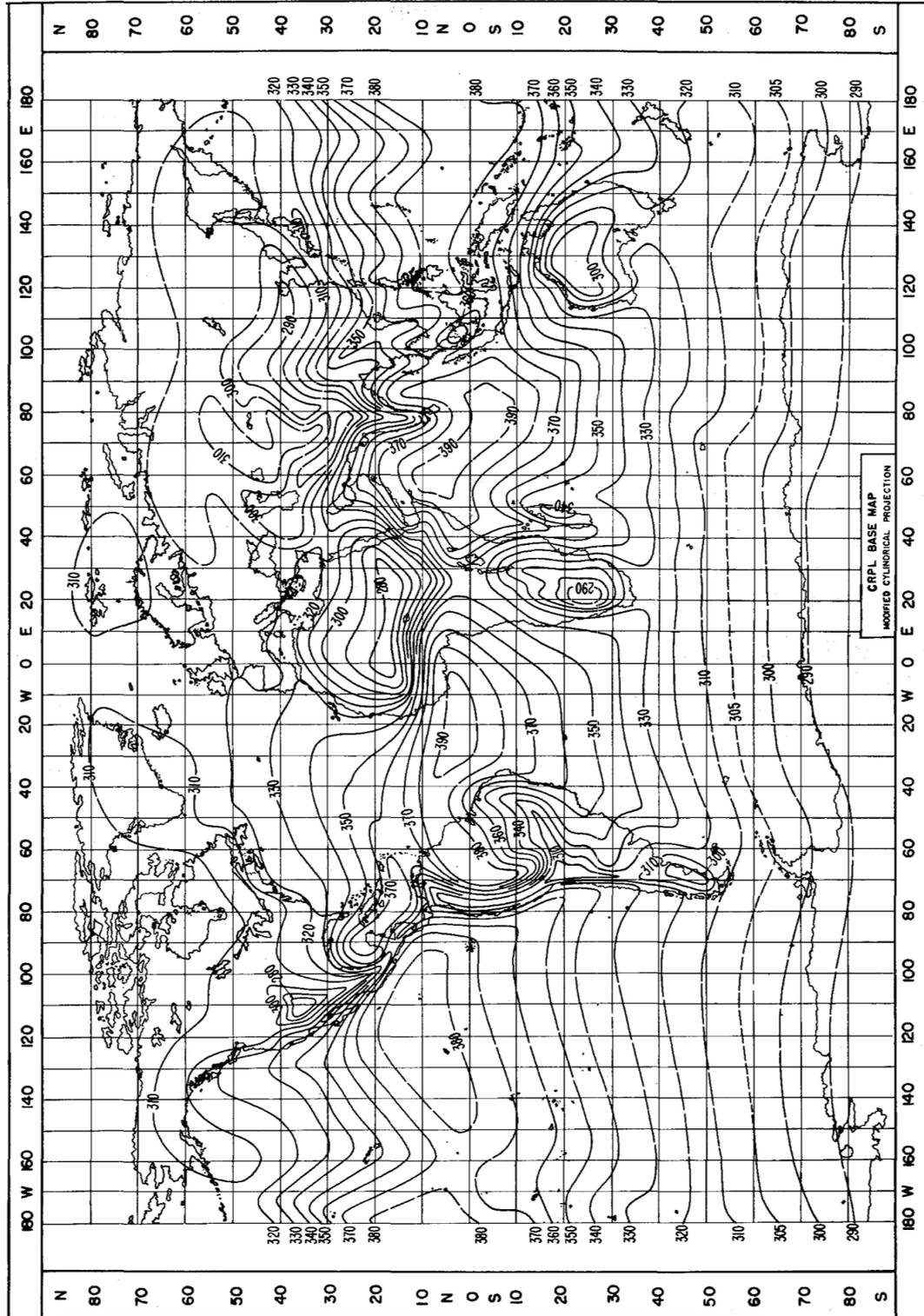
TEIXEIRA, G. B.; ALMEIDA, J. V. P. de. *Rede LoRa® e protocolo LoRaWAN® aplicados na agricultura de precisão no Brasil*. Monografia (Engenharia Elétrica) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa - PR, 2017. Citado 4 vezes nas páginas 20, 21, 22 e 23.

