

Giselle Braga Carvalho

**SOLUÇÃO DE COMUNICAÇÃO SEM FIO EM  
FREQUÊNCIA SUB-GHZ BASEADA EM  
TECNOLOGIA LPWA PARA IOT**

São Luís

2019

Giselle Braga Carvalho

**SOLUÇÃO DE COMUNICAÇÃO SEM FIO EM  
FREQUÊNCIA SUB-GHZ BASEADA EM TECNOLOGIA  
LPWA PARA IOT**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia da Computação e Sistemas na Universidade Estadual do Maranhão como requisito para a obtenção do título de mestre sob orientação do Prof.Dr. Carlos Henrique Rodrigues de Oliveira.

Universidade Estadual do Maranhão

Centro de Ciências Tecnológicas

Curso de Pós-graduação em Engenharia de Computação e Sistemas

Orientador: Prof Dr.Carlos Henrique Rodrigues de Oliveira

São Luís

2019

Carvalho, Giselle Braga.

Solução de comunicação sem fio em frequência sub-GHz baseada em LPWA para IoT / Giselle Braga Carvalho. – São Luís, 2019.

...79

Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Computação e Sistemas, Universidade Estadual do Maranhão, 2019.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Rodrigues de Oliveira.

1.Internet das coisas. 2.Cidades inteligentes. 3.LPWA. 4.Predição de cobertura. I.Título

CDU: 004.77

Giselle Braga Carvalho

# **SOLUÇÃO DE COMUNICAÇÃO SEM FIO EM FREQUÊNCIA SUB-GHZ BASEADA EM TECNOLOGIA LPWA PARA IOT**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia da Computação e Sistemas na Universidade Estadual do Maranhão como requisito para a obtenção do título de mestre sob orientação do Prof.Dr. Carlos Henrique Rodrigues de Oliveira.

Trabalho aprovado. São Luís, 29 de março de 2019:

---

**Prof Dr.Carlos Henrique Rodrigues de  
Oliveira**  
Orientador

---

**Prof Dr.Leonardo Henrique  
Gonsioroski Furtado da Silva**  
Convidado 1

---

**Prof Dr. Ivanildo Silva Abreu**  
Convidado 2

São Luís  
2019

*À todos aqueles que de alguma forma estiveram e estão próximos de mim,  
fazendo esta vida valer cada vez mais a pena.*

# Agradecimentos

Primeiramente a Deus por permitir que tudo isso acontecesse ao longo de minha vida, e não somente nestes anos como acadêmica, mas que em todos os momentos é o maior mestre que alguém pode conhecer.

Gostaria de deixar meu profundo agradecimento ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Henrique de Oliveira, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções, conselhos e incentivos durante esses anos no mestrado e na elaboração desta dissertação.

Ao meus pais e irmã, pelo amor, incentivo e apoio incondicional nos momentos mais difíceis.

Agradeço ao Denner, pelos conselhos e incentivo durante esse longo caminho.

Agradeço aos meus colegas de trabalho pela compreensão e a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigada.

*"O amor supera a justiça.  
Justiça é dar ao outro o que é dele,  
Amor é dar ao outro o que é meu."  
(Papa Bento XVI)*

# Resumo

Esse projeto desenvolveu uma solução de comunicação sem fio para operação sub-GHz na faixa de frequências licenciadas em 250 MHz baseada em tecnologia LPWA para internet das coisas aplicada nas cidades inteligentes utilizando simulações com ferramentas de predição de cobertura de RF conhecidas como Radio Mobile e CelPlanner e de rede de dados IPv6 conhecida como Packet Tracer e comprovou as viabilidades técnicas do compartilhamento de infraestrutura de comunicação em um ambiente multisserviços e multiusuários e da redução de elemento de rede de comunicação (estações rádio base) resultando na redução de despesas financeiras com CAPEX na implantação e OPEX na operação e manutenção da rede permitindo suporte a uma implantação real.

**Palavras-chave:** Internet das coisas; Cidades inteligentes; LPWA; Predição de cobertura.

# Abstract

*This project has developed a wireless communication solution for sub-GHz operation in the frequency band licensed in 250 MHz based on LPWA technology for the internet of things applied in smart cities using simulations with RF coverage prediction tools known as Radio Mobile and CelPlanner and IPv6 data network known as Packet Tracer and has proven the technical feasibility of sharing communication infrastructure in a multiservice and multiuser environment and the reduction of communication network element (base radio stations) resulting in the reduction of financial expenses with CAPEX in deployment and OPEX in the operation and maintenance of the network allowing support for a real deployment.*

**Keywords:** Internet of Things; Smart cities; LPWA; Prediction of coverage.

# Lista de figuras

Figura 1 – Crescimento da população mundial e a nova infraestrutura essencial. . .	17
Figura 2 – Arquitetura multicamada. . . . .	18
Figura 3 – Comparação de Tecnologias . . . . .	22
Figura 4 – Arquitetura de rede <i>Sigfox</i> . . . . .	24
Figura 5 – Arquitetura LoRa . . . . .	25
Figura 6 – Sistema de comunicação WI-SUN. . . . .	28
Figura 7 – Perfis Wi-SUN . . . . .	31
Figura 8 – Ondas Longitudinais. . . . .	38
Figura 9 – Ondas Sonoras . . . . .	38
Figura 10 – Propagação da onda sobre a morfologia . . . . .	39
Figura 11 – Zona de Fresnel. . . . .	39
Figura 12 – Difração considerando modelo e morfologia . . . . .	40
Figura 13 – Perda de propagação no Modelo <i>Korowajczuk</i> . . . . .	41
Figura 14 – Área de São Luís. . . . .	46
Figura 15 – Coordenadas geográficas das ERBs e <i>End Nodes</i> . . . . .	47
Figura 16 – Zona de Fresnel . . . . .	48
Figura 17 – Rede PMP . . . . .	52
Figura 18 – Modo de variabilidade para a rede PMP. . . . .	53
Figura 19 – Prâmetros de entrada para as ERBs. . . . .	53
Figura 20 – Parâmetros de entrada para a rede PMP. . . . .	54
Figura 21 – Enlace entre o AP2 e o Sem1. . . . .	54
Figura 22 – Resultado da predição de cobertura da rede ponto-multiponto com 5 ERBs no Radio Mobile. . . . .	55
Figura 23 – Resultado dos cálculos da área coberta . . . . .	55
Figura 24 – Rede mesh . . . . .	56
Figura 25 – Modo de variabilidade da rede mesh. . . . .	57
Figura 26 – Parâmetros ERBs da rede mesh . . . . .	58
Figura 27 – Parâmetros dos Ends Nodes da rede mesh. . . . .	59
Figura 28 – Mapa de cobertura para 10 km de raio em 250 MHz. . . . .	60
Figura 29 – Mapa de cobertura para 10 km de raio em 2,5 GHz. . . . .	60
Figura 30 – Antena em 250 MHz. . . . .	62
Figura 31 – Resultado dos cálculos da área coberta. . . . .	64
Figura 32 – Resultado da predição de cobertura da rede ponto-multiponto com 5 ERBs no Celplanner. . . . .	65
Figura 33 – Modelo de propagação . . . . .	66
Figura 34 – Topologia de Rede multisserviço . . . . .	68

Figura 35 – Configuração de IPv6 do religador. . . . .	69
Figura 36 – Configuração de IPv6 dos semáforos. . . . .	70
Figura 37 – Configuração de IPv6 das sirenes. . . . .	72
Figura 38 – Configuração IPv6 semáforo. . . . .	73
Figura 39 – Configuração IPv6 do servidor de monitoramento. . . . .	75
Figura 40 – Comunicação entre o <i>host</i> Semáforo e o servidor de monitoramento. . .	75

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros de frequência e modulação IEEE 802.15.4g. . . . .	29
Tabela 2 – <i>Datasheet</i> antena DIRV-90/5A. . . . .	49
Tabela 3 – <i>Datasheet</i> antena COLV-100/4E. . . . .	49
Tabela 4 – Parâmetros de entrada. . . . .	63
Tabela 5 – Parâmetros de entrada do cliente. . . . .	64
Tabela 6 – Configuração de VLANs. . . . .	69
Tabela 7 – Associação das vlans as portas de acesso e configuração da porta trunk	71
Tabela 8 – Configuração dos troncos em IPv6 no AP. . . . .	71
Tabela 9 – Configuração de roteamento no AP. . . . .	73
Tabela 10 – Configuração de VPN no Roteador CEMAR. . . . .	74

# Lista de abreviaturas e siglas

AMI	<i>Advanced Metering Infrastructure</i>
AP	<i>Access Point</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i>
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
CIDR	<i>Classless Inter-Domain Routing</i>
CSL	<i>Coordinated Sampled Listening</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
DBPSK	<i>Diferencial Binary Phase Shift Keying</i>
DHCP	<i>Dynamic Host Configuration Protocol</i>
DNS	<i>Domain Name System</i>
ERB	<i>Estação Rádio Base</i>
FAN	<i>Field Area Network</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
FSK	<i>Frequency Shift Keying</i>
GFSK	<i>Gaussian Frequency Shift Keying</i>
GMSK	<i>Gaussian Minimum Shift Keying</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HAN	<i>Home Area Network</i>
ICMPv6	<i>Internet Control Message Protocol Version 6</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IPv6	<i>Internet Protocol Version 6</i>

ITU	<i>International Telecommunications Union</i>
LLA	<i>Link Local Address</i>
LNA	<i>Low Noise Amplifier</i>
LoRAWAN	<i>Long Range Wide Area Network</i>
LPWA	<i>Low Power Wide Area</i>
LR-WPAN	<i>Low Rate Wireless Personal Area Network</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MAP	<i>Mesh Access Point</i>
M2M	<i>Machine to Machine</i>
MPL	<i>Maximum Path Loss</i>
MR-FSK	<i>Multi-Regional Frequency Shift Keying</i>
MR-OFDM	<i>Multi-Regional Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
MR-OQPSK	<i>Multi-Regional Offset Quadrature Phase Shift. Keying</i>
NAT	<i>Network Address Translation</i>
NDP	<i>Neighbor Discovery Protocol</i>
NTIA	<i>National Telecommunications and Information Administration</i>
NTP	<i>Network Time Protocol</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
OPEX	<i>Operational Expenditure</i>
OQPSK	<i>Offset Quadrature Phase-Shift Keying</i>
OSPFv3	<i>Open Shortest Path First version 3</i>
PHY	<i>Physical</i>
PMP	<i>Ponto-multiponto</i>
PSM	<i>Power Save Mode</i>
16-QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>

QPSK	<i>Quadrature Phase Shifting Keying</i>
RF	Rádio frequência
RFID	<i>Radio-Frequency Identification</i>
ROAS	<i>Router-on-a-Stick</i>
SDR	<i>Software-Defined Radio</i>
STA	<i>Station</i>
SUN	<i>Smart Utility Network</i>
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
UNB	<i>Ultra Narrow Band</i>
VLAN	<i>Virtual Local Area Network</i>
VPN	<i>Virtual Private Network</i>
WAN	<i>Wireless Area Network</i>
WG	<i>Working Group</i>
WMN	<i>Wireless Mesh Network</i>

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>18</b>
1.1.1	Objetivo Geral	18
1.1.2	Objetivos Específicos	19
<b>1.2</b>	<b>Metodologia</b>	<b>19</b>
<b>1.3</b>	<b>Justificativa</b>	<b>20</b>
<b>1.4</b>	<b>Aplicabilidade</b>	<b>20</b>
<b>1.5</b>	<b>Estrutura do Documento</b>	<b>20</b>
<b>2</b>	<b>TECNOLOGIAS LPWA (<i>LOW POWER WIDE AREA</i>)</b>	<b>21</b>
<b>2.1</b>	<b><i>SIGFOX</i></b>	<b>23</b>
<b>2.2</b>	<b>LORA</b>	<b>24</b>
<b>2.3</b>	<b>WI-SUN</b>	<b>26</b>
2.3.1	SISTEMA DE COMUNICAÇÃO WI-SUN	27
2.3.2	PRINCIPAIS PADRÕES PARA REALIZAR SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO WI-SUN	28
2.3.2.1	IEEE 802.15.4g	28
2.3.2.2	CAMADA FÍSICA	30
2.3.2.3	CAMADA MAC	30
2.3.3	IEEE 802.15.4e	31
2.3.4	PERFIS WI-SUN	31
<b>2.4</b>	<b>LTE-M (<i>Long Term Evolution</i>)</b>	<b>32</b>
<b>2.5</b>	<b>NB-IOT(<i>Narrow Band-IoT</i>)</b>	<b>33</b>
<b>2.6</b>	<b><i>WEIGHTLESS-SIG</i></b>	<b>33</b>
<b>3</b>	<b>IPV6</b>	<b>35</b>
<b>3.1</b>	<b>ENDEREÇAMENTO IPV6 E DHCPV6</b>	<b>35</b>
<b>4</b>	<b>MODELO DE PROPAGAÇÃO E PREDIÇÃO</b>	<b>37</b>
<b>4.1</b>	<b>MODELO DE <i>KOROWAJCZUK</i></b>	<b>37</b>
<b>4.2</b>	<b>MODELO COST-231</b>	<b>42</b>
<b>4.3</b>	<b>MODELO LEE</b>	<b>43</b>
<b>4.4</b>	<b>MODELO <i>LONGLEY-RICE</i></b>	<b>44</b>
<b>5</b>	<b>PROJETO</b>	<b>46</b>
<b>5.1</b>	<b>ZONA DE FRESNEL</b>	<b>47</b>

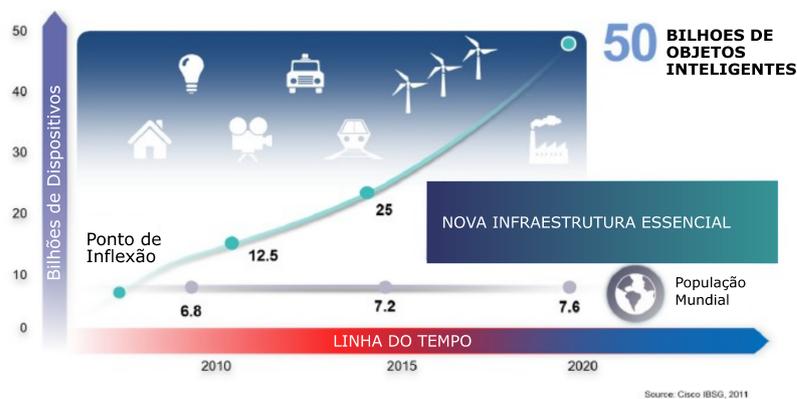
5.2	PREDIÇÃO DE COBERTURA . . . . .	48
5.3	MODO DE VARIABILIDADE . . . . .	49
6	<b>RADIO MOBILE</b> . . . . .	51
6.1	<b>REDE PONTO-MULTIPONTO</b> . . . . .	51
6.1.1	PREDIÇÃO DE COBERTURA PONTO-MULTIPONTO . . . . .	51
6.2	<b>REDE MESH</b> . . . . .	56
6.2.1	PREDIÇÃO DE COBERTURA REDE MESH . . . . .	56
6.2.2	PREDIÇÕES DE COBERTURA PONTO-MULTIPONTO EM 250 MHZ E 2,5 GHZ . . . . .	59
7	<b>CELPLANNER</b> . . . . .	61
7.1	<b>REDE PONTO-MULTIPONTO</b> . . . . .	61
8	<b>SIMULAÇÃO NO PACKET TRACER</b> . . . . .	67
9	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	76
10	<b>TRABALHOS FUTUROS</b> . . . . .	77
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	78

# 1 INTRODUÇÃO

A ideia principal da IoT (Internet of Things) é conectar vários dispositivos (carros, sensores inteligentes e etc) e pessoas à internet.

Segundo a Figura 1 de acordo com (EVANS, 2011), em 2020 quando a população mundial atingir 7,6 bilhões de pessoas, é estimado que 50 bilhões de dispositivos irão se conectar para transmitir dados úteis e informações de controle por meio de uma rede de sensores utilizando a nova infraestrutura essencial.

Figura 1 – Crescimento da população mundial e a nova infraestrutura essencial.



Fonte: Adaptado de Cisco Systems.

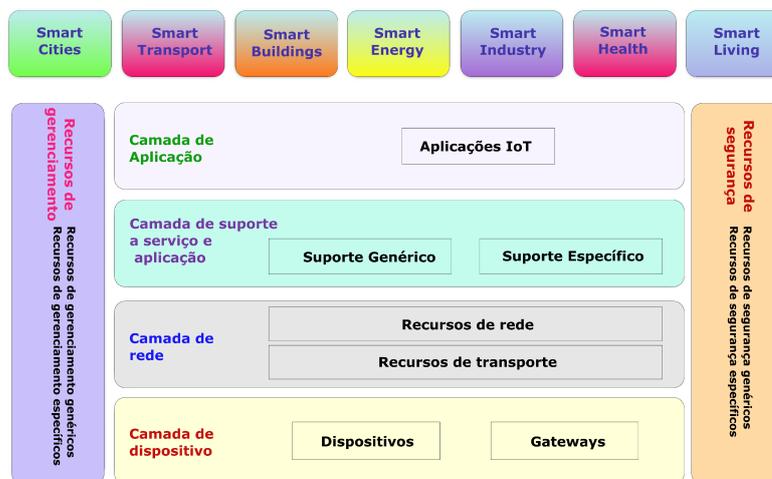
Conforme sugerido (SECTOR; ITU, 2012) na Figura 2, a infraestrutura essencial será construída em torno de uma arquitetura multicamada onde os dispositivos inteligentes serão utilizados para entregar diferentes serviços por meio de 4 camadas principais: camada de dispositivos, rede, suporte e aplicação.

A camada de dispositivos lida com dispositivos (RFIDs (*Radio-Frequency Identification*), sensores, atuadores e etc.) e *gateways* usados para coletar os dados dos sensores para processamentos adicionais enquanto a camada de rede oferece recursos necessários para o transporte e rede para rotear os dados para locais de processamento.

A camada de suporte é um *middleware* que tem a função de esconder a complexidade das camadas mais baixas para a camada de aplicação e fornece serviços genéricos e específicos, por exemplo, armazenamento de várias formas (gerenciamento de base de dados e/ou sistemas de computação em nuvem) e muito outros serviços como por exemplo, tradução.

Construir uma rede complexa conectando bilhões de dispositivos e pessoas em uma infraestrutura que utiliza diferentes tecnologias, protocolos e multiplataforma, a

Figura 2 – Arquitetura multicamada.



Fonte: ITU-T.

internet das coisas visa criar um mundo mais inteligente onde o físico, digital e virtual estão convergindo para criar um ambiente mais inteligente em várias áreas: energia, saúde, transporte, cidades e outras áreas do cotidiano. O avanço de tecnologias de comunicações sem fio tornou possível a implementação da IoT.

Devido essa evolução, surgiram as tecnologias LPWA (*Low Power Area*) ou LPWAN (*Low Power Area Network*), que segundo (XU et al., 2018), são adequadas para aplicações de Internet das Coisas, pois precisam transmitir apenas pequenas quantidades de informação em longo alcance através da rede.

A expectativa é conectar várias redes inteligentes permitindo o acesso à informação não só a qualquer momento e qualquer lugar, mas também usando qualquer dispositivo e qualquer pessoa, idealmente a partir de qualquer rede e serviço. Esse objetivo será conquistado usando objetos presentes no cotidiano que serão equipados com sensores de detecção, identificação e posicionamento com endereço IP para se tornarem inteligentes.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho foi o desenvolvimento de uma solução de rede de comunicação de dados em 250 MHz, uma faixa de frequência subGHz licenciada, para o escoamento de vários tipos de serviços de internet das coisas (IoT - *Internet of Things*) como, por exemplo, semáforos inteligentes, medição avançada de energia elétrica e assistência médica visando a redução de despesas financeiras como CAPEX (Capital Expenditure) e OPEX (Operational Expenditure) em futuras implantações de

infraestrutura de comunicação para o transporte de dados das cidades inteligentes por meio tanto da diminuição da quantidade necessária de Estações Rádio Base (ERBs) para cobrir uma determinada área geográfica como de uma estratégia de compartilhamento que permita o tráfego dos vários tipos de serviços de vários tipos de usuários como, por exemplo, concessionárias de energia, água e gás, prefeituras e hospitais em uma mesma rede de radiocomunicação de dados.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar um estudo aprofundado das tecnologias LPWA disponíveis no mercado de IoT e escolher a tecnologia que melhor se adequa em um estudo de caso com três tipos de serviços: redes elétricas inteligentes, *smart care* e controle de tráfego que são serviços essenciais em cidades inteligentes;

- Desenvolver uma solução de comunicação sem fio com abrangência multisserviços e multiusuários em 250 MHz baseada em tecnologias LPWA para internet das coisas;

- Desenvolver um projeto de predição de cobertura para redes de comunicação ponto-multiponto e multiponto-multiponto (*mesh*) utilizando as ferramentas de simulação e predição de cobertura *Celplanner* e *Radio Mobile*;

- Realizar emulação de tráfego de dados com IPv6 para três tipos de serviços utilizando a ferramenta de simulação *Cisco Packet Tracer*;

- Nortear futuras utilizações das ferramentas *Celplanner* e *Radio Mobile*.

## 1.2 Metodologia

A metodologia deste projeto consistiu na pesquisa de tecnologias LPWA incluindo: Wi-SUN, *Weightless*, LORAWAN, LTE-M (*Machine to Machine*) release 12. Feito todo o estudo bibliográfico através de artigos, *papers*, livros e padrões destas tecnologias, foi escolhida a tecnologia que se adequava melhor aos requisitos da topologia ponto-multiponto e a topologia *Mesh* para aplicações de cidades inteligentes. Foi feita a predição de cobertura utilizando o *software CelPlanner* para topologia ponto-multiponto em 250 MHz, como também foi calculado o dimensionamento de tráfego.

No *software Radio Mobile* foram executadas as predições de cobertura para as redes ponto-multiponto e *Mesh*. As duas predições foram adequadas à Resolução 555 da Anatel (Agência Nacional de Telecomunicações), que regulamenta o uso de radiofrequência na faixa de 255 a 275 MHz.

No ambiente de simulação *packet tracer* foi feita a segmentação de tráfego por tipo de serviço de diferentes empresas com *Virtual Local Area Network* (VLAN) utilizando

apenas uma infraestrutura de rede de forma compartilhada com segurança e sigilo da informação por meio de VPNs (*Virtual Private Networks*).

### 1.3 Justificativa

Com a crescente demanda de serviços e uma grande penetração no mercado de Internet das Coisas é necessário o estudo e conhecimento de novas tecnologias que possibilitem a viabilidade de mais aplicações em IoT. Essas novas tecnologias serão aplicadas no cotidiano e irão impactar na forma como as pessoas vivem e na tomada de decisões de empresas, pois essas tecnologias trarão evoluções na infraestrutura, permitindo conectividade entre dispositivos diferentes.

### 1.4 Aplicabilidade

Com o crescimento da população urbana, problemas de infraestrutura e de acesso limitado a recursos em diversas cidades ao redor mundo afetam negativamente a vida de bilhões de pessoas. Tornar as cidades mais inteligentes pode ajudar a melhorar os serviços urbanos aumentando a qualidade de vida de seus cidadãos. Esse projeto pode ser aplicado no planejamento e implantação de redes de comunicação sem fio para serviços de *internet* das coisas como *smart grid*, *smart care* e controle de tráfego urbano que são serviços essenciais em cidades inteligentes por diferentes empresas como *utility* (concessionária de energia), operadora de planos de saúde e órgão de governo responsável por controlar e regular o trânsito e prover mobilidade urbana.

### 1.5 Estrutura do Documento

Este relatório está estruturado da forma como segue. No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica. O Capítulo 3 apresenta considerações sobre endereçamento de rede IP. O Capítulo 4 apresenta um modelo de predição de cobertura. O Capítulo 5 apresenta considerações sobre o projeto de rede. O capítulo 6 aborda a ferramenta de predição de cobertura Radio Mobile. O capítulo 7 aborda a ferramenta de predição de cobertura CelPlanner. O capítulo 8 aborda a ferramenta de simulação de rede Packet Tracer. Finalmente no Capítulo 9 são apresentadas as conclusões deste trabalho.

## 2 TECNOLOGIAS LPWA (*Low Power Wide Area*)

Recentemente, as comunicações sem fio M2M (*Machine-to-Machine*) tem atraído muita atenção como uma tecnologia fundamental para internet das coisas. A medida que vários dispositivos se conectam a rede, haverá muitos tipos de estudos de casos de IoT. Quando um novo sistema é desenvolvido, técnicas de comunicações *wireless* apropriadas deveriam ser escolhidas de acordo com os seus requisitos. Em particular há uma crescente demanda de sistemas de IoT em redes WAN, como por exemplo, do inglês *Advanced metering infrastructure* ou infraestrutura de medição avançada (AMI), sensores de ambientes ou gerenciamento de cidades inteligentes.

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. Como também, do ponto de vista de sistemas persistentes, devem ter suporte a comunicação bidirecional para operar dispositivos remotamente.

LPWA é um termo genérico de um grupo de tecnologias que permitem comunicação de longo alcance com baixo custo e melhor consumo.

Segundo (TANEJA, 2016b), tecnologias LPWA são dispositivos de baixa potência, como dispositivos que podem durar vários anos com baterias, dispositivos com baixa taxa de transferência de dados e cobertura de longo alcance. As características de tecnologias LPWA são:

1) Super Cobertura: Para (KUU; CHANG; LEI, 2017), a distância de comunicação deve ter uma ampla cobertura para reduzir a quantidade de estações radio base em alguns tipos de aplicações.

O alcance máximo de cobertura pode variar dependendo da tecnologia escolhida, os requisitos de cobertura para NB-IoT, por exemplo. Segundo (XU et al., 2018) são perda máxima de percurso (MPL – *Maximum Path Loss*) de 164 dB enquanto satisfaz uma taxa de dados de pelo menos 160 bps na camada de aplicação, melhorando a cobertura interna em 20 dB em comparação com o padrão GPRS (*General Packet Radio Services*);

2) Baixo consumo de energia: Para (ANTEUR et al., 2015), dispositivos que

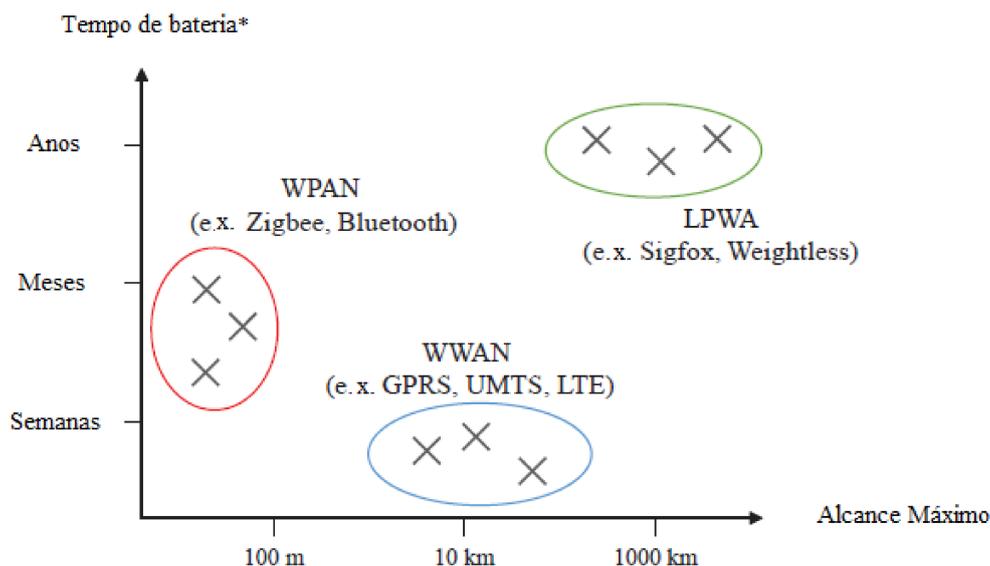
possuem este tipo de tecnologia devem ter autonomia muito longa (anos com uma única bateria AA). Manter a vida útil do dispositivo em estimados dez anos com capacidade de bateria de 5 Watt-horas e intervalo de 120 minutos mantendo o consumo de energia abaixo de 15 W uma vez que entre no estado PSM (*Power Save Mode*);

3) Baixo Custo: de acordo com (KUO; CHANG; LEI, 2017) muitos dispositivos podem não ser reutilizados no futuro, por este motivo o custo do módulo de comunicação deve ser muito baixo;

4) Várias Conexões: suportar a conexão de vários dispositivos de baixo rendimento dentro de um setor de uma célula de comunicação, onde o modelo de tráfego assume 40 dispositivos por casa ou 20 dispositivos por pessoa.

Comparando com aplicações tradicionais que precisam de acesso à internet de alta velocidade, as características do tipo de comunicação M2M são totalmente diferentes em termos de padrão de tráfego, sensibilidade a atraso e densidade. Os casos típicos geralmente contêm um grande número de dispositivos alimentados por bateria, que raramente transmitem ou recebem dados. Por esta razão, as tecnologias sem fio de curto alcance como *ZigBee*, RFID, Wi-Fi, *Bluetooth Low Energy* (BLE), 6LoWPAN, *WirelessHART* e *ZWave*, se tornaram inapropriadas uma vez que seu alcance para comunicação é de 10 a 100 metros. Em contraste, as redes LPWA são perfeitamente adequadas para aplicações de IoT que precisam transmitir pequenas quantidades de dados em grande alcance.

Figura 3 – Comparação de Tecnologias



\*Para 30 bytes por dia usando bateria AA

A Figura 3 faz uma comparação baseada em alcance de cobertura e duração de vida da bateria, entre as tecnologias *wireless* existentes e as tecnologias LPWA (ANTEUR et al., 2015). É possível perceber que as tecnologias LPWA conseguem cobrir grandes áreas devido ao longo alcance e a duração de bateria dos dispositivos tem um tempo de vida útil muito maior, quando comparado as outras tecnologias.

Nas próximas seções serão apresentadas as tecnologias existentes no mercado, dando ênfase a tecnologia WI-SUN, pois foi a tecnologia que se adequou aos requisitos de topologia do projeto.

## 2.1 SIGFOX

*Sigfox Network Operators* implementam estações rádio base (ERBs) equipadas com rádios definidos por software (SDR - *Software-Defined Radio*) que se conectam a servidores. Os *end nodes* se conectam a essas estações rádio base utilizando modulação BPSK, por exemplo bandas Sub-GHz com portadora *Ultra Narrow Band* (UNB).

O Sigfox utiliza 192 kHz da banda disponível para trocar mensagens pelo ar. A modulação é UNB (*Ultra Narrow Band*). Cada mensagem tem 100 Hz de largura e é transferida com uma taxa de dados de 100 ou 600 bps (bits por segundos), dependendo da região.

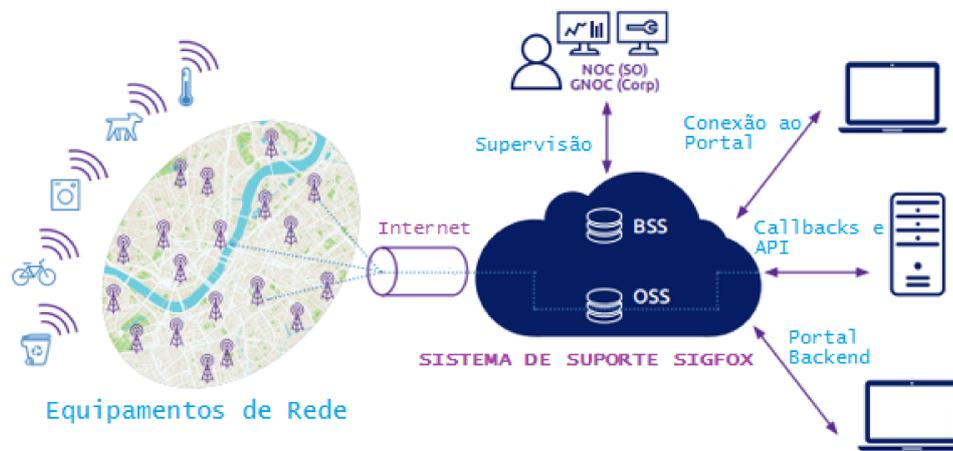
Por utilizar UNB, a largura de banda é utilizada de forma eficiente com um nível de ruído muito baixo, resultando em alta sensibilidade no receptor, baixo consumo e longo alcance. A banda usada depende da localização na Europa, por exemplo, a banda usada é entre 868 e 868,2 MHz; e em outros países, a banda usada é entre 902 e 928 MHz com restrições de acordo com as regulamentações vigentes em cada país e utiliza topologia em estrela.

O *Sigfox* projetou um protocolo de comunicação para pequenas mensagens. O tamanho da mensagem varia de 0 a 12 *bytes*, onde possui suporte para comunicação bidirecional com *link* assimétrico, de acordo com (MEKKI et al., 2019) a comunicação no *downlink* isto é, do sistema para o cliente só deve ocorrer seguida por uma transmissão no *uplink*.

No *uplink* há uma limitação de 140 mensagens por dia e o tamanho da mensagem pode variar de 6 a 12 bytes, enquanto no *downlink* há uma limitação no tamanho da mensagem de 8 bytes e o envio de até 4 mensagens por dia.

A Figura 4 mostra a arquitetura *Sigfox* que é dividida em duas camadas: a camada dos equipamentos de rede que consiste basicamente das estações rádio base e outros elementos, que são responsáveis por receber e enviar mensagem de/para o sistema de suporte *Sigfox*. A camada de serviços de suporte constitui o núcleo da rede encarregado de

Figura 4 – Arquitetura de rede Sigfox



Fonte: Adaptado de Sigfox Systems.

processar as mensagens e enviá-las através de *callbacks* para o sistema do cliente.

De acordo com (SIGFOX, 2017) esta camada fornece também o ponto de entrada para os diferentes atores (*Sigfox*, *Sigfox* operadores, canais e clientes finais) do cenário proposto na Figura 4 para interagir com o sistema através de interfaces web ou APIs. Nesta camada também estão inclusos módulos e recursos que são essenciais para garantir a implantação, a operação e o monitoramento da rede, como o *Business Support System*. Para pedidos e faturamento, o *Radio Planning* para apoiar a implantação da rede, o monitoramento para garantir a bom funcionamento da rede. Além disso, essa camada inclui repositório e ferramentas para analisar os dados coletados ou gerados pela rede.

A Figura 4, mostra que a comunicação entre a camada dos equipamentos de rede e a camada de suporte é protegido por uma conexão VPN (*Virtual Private Network*).

## 2.2 LORA

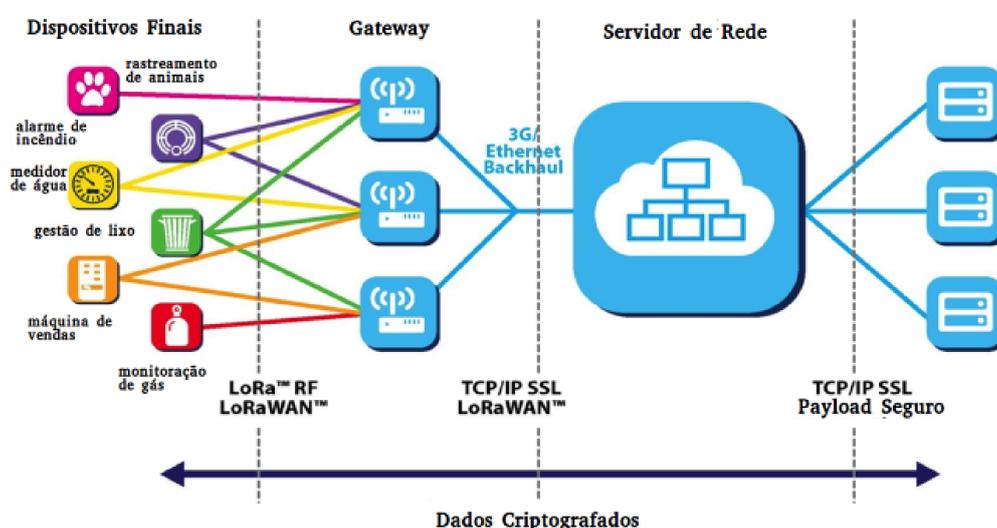
O LORa é uma tecnologia de camada física que modula os sinais na banda do SUB-GHZ ISM usando uma técnica proprietária de espalhamento espectral desenvolvida e comercializada pela *Semtech Corporation*. Uma comunicação bidirecional é dada por uma técnica especial de espalhamento espectral, que distribui um sinal de entrada de banda estreita por uma largura de banda de canal mais ampla. O sinal resultante tem propriedades semelhantes a ruído, dificultando a detecção ou a obstrução. O ganho de processamento permite resiliência à interferência e ruído. Utiliza topologia estrela ou ponto-multiponto, conforme mostrado na Figura 5. Opera nas faixas de 1 sub-GHz, utiliza as bandas de 868 MHz na Europa, 915 MHz na América do Norte e 433 MHz na Ásia. As redes *LoRaWAN* utilizam canais com largura de banda de 125 kHz, 250 kHz ou 500 kHz,

dependendo da região ou plano de frequência.

De acordo com (MEKKI et al., 2019) LoRa utiliza seis fatores de espalhamento (SF7 a SF12) para adaptar a taxa de dados o intervalo de *tradeoff*. Quanto maior o fator de espalhamento maior é o alcance de cobertura ao custo de uma taxa de dados menor. A taxa de dados varia de 300 bps a 50 kbps dependendo do fator de espalhamento e da largura do canal. O tamanho máximo do *payload* para cada mensagem é 243 bytes.

Segundo (PHAM, 2016) o LoRaWAN funciona com um modelo livre de taxas de assinatura, livre de operador, simplificando e barateando gestão da infraestrutura e ajuda no apoio a uma implantação simples e imediata.

Figura 5 – Arquitetura LoRa



Fonte: Adaptado de *LoRa Alliance*.

A Figura 5 mostra a arquitetura do sistema LoRa que é composto pelos módulos de sensores LoRaWAN (*end nodes*) baseado na modulação CSS (*Chirp Spread Spectrum*), que mantém as mesmas características da modulação FSK, como baixa potência que melhora significativamente o alcance da comunicação sem fio. Segundo (ALLIANCE, 2017a) existem três classes de sensores:

- Classe A: dispositivos finais da Classe A permitem comunicações bidirecionais, em que a transmissão de *uplink* de cada dispositivo final é seguida por duas janelas curtas de recebimento de *downlink*. Esses dispositivos tem o menor consumo de energia para aplicações que exigem apenas comunicação de *downlink* do servidor logo após o dispositivo final ter enviado uma transmissão de *uplink*.
- Classe B: dispositivos de classe B, permitem mais *slots* de recebimento, além das janelas de recebimento aleatório de Classe A, os dispositivos de Classe

B abrem janelas de recebimento extra em horários programados. Para que o dispositivo final abra a janela de recebimento no horário agendado, ele recebe um *beacon* sincronizado *gateway*. Isso permite que o servidor saiba quando o dispositivo final está escutando.

- Classe C: dispositivos finais da Classe C tem quase continuamente abertas janelas de recepção, fechadas somente durante a transmissão. O dispositivo final Classe C usará mais energia para operar do que a Classe A ou Classe B, mas eles oferecem a menor latência para a comunicação do servidor com o dispositivo final.

Os concentradores ou *gateways* LoRaWAN na especificação do protocolo, segundo (KUO; CHANG; LEI, 2017) são usados para receber dados de rádio do módulo do sensor LoRaWAN e, em seguida, transferir os dados via rádio para o servidor de rede. A topologia de rede entre o *gateway* e os sensores é a topologia de rede em estrela. Isso significa que um dado de sensor pode ser recebido de mais de um concentrador se estiver no alcance do rádio.

O Servidor de rede LoRaWAN é o componente principal no protocolo LoRaWAN que de acordo com (KUO; CHANG; LEI, 2017) o servidor de rede gerencia *gateways*, sensores, agenda dados de *downlink* para cada dispositivo e dá suporte ao servidor de aplicações por meio de API. E por fim, o servidor de aplicação LoRaWAN que solicita dados dos sensores de vários tipos para integrar as informações no campo de aplicação.

## 2.3 WI-SUN

O padrão foi publicado em Abril de 2012, o IEEE 802.15.4g especifica camadas físicas alternativas otimizadas para aplicações na SUN (*Smart Utility Networks*). Um total de três camadas físicas são definidas sob o controle de uma camada de acesso (MAC), especificada no padrão IEEE 802.15.4, com algumas adições como o IEEE 802.15.4g e 802.15.4e. O principal objetivo de ter múltiplas camadas físicas é conseguir atender as demandas de diferentes segmentos do mercado. O padrão IEEE 802.15.4 foi projetado para redes com baixa taxa de dados, que operam em várias bandas de transmissão, incluindo a banda de 2,4 GHz. Atualmente, há uma crescente demanda no uso das bandas sub-GHz.