XU, J. et al. Narrowband Internet of Things: Evolutions, Technologies, and Open issues. *IEEE Internet of Things Journal*, v. 5, n. 3, p. 1449–1462, 2018. Citado na página 12.

ZAYAS, A. D.; MERINO, P. The 3GPP NB-IoT system architecture for the Internet of Things. In: *2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 277–282. Citado na página 17.

ANEXO A – Mapa de Refratividade

Figura 25 – Mapa de refratividade

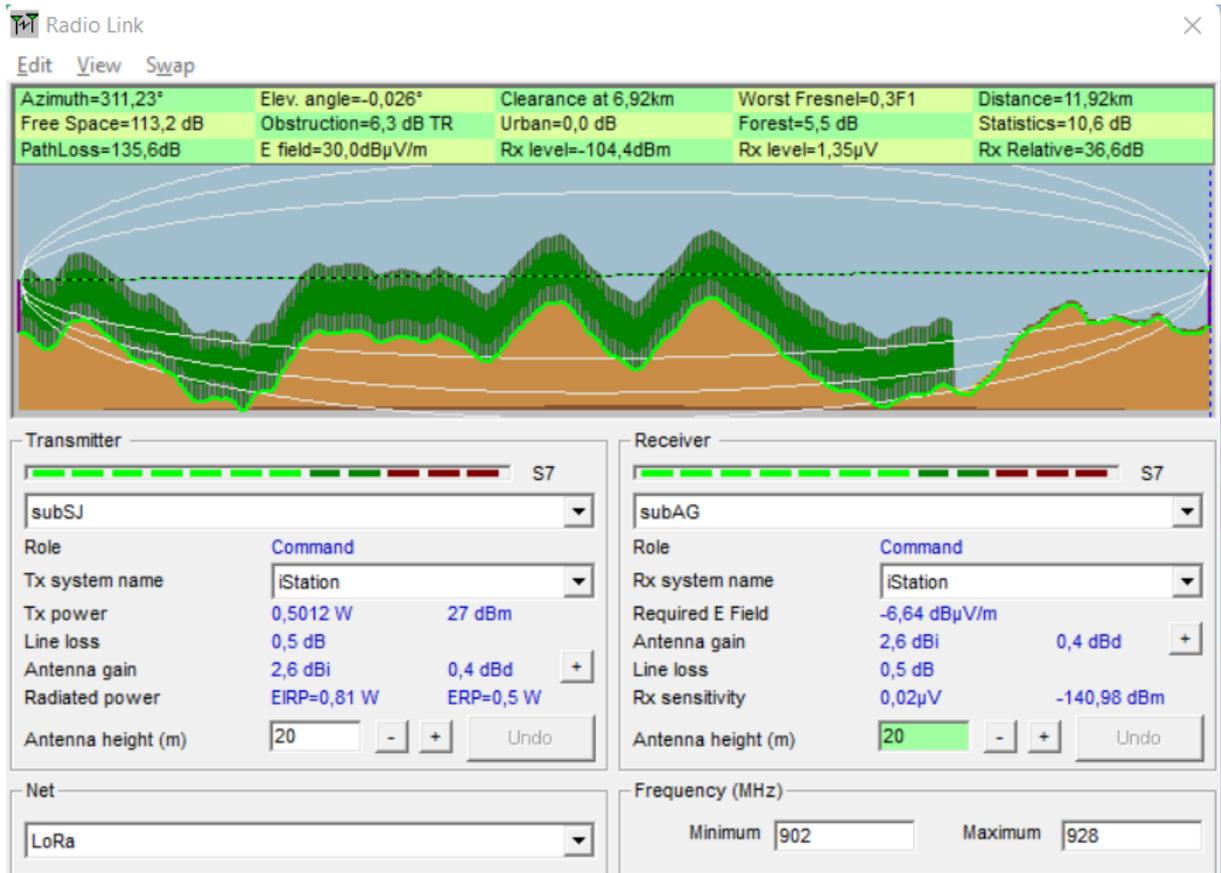


Fonte: Hufford, Longley e Kissick (1982)