O padrão 802.15.4 define vários esquemas de modulação na banda sub-GHz. Uma variante importante é o IEEE 802.15.4g, chamado de SUN, que pode chegar a uma taxa de dados de 50 kbps usando uma largura de banda de 110 kHz com um desvio de frequência de 50 kHz, que é a configuração padrão, os esquemas de modulação utilizados são o FSK (*Frequency Shift Keying*) e o GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*).

A tecnologia Wi-SUN adotou o padrão IEEE 802.15.4g que utiliza OFDMA e

OQPSK que suportam múltiplas taxas de dados que variam de 40 kbps a 1 Mbps, dependendo da região.

De acordo com (ALLIANCE, 2017b), utilizar o Wi-SUN permite a topologia de rede *Mesh* e ponto-multiponto. As redes *mesh* são auto-formadas, ou seja, quando um novo dispositivo é adicionado, ele encontra automaticamente outros nós para se comunicarem e são resilientes, se os obstáculos surgirem, os dispositivos serão automaticamente redirecionados para os pares mais próximo e disponível.

Esta tecnologia opera na faixa Sub-GHz, utilizando as bandas 169, 450-510, 780, 863-870, 896-960, 1427-1518, e 2400-2483 MHz, o uso de uma determinada banda irá depender das regulamentações vigentes em cada país. A largura do canal varia de 200 kHz a 1,25 MHz.

### 2.3.1 SISTEMA DE COMUNICAÇÃO WI-SUN

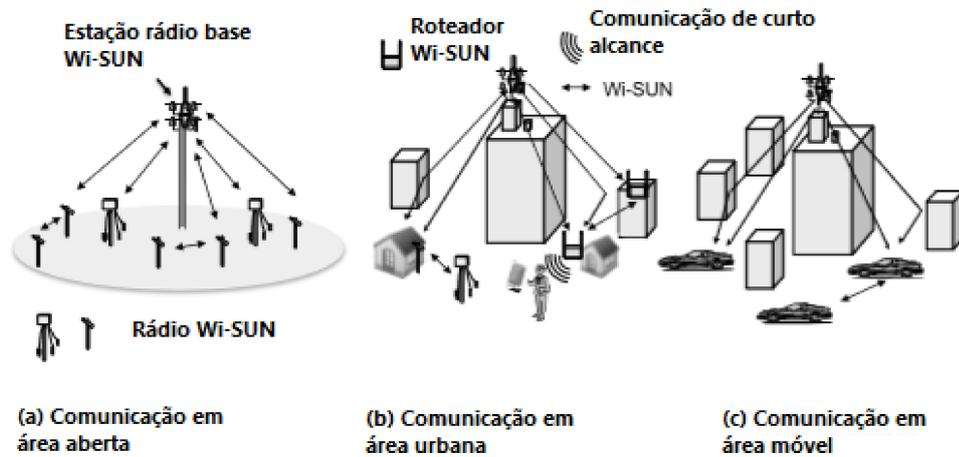
Segundo (HARADA et al., 2017) o modelo de comunicação WI-SUN é dividido em três tipos: o primeiro tipo (a) é um sistema de monitoramento e detecção de informações em um espaço aberto. Este tipo é baseado em um ponto fixo com comunicação ponto-multiponto com uma área de cobertura de 1 a 5 km.

O segundo tipo (b) um sistema de monitoramento e detecção de informações em um ambiente urbano. As estações rádio base estão instaladas em edifício e comunicam-se com dispositivos de rádio nos sensores, medidores e/ou monitores instalados em casas e/ou lojas pela Wi-SUN. A comunicação é principalmente sem linha de visada e, portanto, a comunicação direta entre a estação rádio base e os dispositivos de rádio pode não estar disponível. Nesse caso, pode-se utilizar comunicação de múltiplos saltos entre os rádios e os roteadores WI-SUN.

O terceiro (c) é um sistema de detecção e monitoramento de informações no ambiente de comunicação móvel de área ampla. As estações rádio base estão instaladas no prédio e se comunicam com dispositivos de rádio em sensores e/ou monitores instalados em veículos como carro e ônibus. O desafio de viabilidade do sistema é adicionar funções aos dispositivos de rádio Wi-SUN para receber as informações do sensor, medidor ou monitor no ambiente móvel.

Os tipos de comunicação são ilustrados Figura 6 sumariza as informações de cada tipo de sistema de comunicação.

Figura 6 – Sistema de comunicação WI-SUN.



Fonte: Adaptado de HARADA,2017.

### 2.3.2 PRINCIPAIS PADRÕES PARA REALIZAR SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO WI-SUN

Os principais padrões para realizar os sistemas de comunicação Wi-SUN são os padrões IEEE 802.15.4g e IEEE 802.15.4e. São padrões de camada PHY e MAC serão explicados nas próximas seções respectivamente.

#### 2.3.2.1 IEEE 802.15.4g

De acordo com (HARADA et al., 2017), o IEEE 802.15.4g é uma melhoria para o padrão IEEE 802.15.4, que apresenta requisitos de rede para utilitários de medição inteligente com baixa taxa de dados. O IEEE 802.15.4g define uma camada física alternativa e algumas modificações da camada MAC necessárias para implementação e existem três tipos, MR-FSK, MR-QPSK e MR-OFDM. Dentre os três tipos, o MR-FSK é o mais comercializado, e possui dois modos de transmissão: obrigatório e opcional. No Japão, por exemplo, as taxas de transmissão obrigatórias para utilizar modulação FSK é de 50 e 100 kbit/s e o GFSK deve ser usado como “FSK filtrado” para cumprir os requisitos. Na Tabela 1 mostra modulação, taxa de bits, espaçamento de canais, número total de canais e índice de modulação para a tecnologia.

Tabela 1 – Parâmetros de frequência e modulação IEEE 802.15.4g.

Banda de Frequência (MHz)	Modulação	Taxa de bits(kbps)	Espaçamento de canais(kHz)	Total de canais	Índice de modulação
470-510(China)	2FSK Filtrado*	50	200	199	1
	2FSK Filtrado	100	400	99	1
	4FSK Filtrado	200	400	99	0.33
863-870 (Europa)	2FSK Filtrado*	50	200	34	1
	2FSK Filtrado	100	400	17	1
	4FSK Filtrado	200	400	34	0.33
902-928 (US)	2FSK Filtrado*	50	400	129	1
	2FSK Filtrado	150	400	64	0.5
	4FSK Filtrado	200	200	64	0.5
917-923.5 (Coreia)	2FSK Filtrado*	50	200	32	1
	2FSK Filtrado	150	400	16	0.5
	2FSK Filtrado	200	400	16	0.5
920-928 (Japão)	2FSK Filtrado*	50	200	38	1
	2FSK Filtrado*	100	400	18	1
	2FSK Filtrado	200	600	12	1
	4FSK Filtrado	400	600	12	0.33

Fonte: Adaptado de HARADA, 2017.

\* Modo de transmissão obrigatório

### 2.3.2.2 CAMADA FÍSICA

De acordo com (HARADA et al., 2017), para conseguir atingir diferentes segmentos de mercado e requisitos de aplicação, três projetos alternativos de camada PHY são propostos no padrão IEEE 802.15.4g: <sup>1</sup>

- MR-FSK: o chaveamento de deslocamento de frequência de taxa múltipla (MR-FSK) é proposto para fornecer boa eficiência de potência de transmissão devido ao envelope constante do sinal. O MR-FSK PHY pode ser não filtrado ou com um filtro gaussiano. A codificação convolucional pode ser usada como FEC (*Forward Error Correction*). As taxas de dados suportadas pelo MR-FSK variam de 5kbps a 400kbps.

- MR-OFDM: a Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal de múltiplas taxas (MR-OFDM) é projetada para fornecer taxas de dados mais altas em canais com desvanecimento seletivo em frequência. MR-OFDM PHY usa tamanhos de transformada rápida de Fourier de 128, 64, 32 e 16, com chaveamento de fase binário, chaveamento de deslocamento de fase de quadratura e modulação de amplitude(16-QAM). A taxa de dados variando de 50 kbps até 800 kbps pode ser suportada.

- MR-OQPSK: o chaveamento de deslocamento de fase de quadratura de deslocamento múltiplo (MR-OQPSK) compartilha as mesmas características com LR-WPAN (Low Rate Wireless Personal Area Network), tornando os sistemas multimodo mais econômicos e mais fáceis de projetar. O MR-O-QPSK PHY usa o espectro de dispersão de sequência direta para distribuir a banda por uma largura de banda mais ampla. A modulação é aumentada em forma de cosseno O-QPSK. As taxas de dados variam de 6kbps a 500kbps.

### 2.3.2.3 CAMADA MAC

Existem duas categorias de dispositivos, o dispositivo de função completa (FFD) e o dispositivo de função reduzida (RFD). Uma rede IEEE 802.15.4g consiste em pelo menos um coordenador e um dispositivo. Um coordenador é um FFD, enquanto outros dispositivos na rede talvez sejam FFDs ou RFDs. O coordenador é responsável por controlar o tempo e o gerenciamento de recursos da rede. Uma rede pode estar no modo habilitado para *beacon* e no modo sem *beacon*. Um modo habilitado para *beacon* faz com que o coordenador transmita *beacons* aos dispositivos vizinhos periodicamente. Ao receber os *beacons*, os dispositivos podem se associar ao coordenador para formar *links* de comunicação. O processo em que os dispositivos fazem varredura por *beacons* é conhecido como varredura passiva. Por outro lado, uma rede no modo sem *beacon* requer dispositivos que pretendam aderir a uma rede para enviar uma solicitação de *beacon* ao coordenador. Somente após receber o pedido do *beacon*, o coordenador enviará o sinalizador. Esse processo é conhecido como verificação ativa.

---

<sup>1</sup> Tradução própria do artigo IEEE 802.15.4g *Based Wi-SUN Communication Systems* para efeito de amostragem neste trabalho.

### 2.3.3 IEEE 802.15.4e

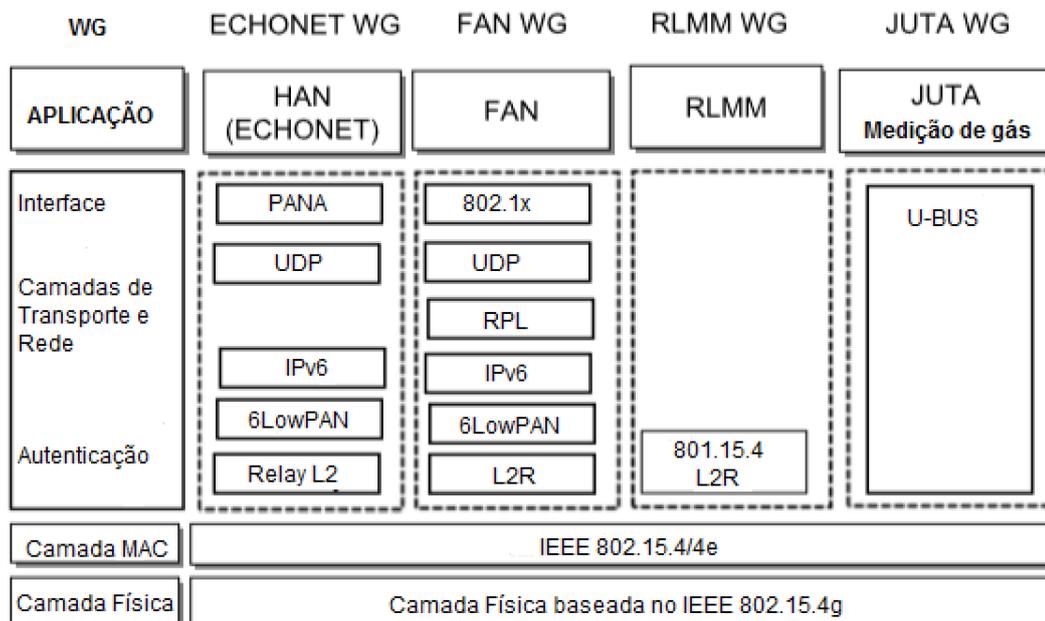
De acordo com (HARADA et al., 2017), o IEEE 802.15.4e também é uma melhoria e adiciona funcionalidade de baixo consumo de energia ao padrão IEEE 802.15.4TM-2006 MAC, a camada MAC dos padrões IEEE 802.15.4 e 802.15.4e são divididos em duas categorias: síncronos e assíncronos.

O modo síncrono pode ser baseado em *beacons* ou baseado em salto de canal. Os dispositivos que utilizam modo assíncrono podem utilizar três formas de acesso ao meio: CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*), *Coordinated Sampled Listening* (CSL) ou *Receiver Initiated Transmission* (RIT).

### 2.3.4 PERFIS WI-SUN

De acordo com (HARADA et al., 2017) os padrões IEEE802.15.4, 4g, e .4e definem principalmente as especificações de camada física e MAC. No entanto, muitas aplicações precisam de mais especificações em outras camadas, como por exemplo, nas camadas de rede e transporte, assim como, também necessitam de protocolos de segurança e autenticação. Algumas dessas camadas são definidas por entidades além do IEEE, como o IETF, por exemplo.

Figura 7 – Perfis Wi-SUN



Fonte: Adaptado de Wi-SUN Systems.

Os perfis Wi-SUN são desenvolvidos por grupos de trabalho (*Working Groups-WGs*) na Wi-SUN alliance. A Figura 7, mostra os perfis desenvolvidos por cada *Working Group*.

Existem quatro grupos de trabalho que desenvolvem soluções para determinados setores do mercado utilizando Wi-SUN:

- ECHONET WG: é baseado em IEEE 802.15.4, .4g, .4e, 6LowPAN, IPv6, UDP e PANA, como PHY, MAC, camada de convergência, camada de rede, camada de transporte e protocolo de autenticação, respectivamente. Esse grupo desenvolve especificações para um aplicativo de gerenciamento de energia no Japão.

- FAN WG: o perfil do FAN (Field Area Network) é baseado no IEEE 802.15.4, .4g e .4e, 6LowPAN, IPv6 e UDP. Adotou novas funções de roteamento utilizando protocolo de roteamento em camada 3, o RPL (utilizando em redes Wi-SUN mesh) como também roteamento em camada 2 utilizando o ANSITIA-4957.210 (L2R) padronizado pelo sistema de segurança TIA TR-51 e IEEE 802.1x. Conecta dispositivos de campo, por exemplo, dispositivos de Infraestrutura de Medição Avançada (AMI) e componentes de Automação de Distribuição (DA) da concessionária de energia elétrica, como medidores, sensores de linha, bancos de capacitores, recursos de energia distribuída e elementos de automação de distribuição.

- RLMM WG: desenvolve soluções para sistema de monitoramento e gerenciamento de recursos limitados (RLMM), para o mercado de agricultura e monitoramento de prevenção de desastres. Diferente do perfil ECHONET e FAN que são baseados em comunicação IP o perfil RLMM não é baseado em comunicação IP para reduzir o consumo de energia. Além disso, o perfil suporta o protocolo L2R padronizado pelo IEEE 802.15.10.

- JUTA WG: desenvolve uma especificação para direcionar um perfil de aplicação oficial japonês para gerenciamento de energia de gás, U-BUS. O perfil do Wi-SUN JUTA definiu principalmente PHY, MAC e interfaces para suportar U-BUS Air em sistemas japoneses de medição de gás.

## 2.4 LTE-M (*Long Term Evolution*)

As tecnologias LTE-Cat0 / LTE-Cat1 / LTE-CatM1 (e-MTC) são baseadas nas redes móveis desenvolvidas usando as especificações do 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) Release 8 ao 13. Essas tecnologias podem coexistir com as redes 4G existentes. Cada uma das tecnologias são referenciadas com base na largura de banda, por exemplo, para as aplicações que exigem maior uso de dados, utiliza-se Cat0 e Cat1, que possuem a maior largura de banda e para menor consumo de dados ou consumo de dados esporádicos, o Cat M1 está sendo utilizado para estender a vida útil da bateria com os modos de hibernação apropriados.

Segundo (RAZA; KULKARNI; SOORIYABANDARA, 2017), os dispositivos convencionais LTE possuem uma alta taxa de dados e um alto consumo de energia o que

torna o uso dessa tecnologia inviável para alguns cenários. Com o intuito de reduzir custos e ser compatível com o sistema LTE, o 3GPP desenvolveu evoluções do LTE.

A evolução do Categoria 1 para o Categoria 0 houve uma redução do pico da taxa de dados, como também permite comunicação *half-duplex*, essas opções reduziram de custos implantação e complexidade dos projetos de modems e antenas. Na evolução do categoria 0 para a M1, conhecida também como e-MTC, a redução da largura de banda de recepção aliado a baixa potência de transmissão, resultaram em um projeto econômico e com baixo consumo de energia.

## 2.5 NB-IOT (*Narrow Band-IoT*)

O NB-IoT é uma tecnologia de banda estreita que foi disponibilizada como parte do *Release 13* em meados de 2016. NB-IoT tem o objetivo de permitir a flexibilidade de implementação, longa duração da bateria, baixo custo e complexidade de dispositivos e extensão de cobertura de sinal. O NB-IoT não é compatível com 3GPP, mas pode coexistir com GSM (*Global System for Mobile Communications*), GPRS (*General Packet Radio Services*) e LTE. O NB-IoT pode ser suportado apenas com uma atualização de *software* sobre a infraestrutura LTE existente. Pode ser implantado dentro de uma única portadora GSM de 200 kHz, dentro de um único bloco de recurso físico LTE de 180 kHz ou dentro de uma banda de guarda LTE.

## 2.6 *WEIGHTLESS-SIG*

O *WEIGHTLESS Special Interest Group* propôs três padrões abertos LPWA, onde cada um propõe diferentes características de alcance e consumo de energia. Esses padrões podem operar em faixas licenciadas como também em faixas não-licenciadas. *WEIGHTLESS-W* aproveita as excelentes propriedades de propagação de sinal dos espaços em branco (sem sinal) da TV. Suporta vários esquemas de modulação, incluindo modulação de amplitude em quadratura (16-QAM) e *Differential-BPSK* (DBPSK) e uma ampla gama de fatores de espalhamento. Dependendo do *link budget*, os pacotes com tamanhos superiores a 10 *bytes* podem ser transmitidos a uma taxa entre 1 kbps e 10 Mbps.

*WEIGHTLESS-N* é um padrão UNB (*Ultra Narrow Band*) para comunicação unidirecional de dispositivos finais a uma estação base, alcançando eficiência energética significativa e custo mais baixo do que outros padrões *WEIGHTLESS*. Ele usa o esquema de modulação DBPSK nas bandas Sub-GHz. A Comunicação unidirecional, no entanto, limita o número de casos de uso para *WEIGHTLESS-N*.

*WEIGHTLESS-P* combina conectividade bidirecional com duas camadas físicas não proprietárias. Modula os sinais usando o GMSK e o QPSK (*Quadrature Phase Shift*

*Keying*), dois esquemas conhecidos adotados em diferentes produtos comerciais. Portanto, os dispositivos finais não requerem um *chipset* proprietário. Cada canal estreito de 12,5 kHz na banda Sub-GHz oferece uma taxa de dados no intervalo entre 0,2 kbps e 100 kbps.

## 3 IPV6

Com o crescimento da Internet e das redes de comunicação baseadas em TCP/IP, o número de endereços IPv4 rapidamente se tornou um recurso escasso. Usar o endereçamento privado com NAT ou CIDR foi fundamental para limitar o impacto do problema; no entanto, uma solução de longo prazo era necessária. O IPv6 foi projetado com isso em mente, e seu principal objetivo é fornecer um espaço de endereço IP maior para suportar o crescimento do número de dispositivos que precisam se comunicar usando o modelo TCP/IP.

### 3.1 ENDEREÇAMENTO IPV6 E DHCPV6

A diferença mais notável entre o IPv4 e o IPv6 é o endereço IP e, especificamente, o tamanho do endereço IP. O endereço IPv6 tem 128 *bits*, enquanto o endereço IPv4 é de apenas 32 *bits*. Isso ocorre porque o IPv6 tem como objetivo aumentar o espaço de endereços IP para resolver o problema do esgotamento do endereço IPv4 e lidar com o crescimento da demanda de endereços IP. Semelhante ao IPv4, escrever um endereço IPv6 em binário não é conveniente. O IPv6 usa uma convenção diferente do IPv4 quando se trata de anotar o endereço IP. O IPv6 também define três tipos de endereços:

- *Unicast*: usado para identificar uma interface específica.
- *Anycast*: Usado para identificar um conjunto de interfaces (por exemplo, em vários nós). Quando esse endereço é usado, os pacotes geralmente são entregues na interface mais próxima com esse endereço.
- *Multicast*: Usado para identificar um conjunto de interfaces. Quando este endereço é usado, os pacotes geralmente são entregues a todas as interfaces identificadas por esse identificador. No IPv6, não há conceito de endereço de *broadcast* como existe para o IPv4. Para enviar pacotes na transmissão, o IPv6 usa um endereço *multicast*. Vários tipos de endereços são definidos dentro destas três classes principais. Não analisaremos todos os tipos de endereços e, em vez disso, nos concentraremos em dois tipos específicos definidos na classe *Unicast*: *unicast* global e *link unicast address* (LLA) local. Em termos muito simples, a diferença entre *unicast* global e *unicast* local vinculado é que o primeiro pode ser roteado pela Internet, enquanto o segundo é apenas localmente significativo dentro do *link* local, e é usado para operações específicas, como para o *Neighbor Discovery Protocol* (NDP). Um conceito exclusivo para o IPv6 é que uma interface pode ter vários endereços IPv6. Por exemplo, a mesma interface pode ter um *link* local e um endereço *unicast* global. Na verdade, esse é um dos casos mais comuns. O IPv6 exige que todas as interfaces

tenham pelo menos um endereço local vinculado. Tal como acontece com muitos outros protocolos, uma nova versão do *Dynamic Host Configuration Protocol* (DHCP) foi definida para funcionar com o IPv6. A versão 6 do DHCP usa o UDP (*User Datagram Protocol*) como o protocolo de transporte com a porta 546 para clientes e 547 para servidores ou *relays*. Dois modos de operação foram definidos:

- *Stateful* DHCPv6: Funciona de maneira semelhante ao DHCPv4, em que um servidor atribui endereços IP a clientes e pode fornecer configuração de rede adicional. O servidor controla quais endereços IP foram concedidos e para quais clientes. A diferença é que o DHCPv6 com informações de estado não fornece informações sobre a rota padrão; essa funcionalidade é fornecida pelo NDP.

- *Stateless* DHCPv6: usado apenas para fornecer configuração de rede. Não é usado para fornecer atribuição de endereços IP. O termo *stateless* vem do fato de que o servidor DHCPv6 não precisa manter o estado da concessão de um endereço IPv6. O DHCPv6 sem monitoramento de estado pode ser usado em combinação com atribuições estáticas ou SLAAC IPv6 para fornecer configuração de rede adicional, como para um servidor DNS (*Domain Name System*) ou servidor NTP (*Network Time Protocol*).

## 4 MODELO DE PROPAGAÇÃO E PREDIÇÃO

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 RF (Rádio frequência), cada modelo melhorava seu antecessor. Os Modelos tradicionais podem ser divididos em duas categorias com características similares: modelos físicos e modelos empíricos. Modelos empíricos são adaptados para reproduzir medições em campo, enquanto modelos físicos são baseados em teorias de difração. Os dois tipos de modelos falharam tentando adaptar as diversas situações encontradas em campo e tiveram que serem adaptadas para cada predição, por este motivo os modelos de predições foram desacreditados e os projetistas procuraram outras técnicas como coleção de amostras de medição exaustiva. Para superar as limitações dos modelos tradicionais, modelos avançados foram desenvolvidos para tentar melhorar os resultados das predições para cenários reais, enquanto usa o mínimo de amostra de medições necessárias para reproduzir a performance de RF. 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 (calibrados) para cenários que se aplicam a grupos de células. Esse processo de calibração é complexo e necessita de ferramentas especializadas. Predições de RF são feitas para um número específico de pontos definidos por uma grade, que definem a resolução da predição. Resoluções típicas são de 5 m, 30 m e 90 m, no entanto qualquer resolução pode ser usada. Cada ponto da grade é chamado de pixel que formará um arquivo *raster*. As predições não necessitam de precisão de cada pixel mas deveriam ser uma representação estatística válida da performance da rede. As predições de RF nos dá uma média da perda de propagação, mas o valor da média pode variar significativamente por causa da atenuação (multipercurso e sombreamento). A análise da distribuição estatística dos efeitos da atenuação, portanto, é importante para o projetista calcular a disponibilidade da rede. Na próxima subseção será apresentado o modelo de *Korowajczuk*.

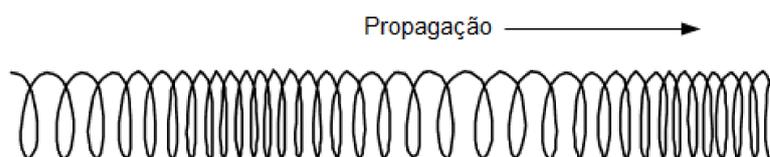
### 4.1 MODELO DE *KOROWAJCZUK*

Este modelo foi desenvolvido por *Korowajczuk* para a *CelPlan Technologies* com a finalidade de superar as deficiências dos modelos tradicionais ao fazer as predições reais. O uso de morfologias fracionárias melhorou significativamente as predições, mas ainda havia muitas situações em que o resultado não era satisfatório:

- Alturas das antenas mais altas ou menores que a morfologia que não resultaram em boas predições;
- O efeito de *canyons* (ruas) não foi bem representado;
- A dicotomia de dupla inclinação causou situações em que a perda não era a mesma quando o transmissor e o receptor estavam invertidos;
- Pequenas células não foram adequadamente previstas.

Uma nova abordagem foi necessária para lidar com esses problemas. Os modelos físicos abordam alguns desses problemas, mas não têm a capacidade de prever a variedade de situações encontradas na vida real. Um dos problemas diagnosticados nos modelos de propagação disponíveis é como a morfologia é considerada como afetando o sinal. A propagação de RF acontece através de ondas de RF. Essas ondas são ondas longitudinais, como sugerido na Figura 8.

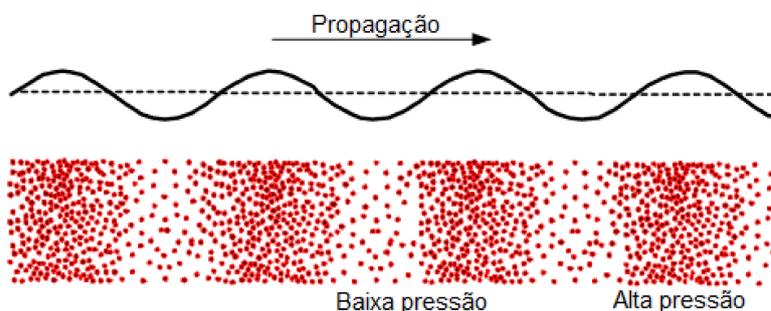
Figura 8 – Ondas Longitudinais.



Fonte: Adaptado de KOROWAJCZUK;XAVIER,2005

As ondas sonoras também são longitudinais, como ilustrado na Figura 9. As ondas de RF variam a densidade dos campos magnéticos e elétricos de maneira semelhante à forma como as ondas sonoras se propagam, variando a pressão do ar.

Figura 9 – Ondas Sonoras

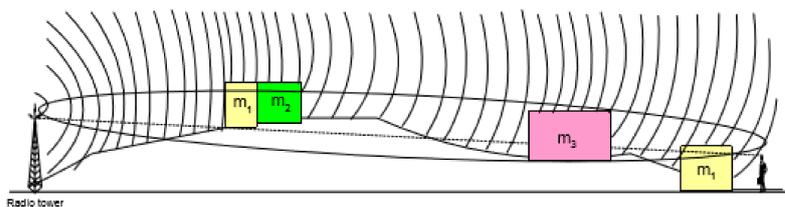


Fonte: Adaptado de KOROWAJCZUK;XAVIER,2005

Em duas dimensões, essa propagação pode ser representada por círculos concêntricos ou elipses, conforme mostrado na Figura 10.

A Figura 10 mostra que a propagação em um ambiente real é obstruída e distorcida pela morfologia, indicando que a altura da morfologia deve ser considerada como

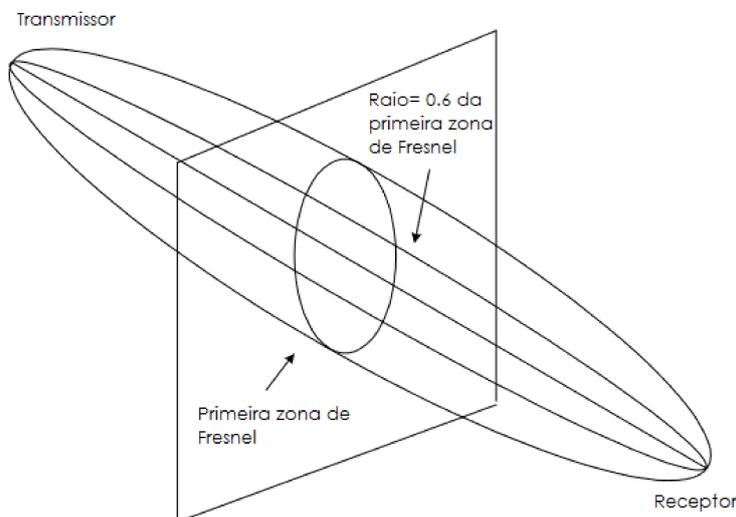
Figura 10 – Propagação da onda sobre a morfologia



Fonte: Adaptado de KOROWAJCZUK;XAVIER,2005

uma obstrução. A questão é que as morfologias não são contínuas e às vezes nem são compactas (árvores), portanto, o tratamento com gume de faca para obstruções não se aplica totalmente. Desse modo, o modelo de *Korowajczuk* propõe um fator de morfologia ( $m_m$ ) que adapta a perda do topo do obstáculo(gume de faca) por tipo de morfologia. A teoria de *Huygens-Kirchhoff* diz que, desde que 0,6 da zona de Fresnel não esteja obstruída, a propagação do espaço livre pode ser considerada entre a transmissão e o receptor. (KOROWAJCZUK; XAVIER, 2005) e (KOROWAJCZUK, 2011), refere-se a esta zona como a parte interna da zona de Fresnel, conforme mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Zona de Fresnel.

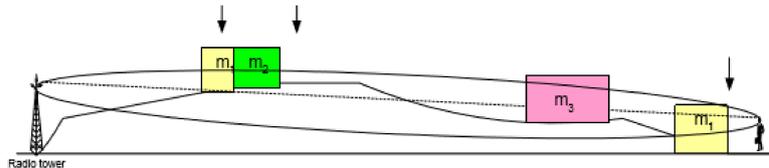


Fonte: Adaptado de KOROWAJCZUK;XAVIER,2005

Todos os métodos (empíricos e físicos) usados para analisar o efeito de múltiplas obstruções têm limitações e devem ser usados somente dentro de seus limites. Em nosso entendimento, o melhor compromisso para encontrar perdas de difração é usar os métodos *Deygout* ou *Korowajczuk* limitados a três picos. Os picos devem ser determinados usando a morfologia, mas as perdas devem ser calculadas para a topografia e morfologia em cada um dos pontos. Os três picos são determinados escolhendo os três pontos (topografia +

morfologia) que mais interferem na zona de Fresnel, isto é, causam a maior obstrução. Para aplicar esses métodos de difração ao considerar a morfologia, o transmissor recebe automaticamente uma folga equivalente à altura da antena em todas as direções ao redor. Se a morfologia onde o receptor está localizado é maior do que a altura do receptor, a difração é calculada para o topo da morfologia, como mostrado na Figura 12.

Figura 12 – Difração considerando modelo e morfologia



Fonte: Adaptado de KOROWAJCZUK;XAVIER,2005

O modelo de difração selecionado, *Deygout* ou *Korowajczuk*, é então aplicado para calcular a perda em cada ponto para topografia e alturas de morfologia separadamente. A diferença entre os dois modelos é que, no segundo caso, a perda atribuída à morfologia deve ser multiplicada pelo fator de morfologia do tipo morfológico correspondente, como na Equação 4.1.

$$L_D = D_{1t} + m_m D_{1m} + D_{2t} + m_m D_{2m} + D_{3t} + m_m D_{3m} \quad (4.1)$$

Onde:

$L_D$  é a perda de propagação por difração em dB;

$D_{1t}$  é a obstrução por terreno;

$D_{1m}$  é a obstrução por morfologia;

$m_m$  é o fator de arredondamento.

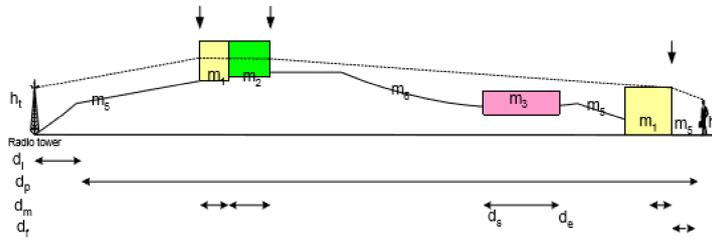
Depois que a perda de difração é determinada, o modelo de propagação de *Korowajczuk* requer a divisão da perda de propagação em quatro partes, na Figura 13: distância inicial, zona de quase espaço livre, zona obstruída e zona de penetração.

Inicialmente, um caminho baseado em três difrações é estabelecido e será analisado para análise posterior de perdas. A distância inicial é definida como a altura da antena de transmissão. A perda dessa distância é sempre considerada como espaço livre como na Equação 4.2.

$$L_i = 32.44 - 20\log(f) - 20\log(d_i) \quad (4.2)$$

Onde:

Figura 13 – Perda de propagação no Modelo *Korowajczuk*



Fonte: Adaptado de KOROWAJCZUK;XAVIER,2005

$L_i$  é a perda de propagação em espaço livre dada em dB;

$f$  é a frequência dada em MHz;

$d_i$  é a distância entre o transmissor e receptor dada em Km.

Para as distâncias restantes para as quais o elipsoide de 0,6 da zona de Fresnel não toca a morfologia (zona de espaço quase livre), um declive igual ou maior que o espaço livre é atribuído. Esta inclinação varia para diferentes áreas e depende das condições locais. Uma inclinação  $S_p$  é atribuída para cada área como na Equação 4.3.

$$L_p = \sum_{m_i=1}^n S_p \log\left(\frac{d_{smi}}{d_{emi}}\right) \quad (4.3)$$

Onde:

$L_p$  é a perda de propagação onde a primeira zona de Fresnel não toca a morfologia dada em dB;

$S_p$  é a inclinação da morfologia;

$d_{smi}$  é a distancia inicial de um tipo de morfologia dada em Km;

$d_{emi}$  é a distancia final de um tipo de morfologia dada em Km.

Para as distâncias em que o elipsoide de Fresnel interno toca a morfologia (zona obstruída), uma inclinação diferente é atribuída a cada tipo de morfologia, como na Equação 4.4.

$$L_m = \sum_{m_i=1}^n S_{mi} \log\left(\frac{d_{smi}}{d_{emi}}\right) \quad (4.4)$$

Onde:

$L_m$  é a perda de propagação onde a primeira zona de Fresnel toca a morfologia em dada dB;

$S_{mi}$  é a perda de propagação sobre morfologia dada em dB;

$d_{smi}$  é a distancia inicial de um tipo de morfologia dada em Km;

$d_{emi}$  é a distancia final de um tipo de morfologia em dada Km.

Finalmente, uma perda de penetração é atribuída. Essa perda representa a combinação de todas as perdas/ganhos no ambiente em torno do receptor. Se o receptor for superior à morfologia, a perda de penetração representa todos os sinais que são adicionados ao sinal principal, e sinais refletidos de outras morfologias ou do solo. Se o receptor estiver dentro da morfologia, a perda é aplicada proporcionalmente à diferença de altura entre o receptor e o topo da morfologia, como na Equação 4.5.

$$L_f = p_m \log(h_{morp} - h_r) \quad (4.5)$$

Onde:

$L_f$  é a perda de propagação por obstrução dada em dB;

$h_{morp}$  é altura da morfologia dada em metros;

$h_r$  é a altura do receptor dada em metros.

A perda de trajetória final é uma soma da perda de difração e a perda calculada para cada uma das quatro partes no caminho de propagação, conforme indicado na Equação 4.6

$$L = L_D + L_i + L_p + L_m + L_f \quad (4.6)$$

Embora esse procedimento seja intensivo em computação, ele pode ser executado com os computadores de hoje em pouco tempo. Todas as inclinações são calculadas empiricamente a partir de medições. Valores típicos dependem da área e do banco de dados usados. Este modelo permite o cálculo da perda de trajetos para usuários no nível da rua ou em diferentes andares de um edifício.

## 4.2 MODELO COST-231

Este modelo é uma extensão do modelo Okumura-Hata, feito para abranger as bandas de frequência entre 1500 MHz e 2000 MHz. Segundo (SILVA, 2004):

O valor constante da fórmula original de Hata foi alterado de 69,55 para 46,3 e o fator de dependência com a frequência passou a 33,9. Além disso, foi acrescentado um novo fator ( $C_m$ ) para tornar a expressão aplicável em áreas urbanas densas. Com tais modificações, a atenuação básica mediana de propagação é dada por,

$$A_{bu}(dB) = 46,3 + 33,9 \log f - 13,82 \log h_b - a(h_m) + (44,9 - 6,55 \log h_b) \log d + C_m \quad (4.7)$$

Onde:

$f$  é a frequência em MHz (1500-2000);

$h_m$  é a altura da antena da estação móvel;

$h_b$  é a altura da antena da ERB (30 - 200);

$d$  é a distância entre a ERB e a estação móvel em km(1-20);

$C_m = 0$  dB para áreas urbanas médias e suburbanas;

$C_m = 3$  dB para áreas densamente urbanizadas.

### 4.3 MODELO LEE

É relativamente simples, intuitivo e, uma vez otimizado, fornece previsões razoavelmente precisas. O modelo foi desenvolvido como resultado de uma grande campanha de coleta de dados realizada durante os anos 80 no nordeste dos Estados Unidos. Devido à sua formulação matemática simples, é frequentemente usado em simulações computacionais e modelagem de propagação. Inicialmente, o modelo foi desenvolvido para propagação em torno da banda de frequência de 900 MHz. Recentemente, uma extensa coleta de dados e validação do modelo de propagação demonstraram a aplicabilidade do modelo para frequências de até 2 GHz.

A principal suposição do modelo é que a perda do caminho de propagação depende de dois tipos de fatores:

- Fatores devido ao terreno natural.
- Fatores devido às estruturas feitas pelo homem.

O modelo tenta separar os impactos desses dois fatores, modelando-os por meio de parâmetros. É um modelo de propagação ponto a ponto, e para obtê-lo é necessário fazer três etapas. A primeira é criar as condições padrão. Para fazer a predição ponto-área e, em seguida, a predição ponto-a-ponto.

A expressão geral para a perda de propagação do sinal recebido para o modelo de Lee, de acordo com (OLIVEIRA et al., 2013):

$$L(dB) = 123.77 + 30.5 \log d + 10n \log \frac{f}{900} - \alpha \quad (4.8)$$

Onde:  $d$  é a distância entre o transmissor e o receptor móvel em km;

$f$  é frequência em GHz;

$n$  é um valor de experimento;

$\alpha$  é o fator de correção para a condição padrão em dB, normalmente é utilizado para explicar diferentes alturas de antena de estações rádio base e estações móveis, potências de transmissão e ganhos de antena.

## 4.4 MODELO *LONGLEY-RICE*

O modelo de *Longley-Rice* considera o perfil do terreno de forma detalhada e é necessário implementação computacional, do cálculo do campo de forma recursiva em função da distância ao transmissor, considerando os valores anteriores em cada ponto. De acordo com (CHAMBERLIN; LUEBBERS, 1982)<sup>2</sup>:

O modelo *Longley-Rice* foi desenvolvido para determinar a perda de propagação de caminhos onde apenas informações limitadas definindo o terreno estão disponíveis. Em particular, o modelo pretende estimar as perdas do caminho de propagação, dados os perfis de terreno da base de dados continental dos Estados Unidos, que fornece elevação do terreno (quantizado a 20 pés) a cada 30 s de arco (aproximadamente 1/2 mi).

Embora perfis de terreno mais precisos possam ser usados pelo modelo, a precisão de previsão tende a ser limitada por técnicas de aproximação usadas para compensar dados de entrada definidos de forma imprecisa. Estas aproximações são descritas brevemente abaixo.

Os parâmetros de entrada para o modelo *Longley-Rice* incluem um perfil de terreno do caminho de propagação, alturas da antena do transmissor e receptor, frequência, distância, polarização e refratividade da superfície. Os intervalos para essas variáveis são de 0,5 a 300 m para alturas de antena, 20 a 40 GHz de frequência, 1 a 2.000 km de distância e 250 a 400 N unidades de refratividade de superfície.