Apêndices

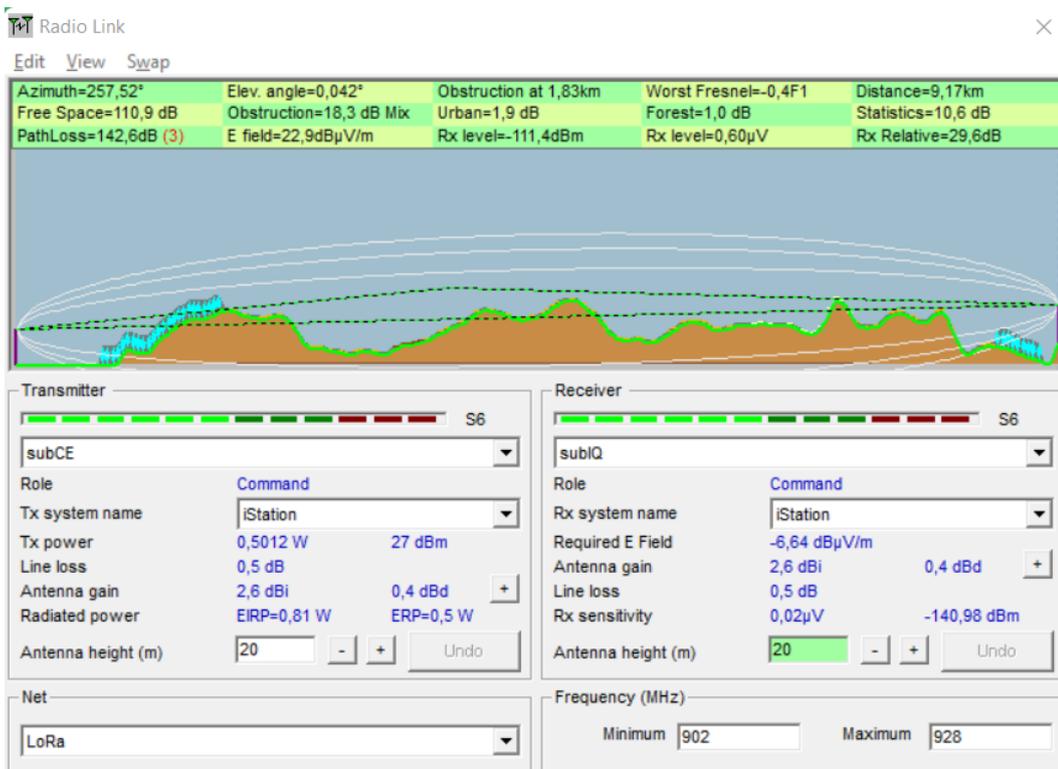
APÊNDICE A – Link de Comunicação Entre as ERB's