A refratividade da superfície é usada para calcular o raio efetivo da terra e é usada como uma variável na determinação da dispersão troposférica. A saída do modelo é a perda do caminho de propagação estimada. O modelo *Longley-Rice* considera a antena receptora como estando em uma das três regiões de recepção: linha de visão, difração e dispersão. Estas regiões são delineadas pelo modelo a partir dos dados do terreno e a localização das antenas. Linha de visão existe se

<sup>2</sup> Tradução própria do artigo *An Evaluation of Longley-Rice and GTD Propagation Models* para efeito de amostragem neste trabalho.

não houver bloqueio físico entre as duas antenas; difração ocorre entre o limite da sombra e um ângulo de depressão empiricamente determinado e dispersão é assumido para dominar abaixo desse ângulo. As funções de ponderação são usadas perto dos limites dessas regiões para garantir que as transições sejam contínuas.

## 5 PROJETO

A tecnologia adotada para o ambiente de predições foi o Wi-SUN porque é um padrão aberto e utiliza topologia de rede ponto-multiponto bem como *mesh* que apresenta potencial de resiliência. Opera na faixa SubGHz, utilizando as bandas 169, 450-510, 780, 863-870, 896-960, 902-907.5, 915-928, 1427-1518, e 2400-2483 MHz, o uso de uma determinada banda irá depender das regulamentações vigentes em cada país. A largura do canal varia de 200 kHz a 1,2 MHz. A taxa de transmissão varia entre 10 kbps a 300 kbps. Esse padrão é utilizado em aplicações como: FAN e HAN, *Smart Utility Networks*, *Smart Grid*, *Smart Metering*.

O projeto tem como objetivo de demonstrar uma solução de radiocomunicação Sub GHz em 250 MHz, multisserviço e multiusuário, ou seja, a infraestrutura de rede consegue atender vários tipos de serviços em uma cidade inteligente, como serviço de transporte, saúde e o setor de energia elétrica, com otimização do uso de infraestrutura de rede, devido a possibilidade de compartilhamento entre vários usuários (*utilities*, governos, empresas privadas e etc.) e com segurança da informação. O desenvolvimento do projeto foi dividido em três partes: a predição no *Celplanner*, a predição no *Radio Mobile* e a simulação no *Cisco Packet Tracer*.

Os componentes deste projeto são as subestações de energia da concessionária CEMAR e os *End Nodes* estão distribuídos entre semáforos, religadores (elementos da rede de distribuição de energia elétrica) e alarmes instalados nas casas dos clientes de empresas que oferecem serviços de *Smart Care*, na área metropolitana de São Luís - MA, conforme a Figura 14.

Figura 14 – Área de São Luís.



Fonte: O autor.

Foram escolhidos esses lugares para que todos os dispositivos finais (semáforos, religadores e alarmes) possam ter comunicação com uma Estação Rádio base mais próxima. Feito isso, as informações geradas pelos *End Nodes* serão enviadas para a central de gerenciamento, monitoramento e controle. A Figura 15 mostra as coordenadas das ERBs e *End Nodes*.

Figura 15 – Coordenadas geográficas das ERBs e *End Nodes*.

Unit name	Enabled	Latitude(°)	Longitude(°)	Elevation(m)
AP5	1	-2.68721	-44.27799	46
AP1	1	-2.514154	-44.24796	38
cpe1	0	-2.643946	-44.306 31.54	1
AP2	1	-2.580255	-44.31839	29
AP3	1	-2.646253	-44.2266	33
AP4	1	-2.739126	-44.34844	32
rel7	1	-2.659334	-44.27482	41.6
rel8	1	-2.587408	-44.25025	49
rel9	1	-2.489764	-44.24174	16.9
rel10	1	-2.505355	-44.29704	16.1
rel11	1	-2.51696	-44.22488	38
rel12	1	-2.593381	-44.189 47	1
rel13	1	-2.718984	-44.26932	15.7
rel14	1	-2.710632	-44.33498	32.4
rel15	1	-2.68938	-44.25795	25.7
rel16	1	-2.669594	-44.31371	7
rel17	1	-2.681319	-44.19559	26
rel18	1	-2.737746	-44.30416	25.6
rel20	1	-2.703303	-44.23154	15
Sem1	1	-2.625625	-44.31884	23.6
Sem2	1	-2.72719	-44.37026	9
Sem3	1	-2.650393	-44.19948	10.2
Sem4	1	-2.642479	-44.29903	27.9
Sem5	1	-2.592831	-44.23601	49.6
Sem6	1	-2.612434	-44.34451	23
Sem7	1	-2.683223	-44.34503	12.7
Sem8	1	-2.696708	-44.37239	10.3
Sem9	1	-2.701838	-44.2983	30.3
Sem10	1	-2.556225	-44.23857	29.6
Sem11	1	-2.668567	-44.24702	22
Sem12	1	-2.550733	-44.2928	1
Sem13	1	-2.745364	-44.37437	4.7
Sem14	1	-2.497972	-44.26873	24.2
Sem15	1	-2.675016	-44.22237	15
Res1	1	-2.722396	-44.31899	44.3
Res2	1	-2.597502	-44.21967	56.3

Fonte: O autor.

## 5.1 ZONA DE FRESNEL

Para possibilitar a comunicação de rádio enlace é ideal que o meio de comunicação esteja livre de obstáculos, para isso é necessário o estudo da zona de Fresnel, ilustrada na Figura 16. De acordo com (HAYKIN; MOHER, 2011):

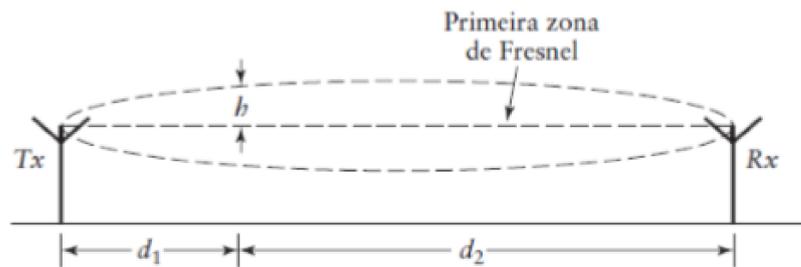
A propagação em espaço livre depende do caminho de visada direta entre o transmissor e o receptor e uma certa área limpa ao redor do caminho. A área limpa necessária, ilustrada na figura abaixo, é relacionada com a separação

entre os dois e o comprimento de onda da transmissão. Uma regra empírica é que o volume chamado primeira zona de Fresnel deve ser mantida limpo de objetos para uma propagação aproximada à de espaço livre. A zona de Fresnel define um elipsoide de revolução. Objetos na primeira zona de Fresnel irão afetar a transmissão e causarão desvios do modelo de propagação em espaço livre. O raio da primeira zona de Fresnel depende da posição entre antena de transmissão e recepção, sendo dado por

$$h = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (5.1)$$

Na qual  $\lambda$  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.

Figura 16 – Zona de Fresnel



Fonte: HAYKIN,2011.

## 5.2 PREDIÇÃO DE COBERTURA

Para a predição de cobertura foram feitas duas topologias: rede ponto-multiponto e multiponto-multiponto (mesh). Os parâmetros de entrada do sistema foram escolhidos de acordo com a Resolução no 555 de 20 de dezembro de 2010 da Anatel e com datasheets de rádios com tecnologia de Rádio Definido por Software (SDR – Software Defined Radio). Foram considerados potência máxima de transmissão de 30 dBm (utilizando amplificador de 10 dB), sensibilidade mínima de recepção de -86 dBm, ganhos de antena da ERB de 10 dBi e dos end nodes de 9 dBi, perdas nulas em cabos e conectores e taxa máxima de transmissão de dados de 1 Mbps para permitir até 100 (cem) conexões simultâneas ERB $\leftrightarrow$ end nodes a taxa de transmissão de dados de 10 kbps. Os ganhos foram retirados datasheets de antenas homologadas pela ANATEL.

Os modelos são: DIRV-90/5A (antena diretiva) e COLV-100/4E (antena omnidirecional). As Tabela 2 e Tabela 3 mostram os datasheets, respectivamente.

Tabela 2 – *Datasheet* antena DIRV-90/5A.

Modelo DIRV-80/5A	Faixa 220/270 MHz
ESPECIFICAÇÕES ELÉTRICAS	
VSWR	1, ≤5:1
Polarização	Vertical/Horizontal
Impedância nominal	50Ω
Potencia Máxima	300 Watts
Ângulo de 1/2 POT.	Horizontal 245 MHz 55°
Ângulo de 1/2 POT.	Vertical 240 MHz 71°
Ganho	9 dBi

Fonte: ARSELETRÔNICA

Tabela 3 – *Datasheet* antena COLV-100/4E.

Modelo COLV-100/4E	Faixa 250/20 MHz
ESPECIFICAÇÕES ELÉTRICAS	
VSWR	≤1,5:1
Polarização	Vertical
Impedância nominal	50Ω
Potencia Máxima	350 Watts
Ângulo de 1/2 POT.	Horizontal 240 MHz 160°
Ângulo de 1/2 POT.	Vertical 240 MHz 18°
Ganho	10 dBi

Fonte: ARSELETRÔNICA

### 5.3 MODO DE VARIABILIDADE

Segundo (HUFFORD et al., 1982), existem três dimensões para o conceito de variabilidade que é aplicada na predição de rádio: localização, tempo e situação. É uma forma de caracterizar a qualidade da recepção. Para isso, é utilizado o quantil que é a percentagem de tempo que se pode esperar o sinal atingir um determinado nível.

- Variabilidade de tempo: Esta dimensão tem a ver com as diversas formas em que os sinais de rádio são atenuados num determinado cenário (ou situação), numa localização particular, durante um período prolongado de tempo. Variações de curto prazo devido à propagação multipercurso e similares são explicitamente excluídos da estatística de variabilidade do tempo. De acordo com (HUFFORD et al., 1982): "Por este caminho por 95% do tempo a atenuação não ultrapassou 32,6 dB". Os valores típicos são "(99,99%)" e "(99,999%)".

- Variabilidade de localização: Esta dimensão tem a ver com a variação na recepção do sinal com relação a localização. Embora, o terreno seja estatisticamente semelhante,

podem ser diferentes, dependendo do terreno a porcentagem pode mudar. De acordo com (HUFFORD et al., 1982): "Nesta 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: Trata-se da variação do sinal com relação a "variáveis ocultas", ou seja, as variáveis que não são reconhecidas, que permanecem após os parâmetros "sistema definido e parâmetros ambientais e parâmetros de emprego". De acordo com (HUFFORD et al., 1982) "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.

No programa de simulação, além dos modos de variabilidade de tempo, localização e situação, o Radio Mobile possui quatro modos, que devem ser escolhidos. Dependendo do modo escolhido, segundo o relatório do NTIA 82-100 (*National Telecommunications and Information Administration*) há distinção entre confiabilidade e confiança para cada modo: modo de transmissão, modo individual (ou *accidental*), o modo móvel e monomodo mensagem (ou local).

O modo de escolhido foi *accidental*, que aborda as estatísticas de interesse para um único receptor, por exemplo, um rádio em uma casa, ou TV, ou um enlace de dados ponto a ponto. Confiabilidade, neste caso, é simplesmente a variabilidade do tempo. A confiança é uma combinação de localização e situação de variabilidade.

## 6 RADIO MOBILE

O Radio Mobile (CODE, 2017) é um programa de simulação para realizar predições de cobertura de RF na faixa de frequências entre 20 MHz e 20 GHz nos modos de propagação ponto a ponto, ponto-multiponto e multiponto-multiponto utilizando o modelo de predição de cobertura *Longley-Rice* (LONGLEY; RICE, 1968).

A resolução das bases de dados de relevo e morfologia para a região da América do Sul é de 100 m, disponibilizadas pela Agência Espacial Europeia. Os seguintes parâmetros de entrada são utilizados para realizar a predição de cobertura:

- Potência de transmissão;
- Frequência;
- Tipo de Antena;
- de antena;
- Ganho da antena;
- Perdas nas linhas de transmissão (cabos e conectores);
- Os tipos de terreno (morfologia) e altimetria (relevo).

### 6.1 REDE PONTO-MULTIPONTO

Nessa topologia, ou arquitetura de rede, um ponto central pode estar enviando informações para vários pontos da rede, utilizando um mesmo meio e fazendo derivações ao longo do meio. Este tipo de ligação pode existir em uma arquitetura de redes conectadas a grandes distâncias, as WANs (*Wide Area Network*).

Nesta topologia a informação parte de um computador central por um único meio de transmissão onde é distribuída para vários pontos por meio de endereços lógicos diferentes. Atualmente, as soluções de acesso Ponto-Multiponto (PMP) permitem uma conexão econômica, confiável e segura. As soluções PMP funcionam em uma grande variedade de espectros licenciados e não-licenciados.

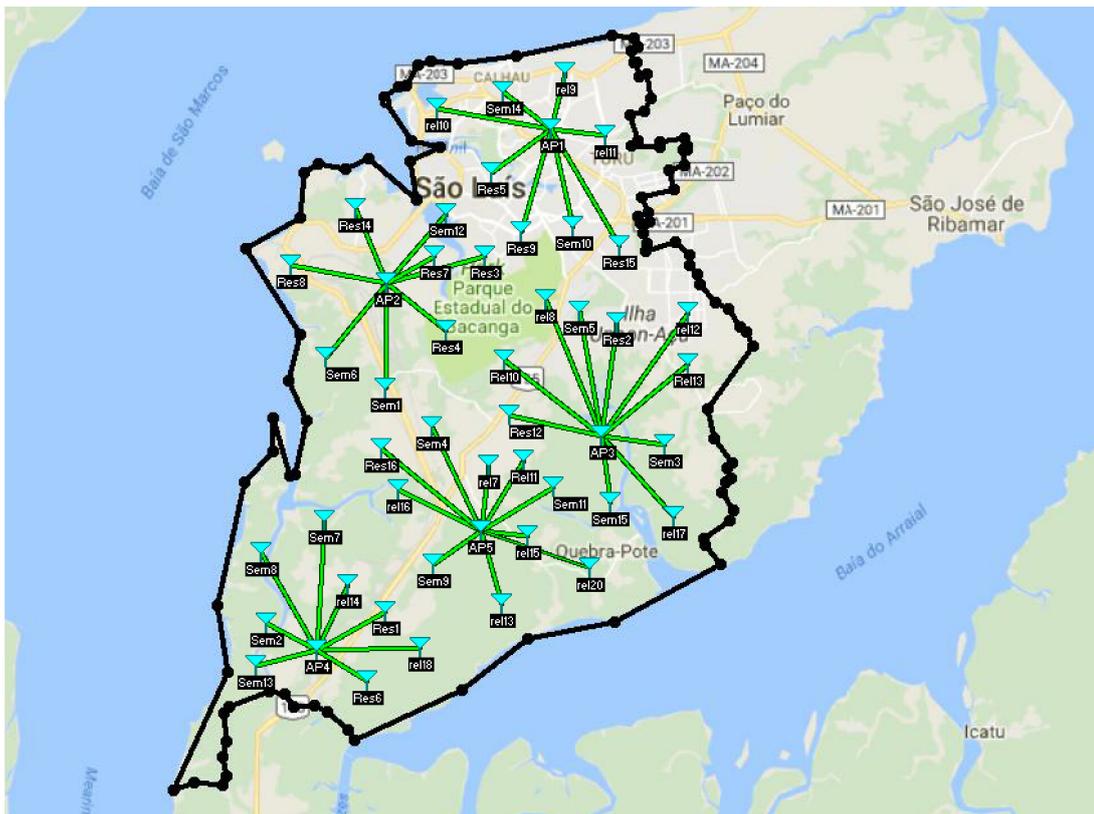
#### 6.1.1 PREDIÇÃO DE COBERTURA PONTO-MULTIPONTO

Conforme foi mencionado no item 3.1 a análise de obstrução da primeira zona de Fresnel os modos de viabilidade serão utilizados como formas de analisar a disponibilidade dos links entre as ERBs (Estação Rádio Base) e os End Nodes e a cobertura de sinal

na cidade de São Luís. Desta forma, serão analisados os melhores e piores casos, para a solução de rede PMP.

A Figura 17, mostra os enlaces de comunicação estabelecidos entre ERBs <-> End Nodes representados pela cor verde indicando ótimo nível de recepção.

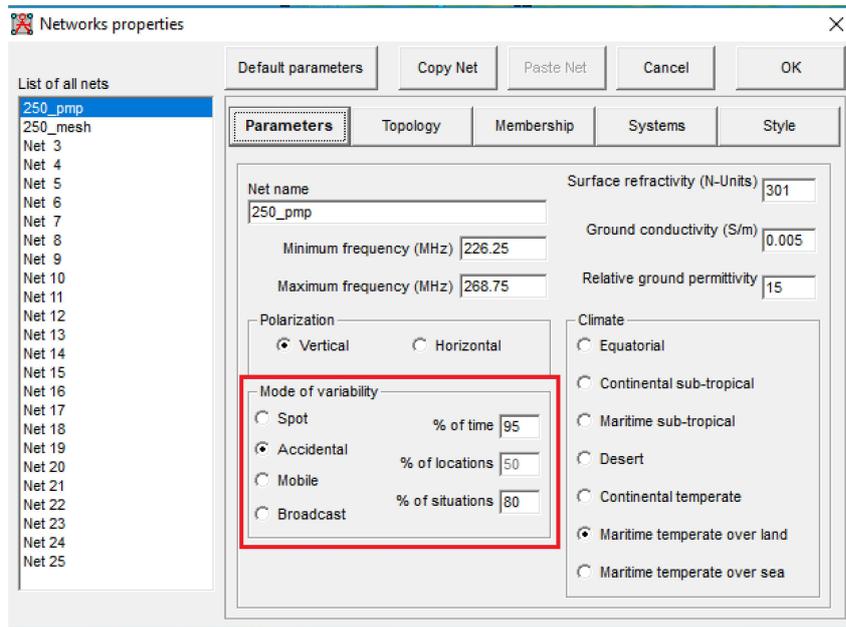
Figura 17 – Rede PMP



Fonte: O autor.

Para a rede Ponto-Multiponto o modo de variabilidade escolhido foi o Modo accidental, este modo é dado apenas pela variabilidade de situação e tempo. É correto afirmar que, em 80% de situações em que a atenuação não exceda 95,5 dB para, pelo menos, 95% do tempo. Neste caso, "Em 80% de situações como" representa a medida de confiança. E "a atenuação não exceda 90 dB para, pelo menos, 95% do tempo" é a medida de confiabilidade. A Figura 18, mostra o modo de variabilidade escolhido para a predição da rede PMP.

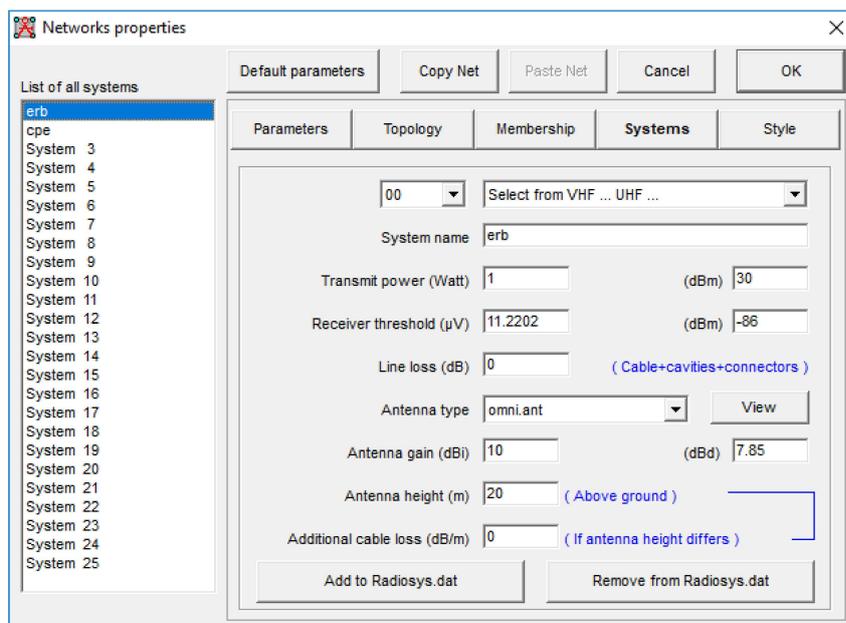
Figura 18 – Modo de variabilidade para a rede PMP.



Fonte: O autor.

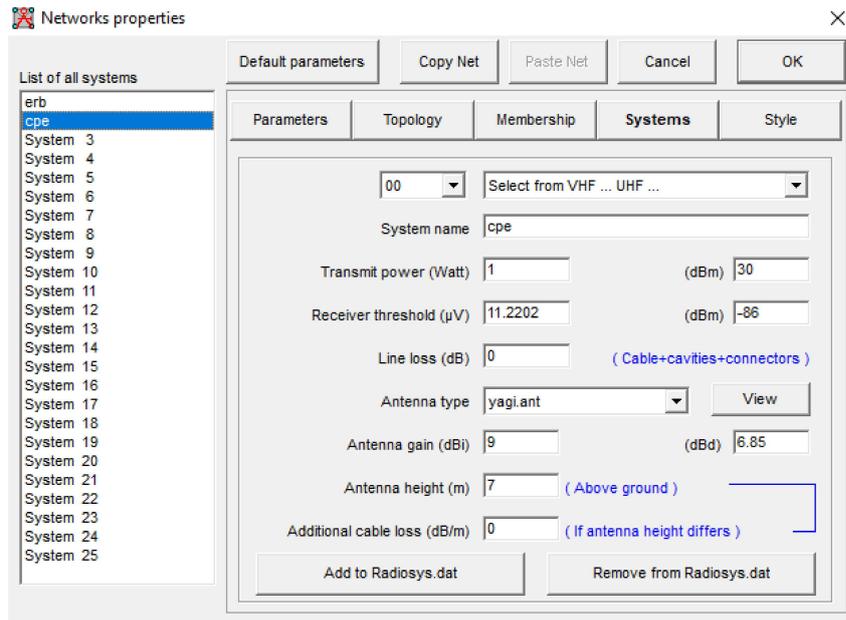
A Figura 19 e a Figura 20 mostram os parâmetros de entrada utilizados para predição da rede PMP. A resolução 555 da ANATEL não limita a potência de transmissão para redes ponto-multiponto nas frequências SubGHz.

Figura 19 – Prâmetros de entrada para as ERBs.



Fonte: O autor.

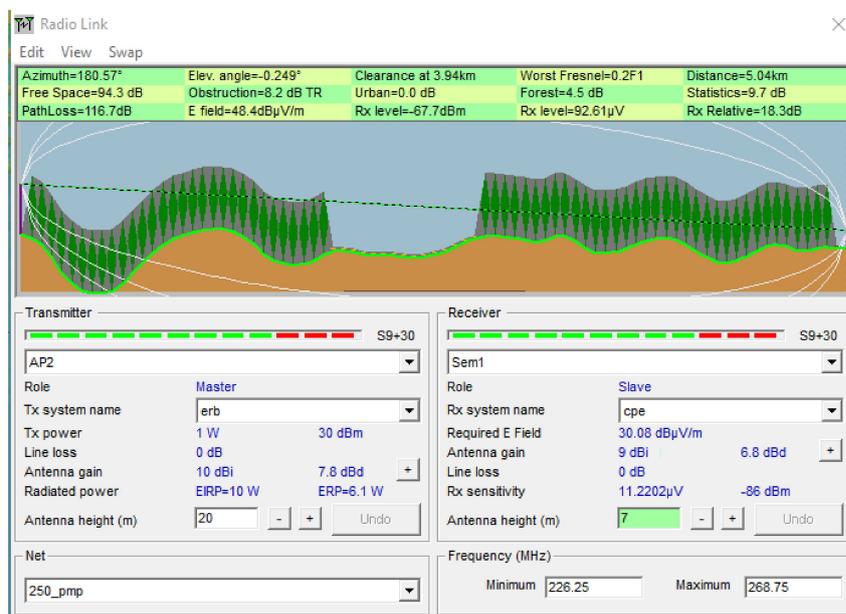
Figura 20 – Parâmetros de entrada para a rede PMP.



Fonte: O autor.

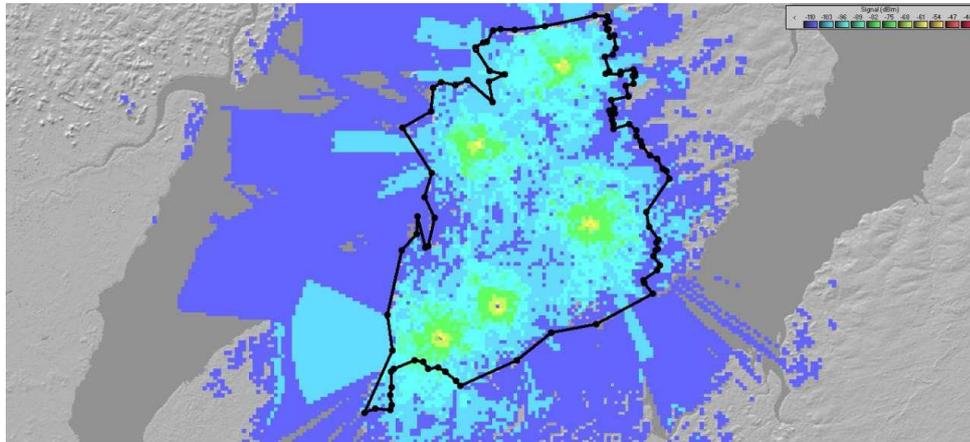
A Figura 21 mostra o link entre a ERB AP2 e o *End Node* Sem1, o total da perda de propagação é de 116,7 dB, as perdas são caracterizadas por perdas no espaço livre, obstrução e floresta. O pior caso de recepção é de 18,3 dB sobre o sinal necessário para atender a 95% do tempo em 80% das situações. O nível de recepção do sinal é -86 dBm, para esse enlace percebe-se que o nível de recepção é de -67,7 dBm, que está em um nível aceitável.

Figura 21 – Enlace entre o AP2 e o Sem1.



Fonte: O autor.

Figura 22 – Resultado da predição de cobertura da rede ponto-multiponto com 5 ERBs no Radio Mobile.



Fonte: O autor.

A Figura 22 apresenta o resultado da predição de cobertura da rede ponto-multiponto com 5 ERBs. O polígono preto que delimita a área do município está praticamente todo coberto com sinais de RF que variam de -110 dBm (menor intensidade) a -40 dBm (maior intensidade). O *Radio Mobile* permite obter a intensidade de sinal de RF para cada coordenada geográfica por meio do arquivo raster. Com estas informações foi possível calcular o percentual de área coberta analisando, do total de pontos, o percentual com sinal acima de um determinado limiar.

A Figura 23 mostra o resultado dos cálculos da área coberta indicando 98,84% da área do polígono coberta com sinal de RF, o que representa um sombreamento (ausência de sinal) de apenas 1,16% em todo o município.

Figura 23 – Resultado dos cálculos da área coberta

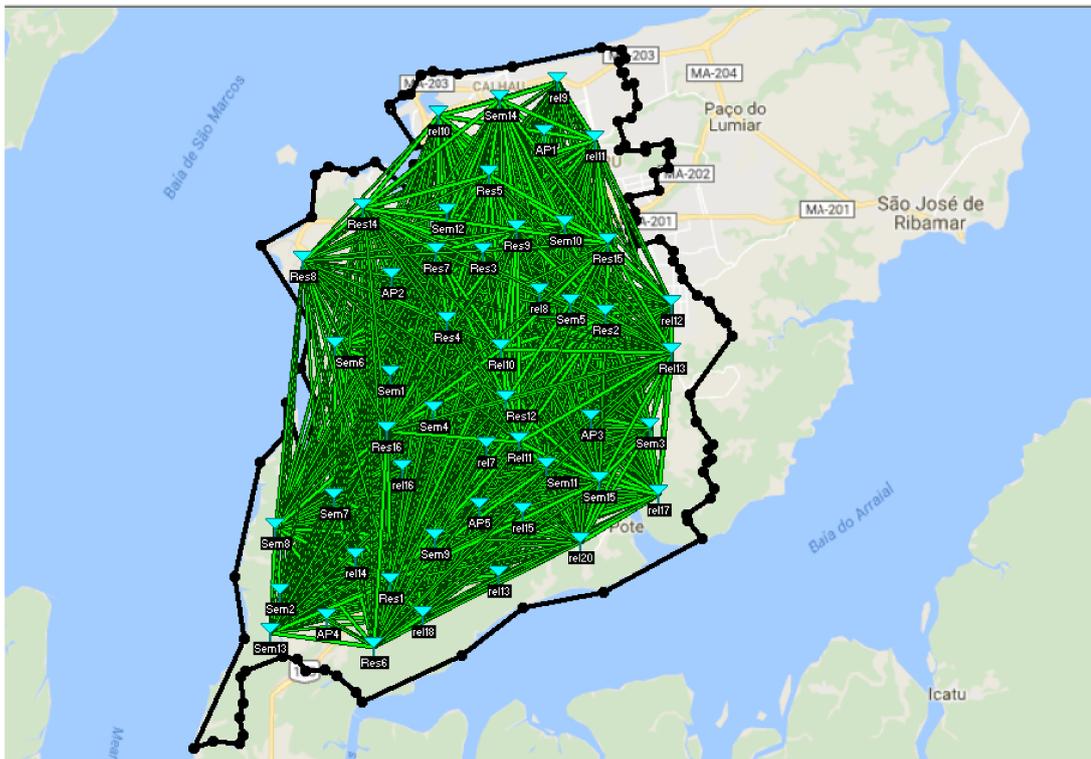
Latitud. [°]	Longitu. [°]	Rx (dB)	-2,473637 a -2,7992261 e -44,222252 a -44,4098703	área%=	98,84
-2,4739	-44,3375	5,4			
-2,4739	-44,3351	5			
-2,4739	-44,3327	4,4			
-2,4739	-44,3304	5			
-2,4739	-44,328	6			
-2,4739	-44,3256	6,4			
-2,4739	-44,3232	4,9			
-2,4739	-44,3208	2,8			
-2,4739	-44,3184	2,4			
-2,4739	-44,316	2,3			
-2,4739	-44,3136	2,7			
-2,4739	-44,3112	3,5			
-2,4739	-44,3088	1,6			
-2,4739	-44,3064	3,3			
-2,4739	-44,304	2,9			
-2,4739	-44,3016	3,7			
-2,4739	-44,2992	3			
-2,4739	-44,2968	1,8			
-2,4739	-44,2944	2			

Fonte: O autor.

## 6.2 REDE MESH

A segunda solução proposta faz uso de Redes Mesh (WMN- *Wireless Mesh Networks*) como um meio para estender a cobertura de uma rede sem fio com múltiplos saltos e fornecer acesso a redes de infraestrutura, com ou sem fio. São redes compostas de Pontos de Acesso *Mesh* (MAP) organizados de acordo com diferentes topologias. Em uma visão simples, a WMN é (*Wireless Mesh Network*) composta por nós que funcionam como estações terminais (STA- *Station*), onde a informação trocada é retransmitida para uma rede externa por qualquer nó como ilustrado na Figura 24 . Os *Ends Nodes* se comunicam diretamente com outros dispositivos vizinhos, que fornecem comunicação com um AP, para redes externas. Desse modo, é possível ter uma rede escalável e robusta, garantindo a conectividade entre os nós.

Figura 24 – Rede mesh



Fonte: O autor.

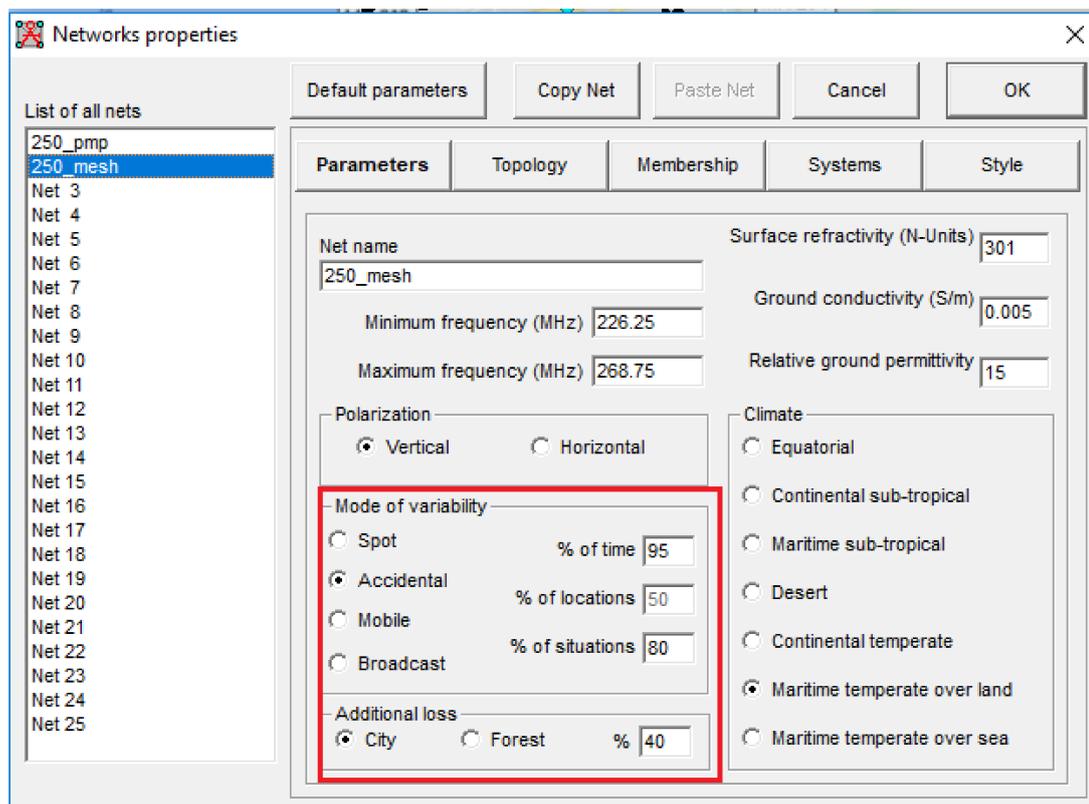
### 6.2.1 PREDIÇÃO DE COBERTURA REDE MESH

A análise de obstrução da primeira zona de Fresnel e os modos de viabilidade serão utilizados como formas de analisar a disponibilidade dos links entre as ERBs e os *End Nodes*.

De acordo com a Figura 24, é possível perceber que todos os nós estão se comunicando, por meio dos links de cor verde, isso é possível devido a redundância entre os APs

(Nó) e os *End Nodes* (Terminal). Para esse projeto não foi utilizado uma solução de rede de *backhaul*, esta seria uma rede em que apenas os APs estão conectados um ao outro, de forma redundante. O modo de variabilidade escolhido *Accidental* com perdas adicionais de 40% para ambientes urbanos, mostrado na Figura 25 .

Figura 25 – Modo de variabilidade da rede mesh.



Fonte: O autor.

A quantidade máxima de saltos recomendada não deve ultrapassar de 3, pois a cada salto a vazão cai pela metade.

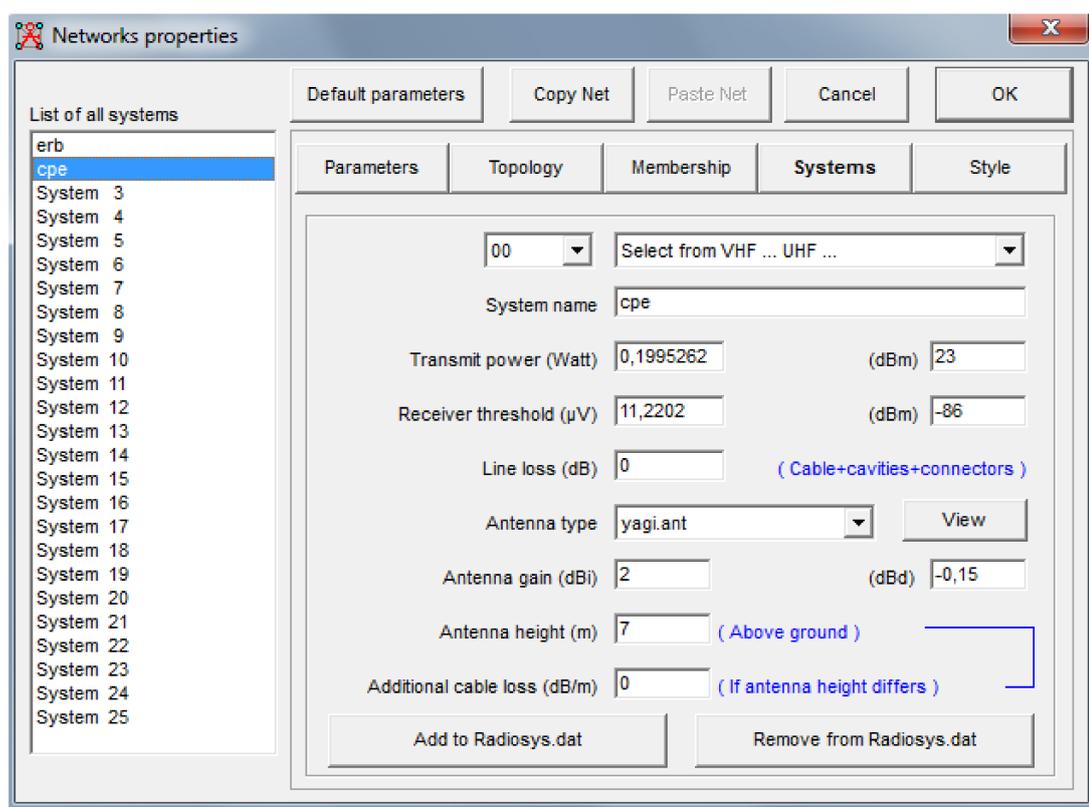
A redundância da rede *mesh* permite que não seja necessário uma grande quantidade de saltos, pois todos os nós estão conectados um ao outro, no caso de perda de comunicação de um nó com um AP/*End Node*, este *End Node*/AP pode enviar para outro nó da rede que esteja se comunicado com um AP/*End Node*. Dessa forma, não há risco de algum nó desta rede ficar sem comunicação com o restante da rede. Os parâmetros das ERBs e dos *End Nodes* são apresentados nas Figura 27 e Figura 26, respectivamente. Esses parâmetros foram escolhidos baseados na RESOLUÇÃO 555, da ANATEL:

Art. 4º A potência entregue pelo transmissor à antena de uma estação, nodal ou terminal, dever ser a mínima necessária à realização do serviço com boa qualidade e adequada confiabilidade.

Parágrafo único. A potência efetivamente irradiada (e.r.p.), quando da utilização por sistemas multiponto-multiponto, deve estar limitada ao valor máximo de 25 dBm.

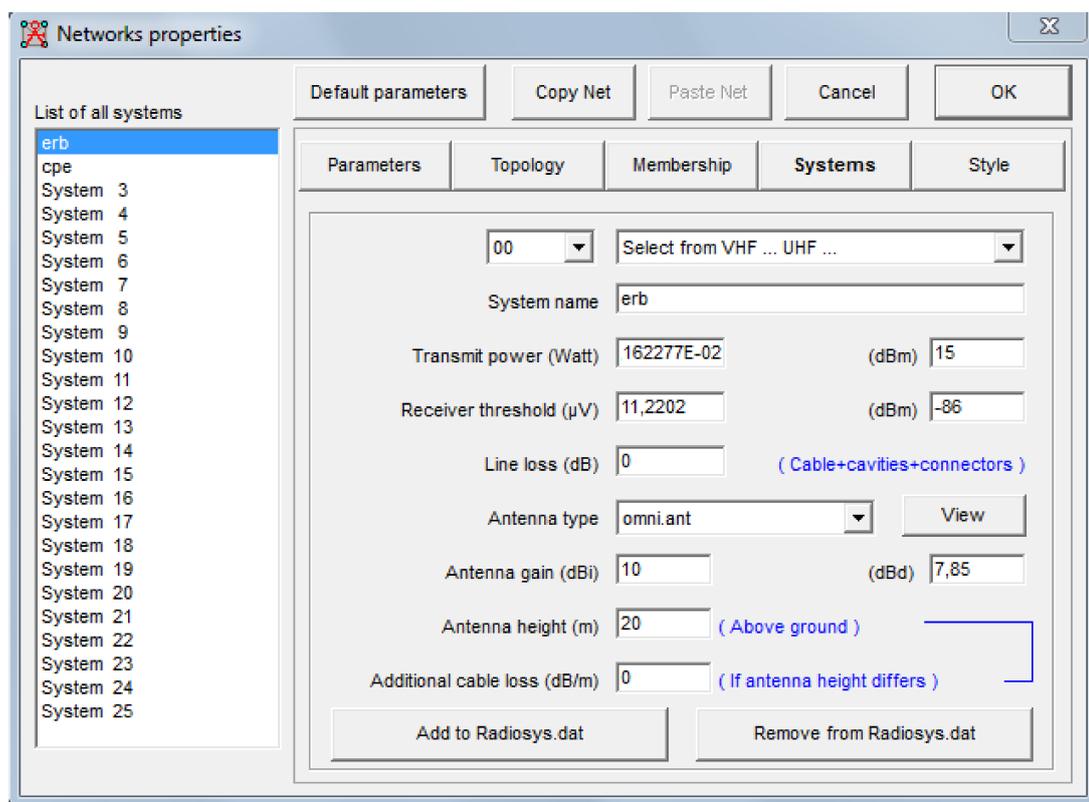
Art. 5º Podem ser utilizadas antenas de maior ganho, com polarização horizontal, vertical, bem como a composição de ambas, associadas ao uso de potências de transmissão mais baixas possíveis, preservando o bom funcionamento do sistema.