Figura 26 – Características de propagação entre a subSJ e subAG



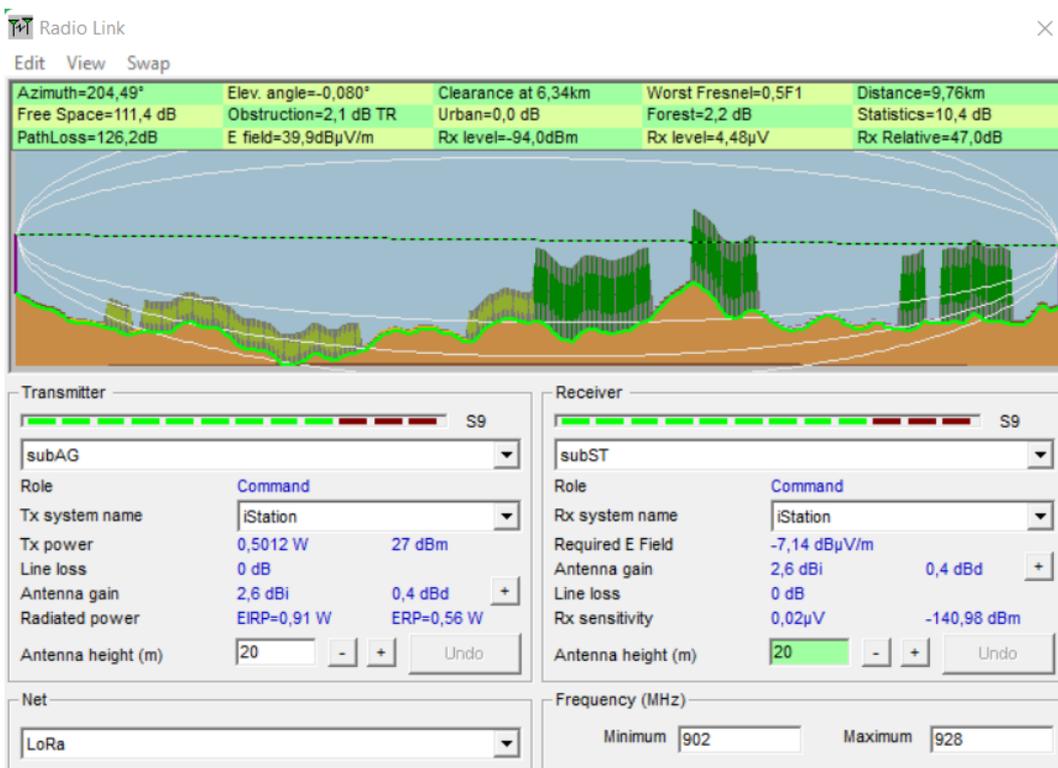
Fonte: Próprio Autor.

Figura 27 – Características de propagação entre a subCE e subIQ



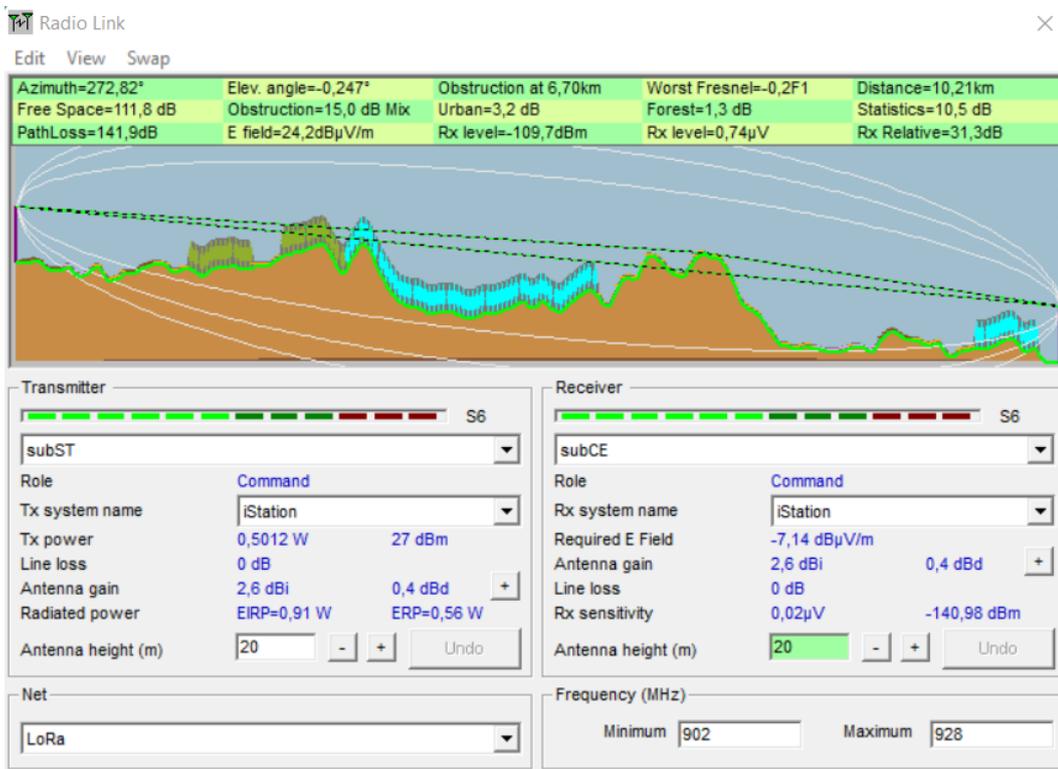
Fonte: Próprio Autor.