Figura 26 – Parâmetros ERBs da rede mesh



Fonte: O autor.

Figura 27 – Parâmetros dos Ends Nodes da rede mesh.



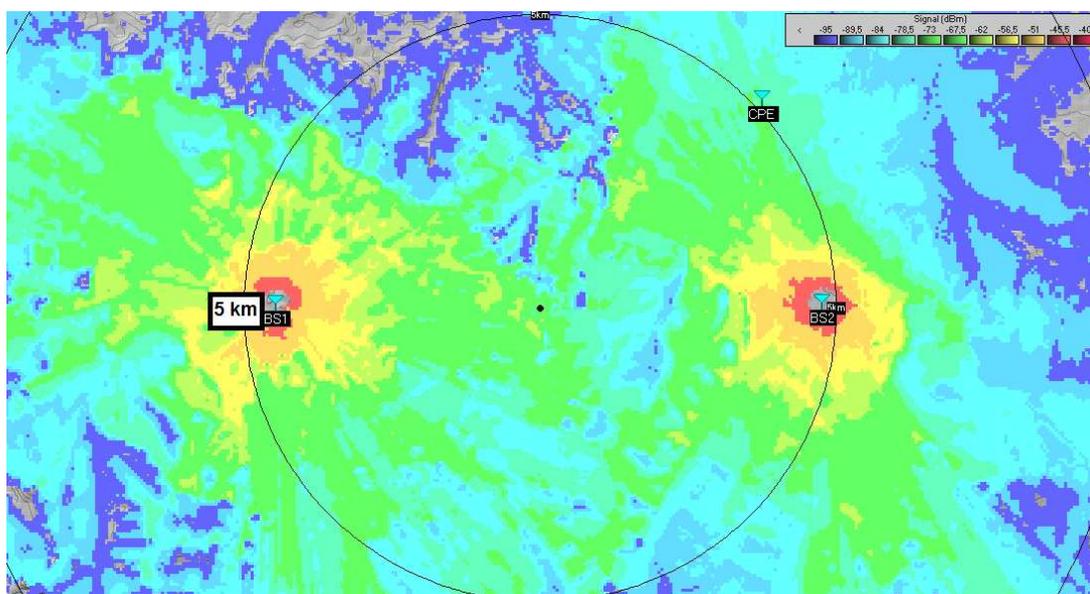
Fonte: O autor.

## 6.2.2 PREDIÇÕES DE COBERTURA PONTO-MULTIPONTO EM 250 MHZ E 2,5 GHZ

O trabalho (OLIVEIRA; COSTA; CARVALHO, 2017) mostrou que a infraestrutura de radiocomunicação necessária para cobrir uma área geográfica em um raio de 10 km considerando um ambiente de propagação urbano denso operando com frequência sub-GHz em 250 MHz é 12 (doze) vezes menor, do que com frequência celular 4G em 2,5 GHz proporcionando menores despesas financeiras com CAPEX no momento da implantação e com OPEX no momento da operação e manutenção.

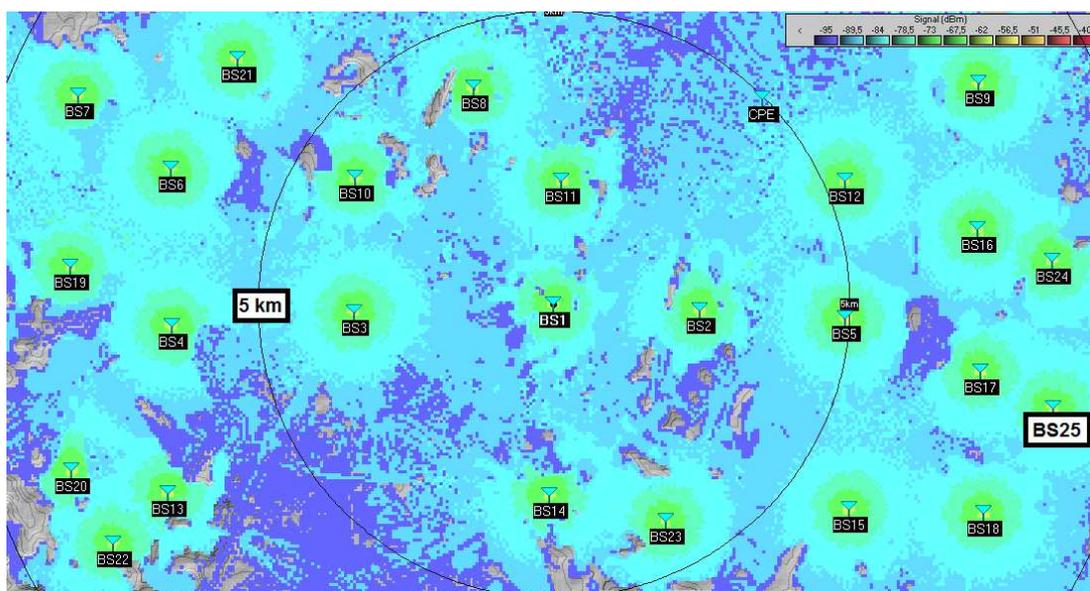
A Figura 28, mostra que para um raio de cobertura de 10 km com frequência em sub-GHz é necessário apenas 2 ERBs e a Figura 29 mostra que para um raio de cobertura de 10 km utilizando frequência de 2,5 GHz é necessário 25 ERBs. A predição proposta neste trabalho é para toda a área de São Luís que precisa de 5 ERBs para cobrir toda a área metropolitana utilizando frequência sub-GHz.

Figura 28 – Mapa de cobertura para 10 km de raio em 250 MHz.



Fonte: OLIVEIRA; COSTA; CARVALHO, 2017.

Figura 29 – Mapa de cobertura para 10 km de raio em 2,5 GHz.



Fonte: OLIVEIRA; COSTA; CARVALHO, 2017.

## 7 CELPLANNER

O CelPlanner é um software que permite uma solução completa para projetos de sistemas *Wireless*. O *CelPlanner* atualmente suporta várias tecnologias: AMPS, TDMA, CDMA, GSM, Wi-Max, Wi-Fi e 4G, permitindo ao projetista executar estudos de predição de cobertura e de interferência sobre conjuntos de estações rádio bases, facilmente agrupados por fases do projeto, por área ou por qualquer outro identificador. O *CelPlanner* possui um sofisticado modelo de simulação de tráfego responsável pela geração de padrões de chamadas aleatórias ou regulares oferecendo uma precisão na predição de sistemas *Wireless*. Assim sendo, é possível determinar, com precisão, a quantidade de canais de tráfego ideal para cada setor do sistema. O *software* possibilita a utilização de bases de dados topográficas, morfológicas, de imagens de alta resolução, de vetores de apoio e referência e de antenas, dessa forma elimina o trabalho exaustivo e empírico de geração dos parâmetros de propagação, para uma determinada área de interesse, pois é o único *software* que determina automaticamente os parâmetros de predição diretamente das medidas de campo, oferecendo graus de precisão e resolução. Tratando-se de sistemas celulares, PCS e *trunking*, atualmente o *CelPlanner* trabalha com cinco modelos de predição: I - otimizado de Lee-Picquenard, II – *Korowajczuk*, III - de microcélulas, IV – macrocélulas modificado e V - de Linha de Visada, os quais fornecem os melhores desvios padrão e médio quando comparados às medidas reais obtidas em campo, neste trabalho foi utilizado o modelo de *Korowajczuk*, devido a faixa de frequência de operação e a potencialidade do reuso de morfologia apresentada pelo modelo. A ferramenta utiliza modelo matemático para predição de disponibilidade de enlace em situações de visada livre, considerando ainda expressões e dados relacionados às condições climáticas e de precipitação de chuva, observados na área de interesse.

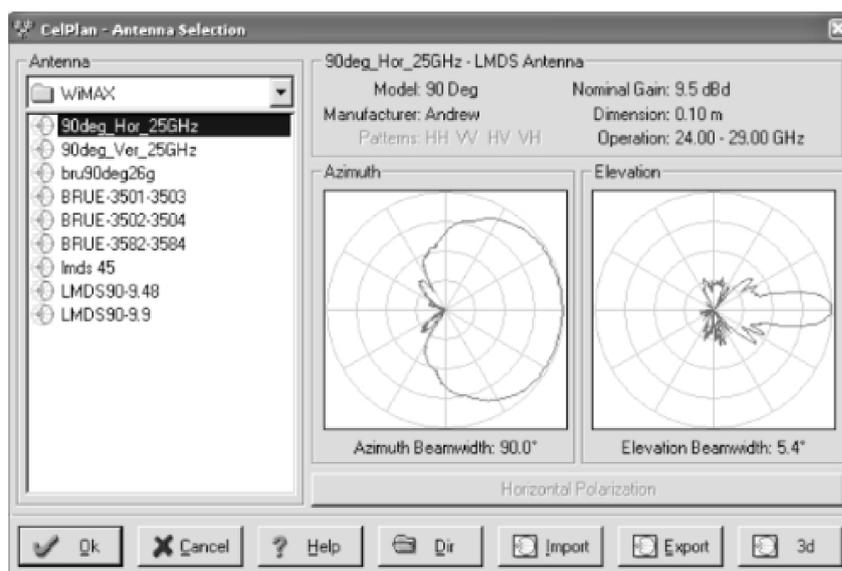
### 7.1 REDE PONTO-MULTIPONTO

Para este trabalho foi realizada apenas a predição de cobertura da rede ponto multi-ponto, pois neste software não é possível fazer predição de cobertura em rede *mesh*.

Os parâmetros de entrada do *Celplanner* foram idênticos aos parâmetros de entrada utilizados no *Radio Mobile*, pois o intuito é mostrar que há uma proximidade na predição de cobertura da metrópole de São Luís, com as 5 estações Radio Base.

A antena utilizada foi dada pelo próprio software de predição, conforme Figura 30. A tecnologia utilizada para simulação foi o Wi-MAX com largura de banda 1,25 MHz de acordo com a Resolução 555 da Anatel.

Figura 30 – Antena em 250 MHz.



Fonte: O autor.

A Figura 32 mostra a predição de cobertura combinada das 5 ERBs. É possível perceber por inspeção visual que praticamente toda a área da metrópole de São Luís foi coberta. A Figura 31 mostra o resultado dos cálculos da área coberta (analisando, do total de pontos, o percentual com sinal acima de um determinado limiar) que indicaram 98,19% da área do polígono coberta com sinal de RF, o que representa um sombreamento (ausência de sinal) de apenas 1,81% em todo o município. A comparação visual das predições de cobertura da Figura 22 (com *Radio Mobile*) e da Figura 32 (com *CelPlanner*) mostra que o percentual de cobertura do polígono do município é semelhante indicando baixa ausência de sinal nas duas predições com diferença de apenas 0,65 (98,84 - 98,19)% entre as duas predições de cobertura. Vale ressaltar que maior percentual de área de cobertura não indica que seja mais preciso. A precisão de um *software* de predição de cobertura é determinada comparando os resultados da predição com os valores reais medidos em campo. Quanto mais próximos estes valores, mais preciso é o *software*.

As Tabela 4 e Tabela 5 mostram as configurações dos parâmetros de entrada para a predição de cobertura.

A Tabela 4 mostra os parâmetros de entrada para configurações das 5 ERBs, nesse caso está sendo mostrado os parâmetros de entrada da ERB AP1.

A Tabela 5 mostra os parâmetros de entrada para configurações dos *End Nodes*, nesse caso está sendo mostrado os parâmetros de entrada do cliente *Point*.

Tabela 4 – Parâmetros de entrada.

CelPlan DT LBG]	
Point Link Budget	
Downstream	
Site	AP1
Sector	1
Latitude	2°36'24.9"S
Longitude	44°10'38.5"W
Altitude (m)	42
Transmission Power (W)	1
Transmission Power (dBm)	30
Transmission Gains (dB)	0
Transmission Losses (dB)	0
Cable Loss (dB/100m)	0
Cable Length (m)	0
Connection Loss (dB)	0
Number of Connections	0
Transmission Antenna Gain (dBd)	7.86
Site Nominal ERP (W)	6.109
Site Nominal ERP (dBm)	37.86
Site Nominal EIRP (dBm)	40
Site Antenna	Cd850
Antenna Height (m)	20
Antenna Azimuth (°TN)	0
Antenna Inclination (°)	0
Antenna Polarization	Vertical
Antenna Nominal Gain (dBd)	9.2
Link Azimuth (°TN)	334.017
Antenna Azimuth Incidence (°)	334.017
Antenna Elevation Incidence (°)	-0.516
Antenna Pattern Gain (dBd)	8.95
Antenna Effective Gain (dBd)	7.61
Antenna Effective Gain (dBi)	9.75
Link Effective ERP (dBm)	37.61
Link Effective EIRP (dBm)	39.75
Site Prediction Model	II – Korowajczuk
Site Prediction Parameters	Prd 1
Site Prediction Adjustment	Ajt 1
	7742.944
Link Frequency (MHz)	250

Tabela 5 – Parâmetros de entrada do cliente.

Subscriber	Point
Latitude	2°32'39.05"S
Longitude	44°12'28.68"W
Altitude (m)	39
Antenna Height (m)	7
Antenna Azimuth (°TN)	154.018
Antenna Inclination (°)	-0.807
Antenna Nominal Gain (dBd)	6.86
Antenna Nominal Gain (dBi)	9
Reception Related Losses (dB)	0
Reception Related Gains (dB)	0
Downstream Signal Prediction (dBm)	-120.438
Radio Type	CPe
System	WiMAX (802.16e-2005)
Bandwidth per Carrier (MHz)	1.25
Reference Temperature (°K)	290
Receiver Noise Figure (dB)	8
Service Threshold (dBm)	XXX
Link Carrier to Noise Ratio (dB)	13.265
Link Service Margin (dB)	No Signal

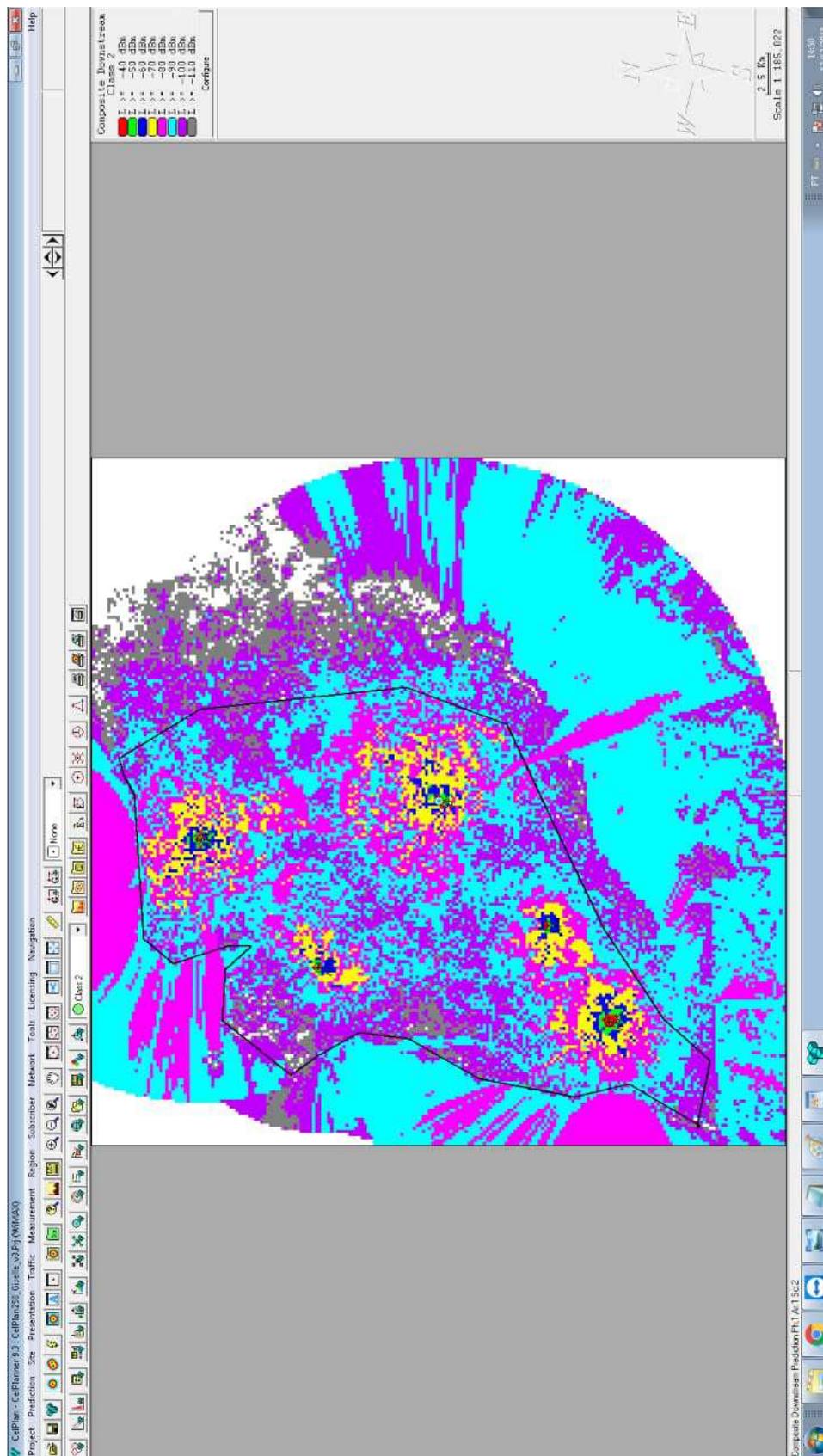
Fonte: O autor.

Figura 31 – Resultado dos cálculos da área coberta.