Figura 28 – Características de propagação entre a subAG e subST



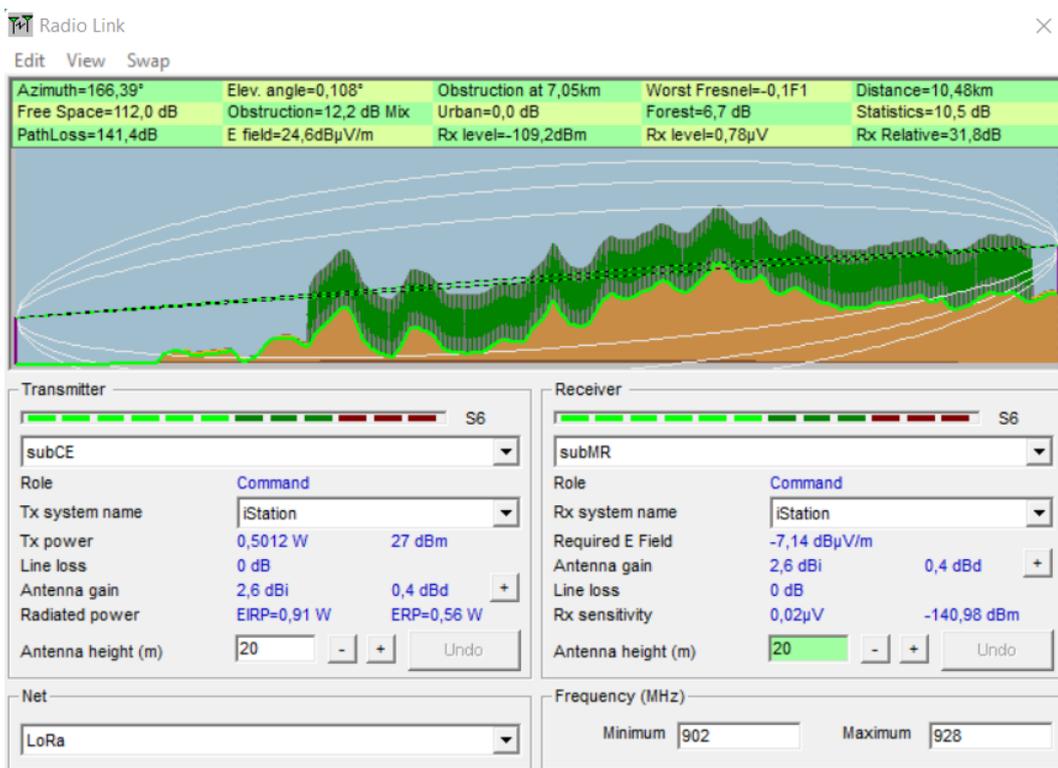
Fonte: Próprio Autor.

Figura 29 – Características de propagação entre a subST e subCE



Fonte: Próprio Autor.

Figura 30 – Características de propagação entre a subCE e subMR



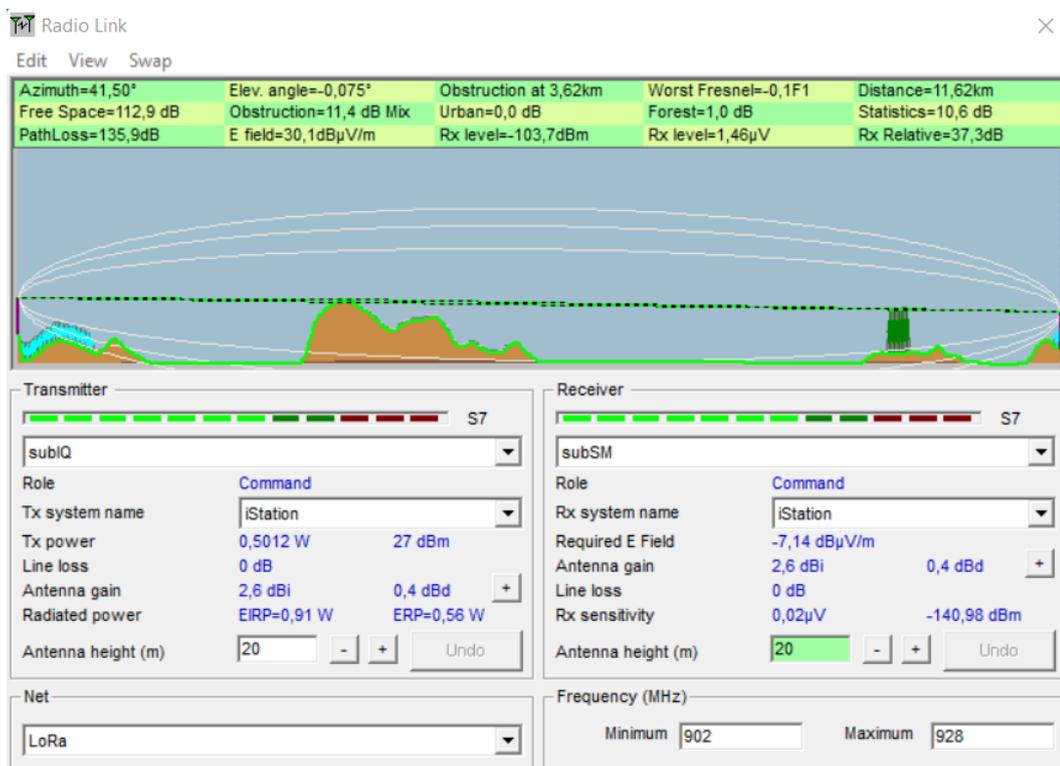
Fonte: Próprio Autor.

Figura 31 – Características de propagação entre a subIQ e subMR



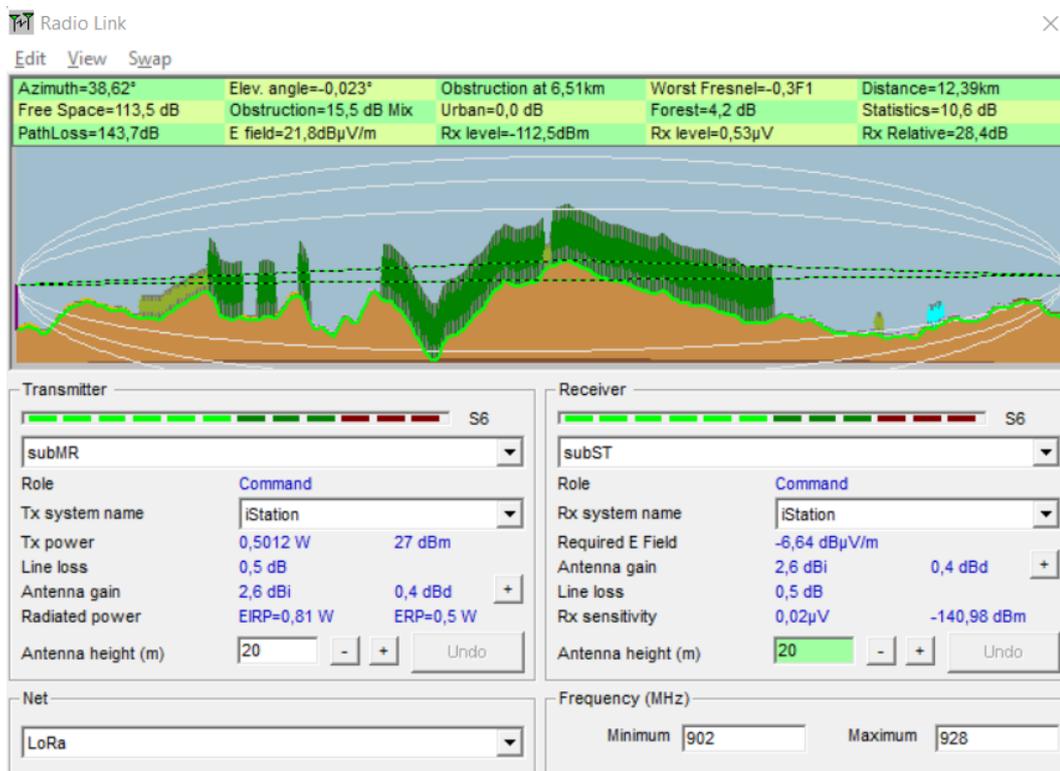
Fonte: Próprio Autor.

Figura 32 – Características de propagação entre a subIQ e subSM



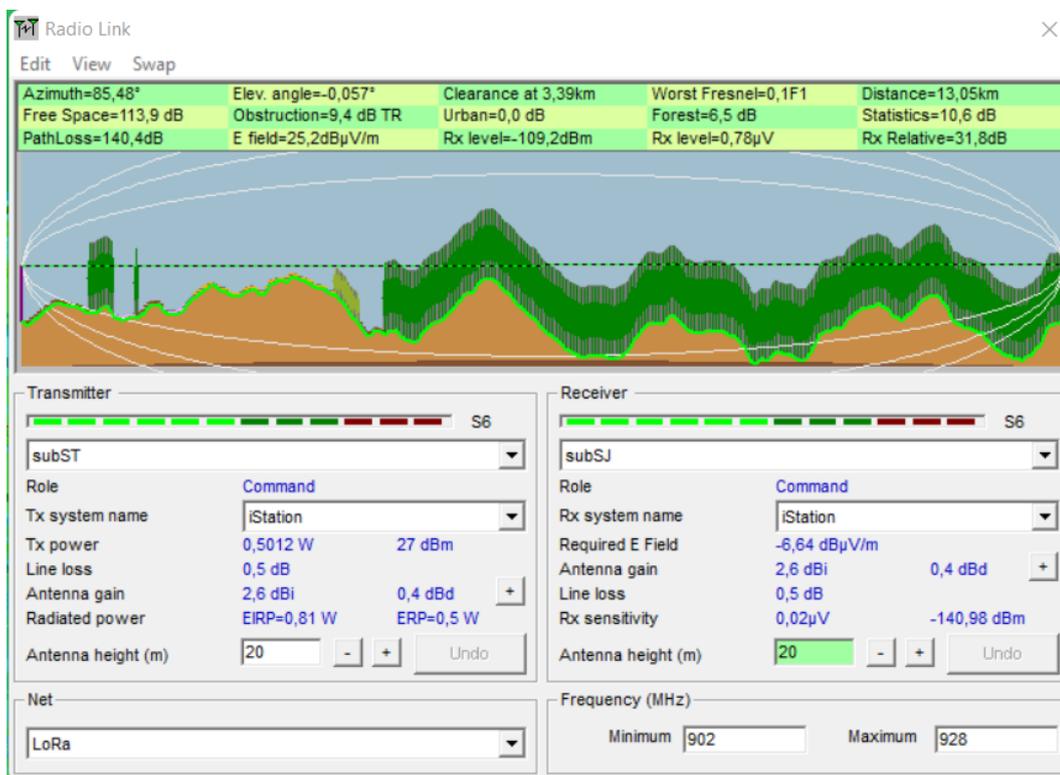
Fonte: Próprio Autor.

Figura 33 – Características de propagação entre a subMR e subST



Fonte: Próprio Autor.

Figura 34 – Características de propagação entre a subST e subSJ



Fonte: Próprio Autor.