Latitud	Longitu	Rx(dB)	-2,47451 a -2,79923	-44,16177 a -44,40987	área=	98,19 %
-2,47455	-44,3285	4,8				
-2,47455	-44,3266	4				
-2,47455	-44,3246	2,7				
-2,47455	-44,3227	2,4				
-2,47455	-44,3207	3				
-2,47455	-44,3187	3,7				
-2,47455	-44,3168	3,9				
-2,47455	-44,3148	3,5				
-2,47455	-44,3129	2,9				
-2,47455	-44,3109	2,6				
-2,47455	-44,3089	2,5				
-2,47455	-44,307	2,1				
-2,47455	-44,305	2,1				
-2,47455	-44,3031	2,2				
-2,47455	-44,3011	0,8				
-2,47455	-44,2991	1,3				
-2,47455	-44,2972	2,4				
-2,47455	-44,2952	3,5				
-2,47455	-44,2933	5,4				

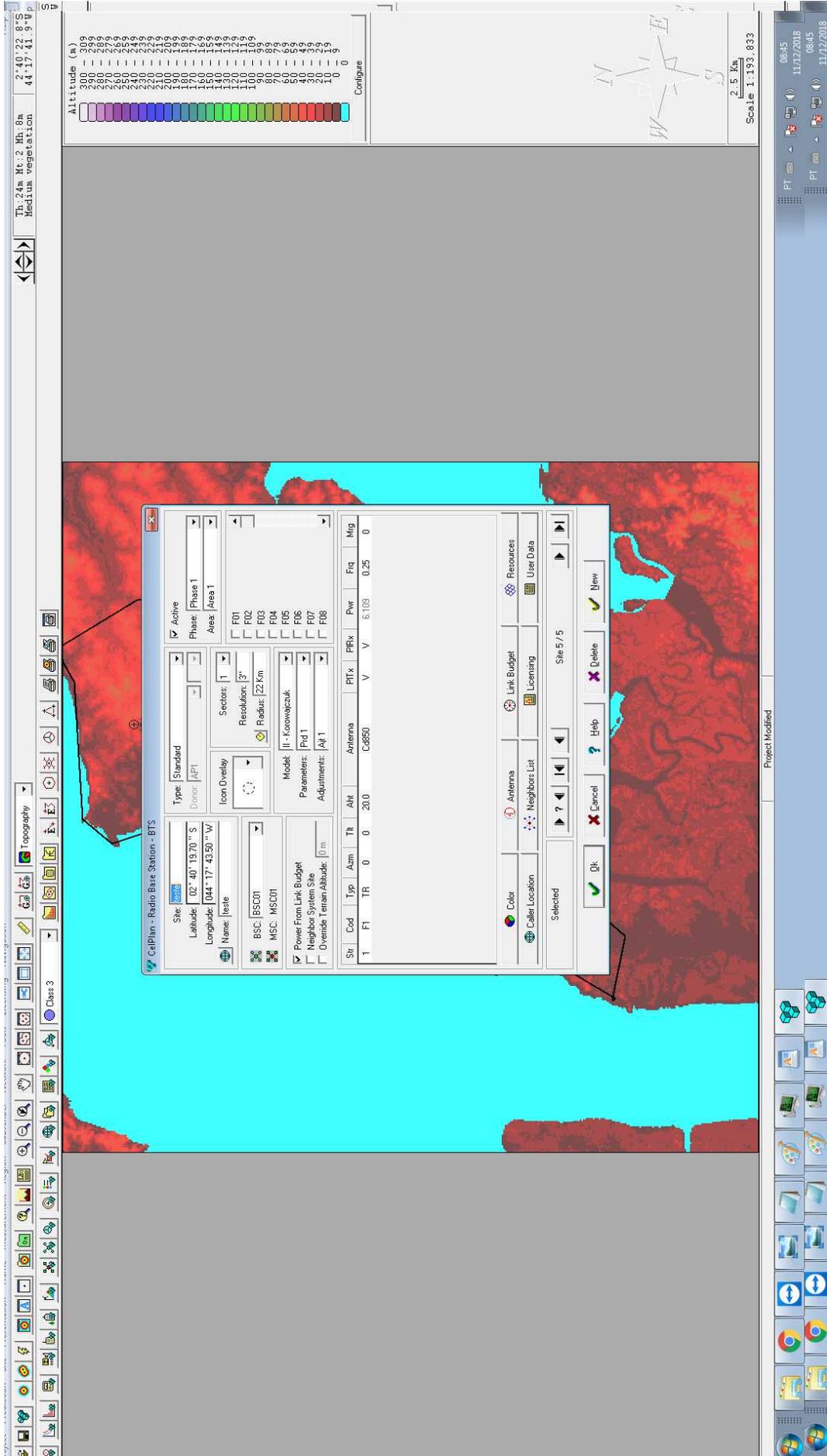
Fonte: O autor.

Figura 32 – Resultado da predição de cobertura da rede ponto-multiponto com 5 ERBs no Celplanner.



Fonte: O autor.

Figura 33 – Modelo de propagação



Fonte: O autor.

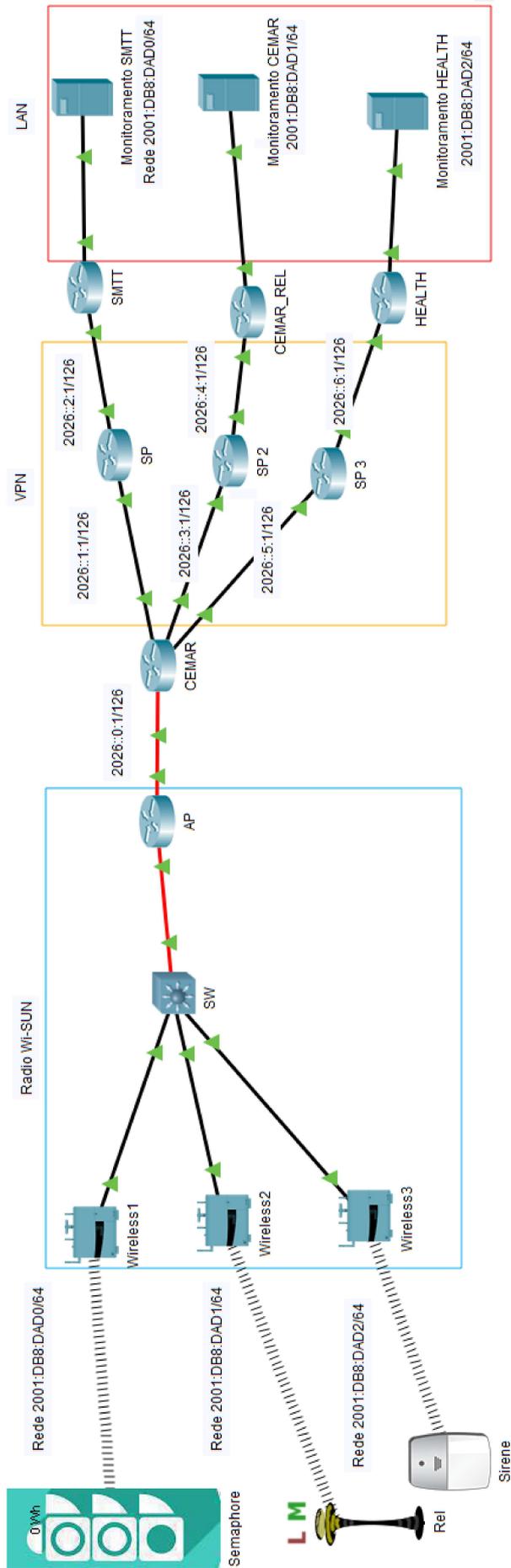
## 8 SIMULAÇÃO NO *PACKET TRACER*

Esta simulação visa confirmar a viabilidade técnica do transporte de dados em ambiente multisserviços multi-usuários.

A Figura 34 mostra cenário simulado no *software Cisco Packet Tracer* no qual o retângulo na cor azul representa, o rádio com tecnologia Wi-SUN, o retângulo na cor laranja representa a parte em que será implementado a VPN(*Virtual Private Network site-to-site*) e por fim o retângulo na cor vermelho representa a LAN(*Local Area Network*) de cada serviço. Será utilizando roteamento OSPFv3(*Open Shortest Path First version 3*) e uma VPN site-to-site para as empresas clientes, que compartilham a mesma infraestrutura da CEMAR. Cada rede será separada por uma VLAN(*Virtual Local Area Network*). As redes de cada cliente será:

- Rede de semáforos: 2001:DB8:DAD0/64
- Rede de religadores: 2001:DB8:DAD1/64
- Rede de Sirenes: 2001:DB8:DAD2/64

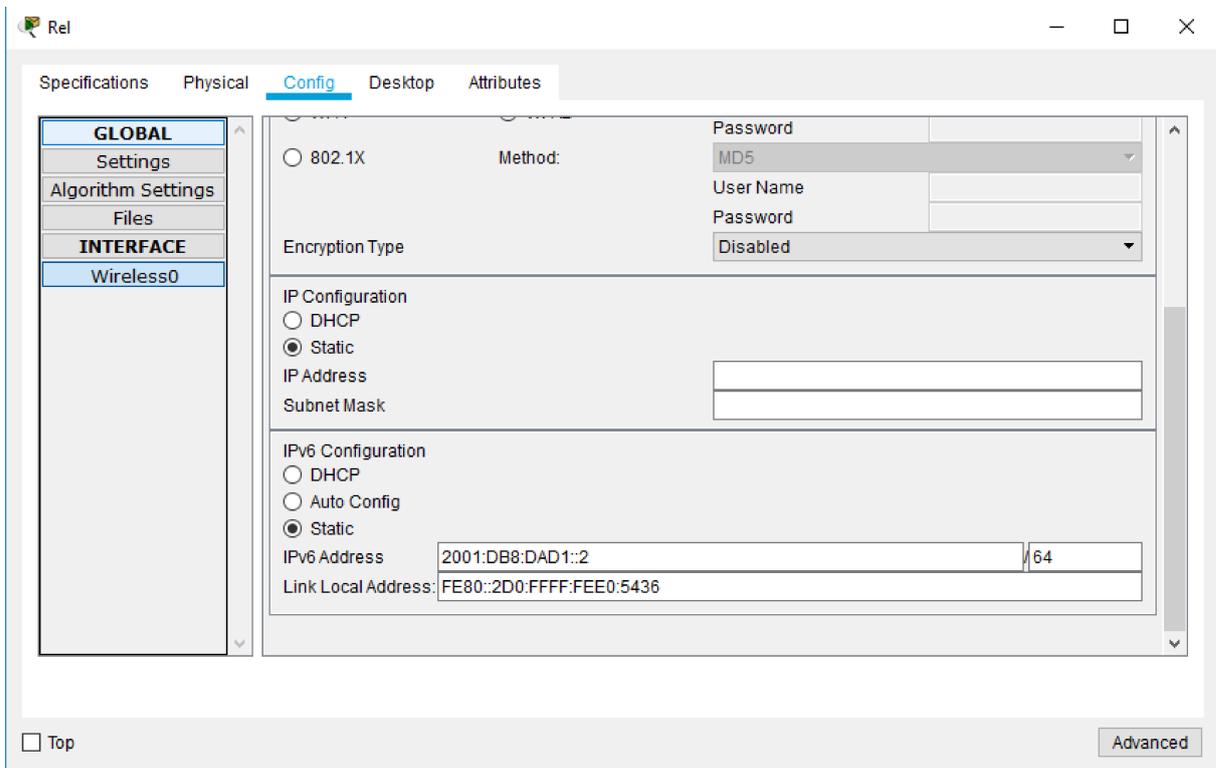
Figura 34 – Topologia de Rede multisserviço



Fonte: O autor.

A seguir será mostrado as configurações de IPv6 dos dispositivos, configurações de VLAN, OSPFv3 e VPN. As configurações de IPv6 dos dispositivos são apresentados nas Figura 35, Figura 36 e Figura 37, respectivamente. A Tabela 6 mostra as configurações feitas no ativo SW, ilustrado na Figura 34.

Figura 35 – Configuração de IPv6 do religador.



Fonte: O autor.

Tabela 6 – Configuração de VLANs.

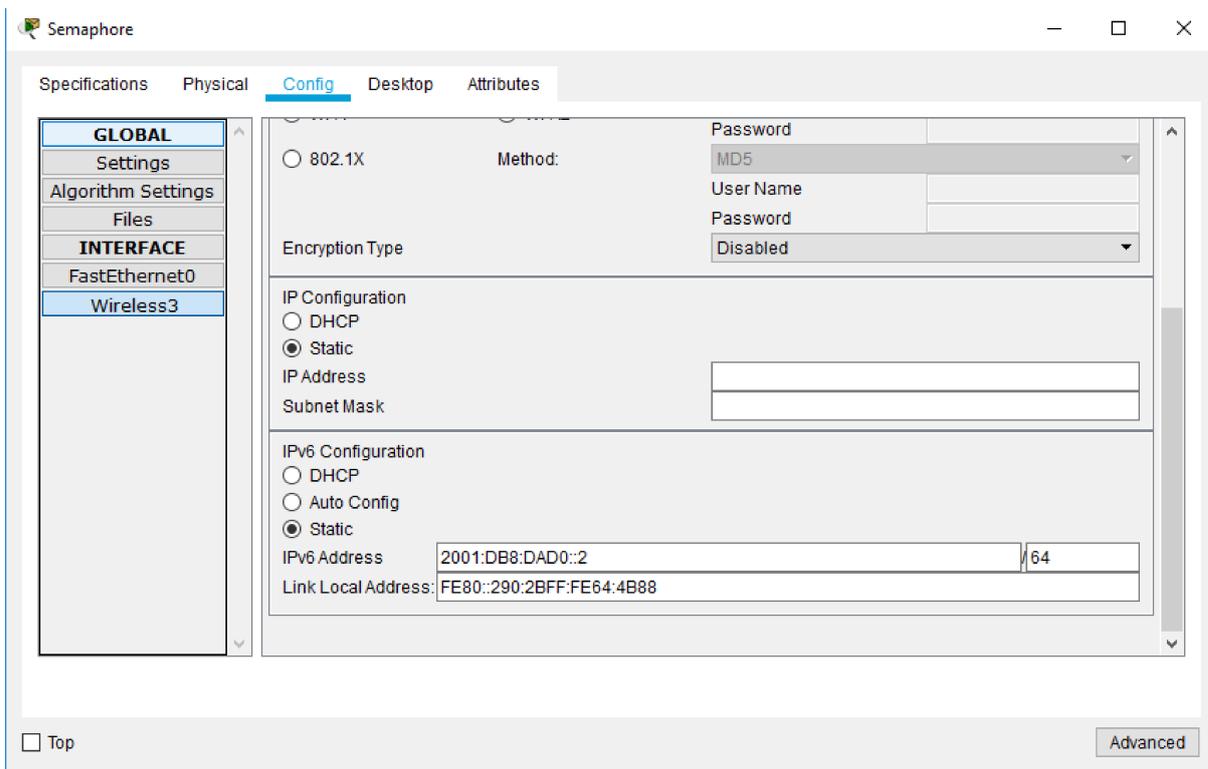
```
Switch(config)#vlan 1000
Switch(config)# name semáforo
Switch(config)#vlan 1002
Switch(config)# name religador
Switch(config)#vlan 1004
Switch(config)# name health
```

Fonte: O autor.

Na Tabela 6 é mostrado apenas a criação e sendo atribuído nome as VLANs. Na Tabela 7 é mostrado a configuração das portas em modo *access* associadas as VLANs 1000, 1002 e 1004, respectivamente, e a porta em modo *trunk* permitindo a passagem das VLANs.

Para esse cenário foi configurado o ROAS (*Router-on-a-stick*), uma técnica que utiliza um roteador para fazer encaminhamento de tráfego entre VLANs. Um *switch*

Figura 36 – Configuração de IPv6 dos semáforos.



Fonte: O autor.

permite múltiplas VLANs coexistirem, isso significa que máquinas associadas ao mesmo *switch* não podem enviar *frames Ethernet* uma para outra. Se houver necessidade de comunicação, então um roteador deve ser alocado entre as duas VLANs para encaminhar os pacotes entre os *hosts*. Na Tabela 8, mostra a configuração das subinterfaces no roteador AP.

A configuração de roteamento foi feita no roteador AP e CEMAR, no entanto será mostrado na Tabela 9 apenas as configurações no roteador AP, pois a configuração é a mesma no roteador CEMAR.

A Tabela 10, mostra as configurações de VPNs site-to-site, os comandos das linhas 01 até 13 representam apenas as configurações básicas para assegurar conectividade entre as unidades através da Internet. Nas linhas de 14 a 24 são definidas as políticas de segurança onde informamos a chave compartilhada (SENHA) que será utilizada nas pontas foi escolhido o algoritmo de criptografia (AES de 128 bits), etc.

Nas linhas de 25 a 33 é criada uma interface lógica do tipo túnel que representa a VPN propriamente dita, sendo que nessa interface temos que vincular nossa rede privativa com a Internet pública (endereços de origem e destino). Por fim, na linha 34 é criada uma rota estática apontando para rede local da unidade remota através do túnel virtual recém-criado. As configurações do roteador localizado no SMTT são exatamente a mesmas,

Tabela 7 – Associação das vlans as portas de acesso e configuração da porta trunk

```
Switch(config)#interface GigabitEthernet1/0/1
Switch(config-if)#switchport access vlan 1000
Switch(config-if)#switchport mode access
Switch(config-if)#switchport nonegotiate

Switch(config)#interface GigabitEthernet1/0/2
Switch(config-if)#switchport access vlan 1002
Switch(config-if)#switchport mode access
Switch(config-if)#switchport nonegotiate

Switch(config)#interface GigabitEthernet1/0/3
Switch(config-if)#switchport access vlan 1004
Switch(config-if)#switchport mode access
Switch(config-if)#switchport nonegotiate

Switch(config)#interface GigabitEthernet1/1/1
Switch(config-if)#switchport trunk encapsulation dot1q
Switch(config-if)#switchport mode trunk
Switch(config-if)#switchport nonegotiate
```

Tabela 8 – Configuração dos troncos em IPv6 no AP.

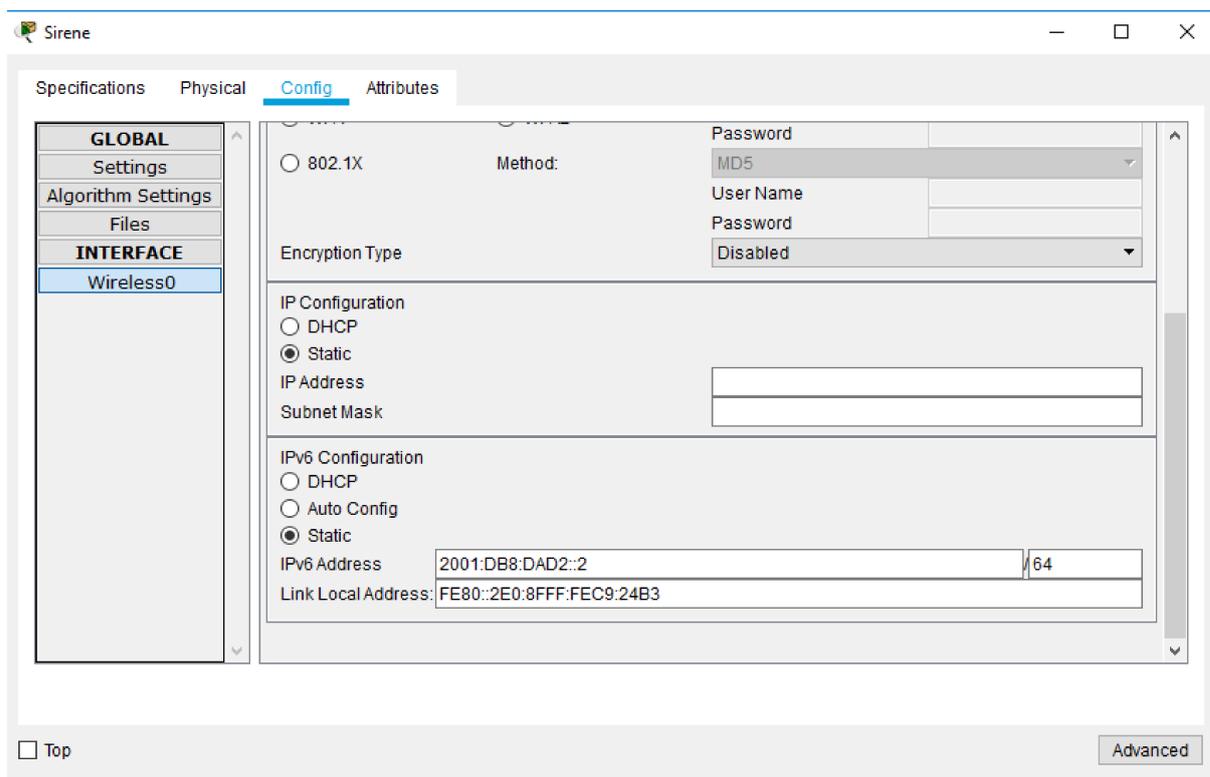
```
AP(config-subif)#interface GigabitEthernet0/1/0.1000
  AP(config-subif)#encapsulation dot1Q 1000
  AP(config-subif)#ipv6 address 2001:DB8:DAD0::1/64

AP(config-subif)#interface GigabitEthernet0/1/0.1002
  AP(config-subif)#encapsulation dot1Q 1002
  AP(config-subif)#ipv6 address 2001:DB8:DAD1::1/64

AP(config-subif)#interface GigabitEthernet0/1/0.1004
  AP(config-subif)# encapsulation dot1Q 1004
  AP(config-subif)#ipv6 address 2001:DB8:DAD2::1/64
```

Fonte: O autor.

Figura 37 – Configuração de IPv6 das sirenes.



Fonte: O autor.

mutando apenas os endereços.

A Figura 38 e Figura 39, mostram a configuração de ipv6 tanto do cliente semáforo como do servidor de monitoramento, respectivamente.

A Figura 40, mostra a comunicação através do protocolo ICMPv6 entre o cliente semáforo e o servidor de monitoramento da SMTT. De acordo com a Figura 40 é possível perceber que há viabilidade de comunicação entre os *hosts* através da rede de monitoramento, confirmando a viabilidade técnica de segmentar tráfego de vários tipos de serviços por meio de diferentes VLANs e de compartilhar uma mesma infraestrutura de rede por meio de distintas VPNs.

Tabela 9 – Configuração de roteamento no AP.

```
AP(config)#ipv6 unicast-routing
AP(config)#ipv6 cef

AP(config)#interface Loopback0
AP(config-if)#ipv6 address 2004:ABAB::/64 eui-64
AP(config-if)#ipv6 enable

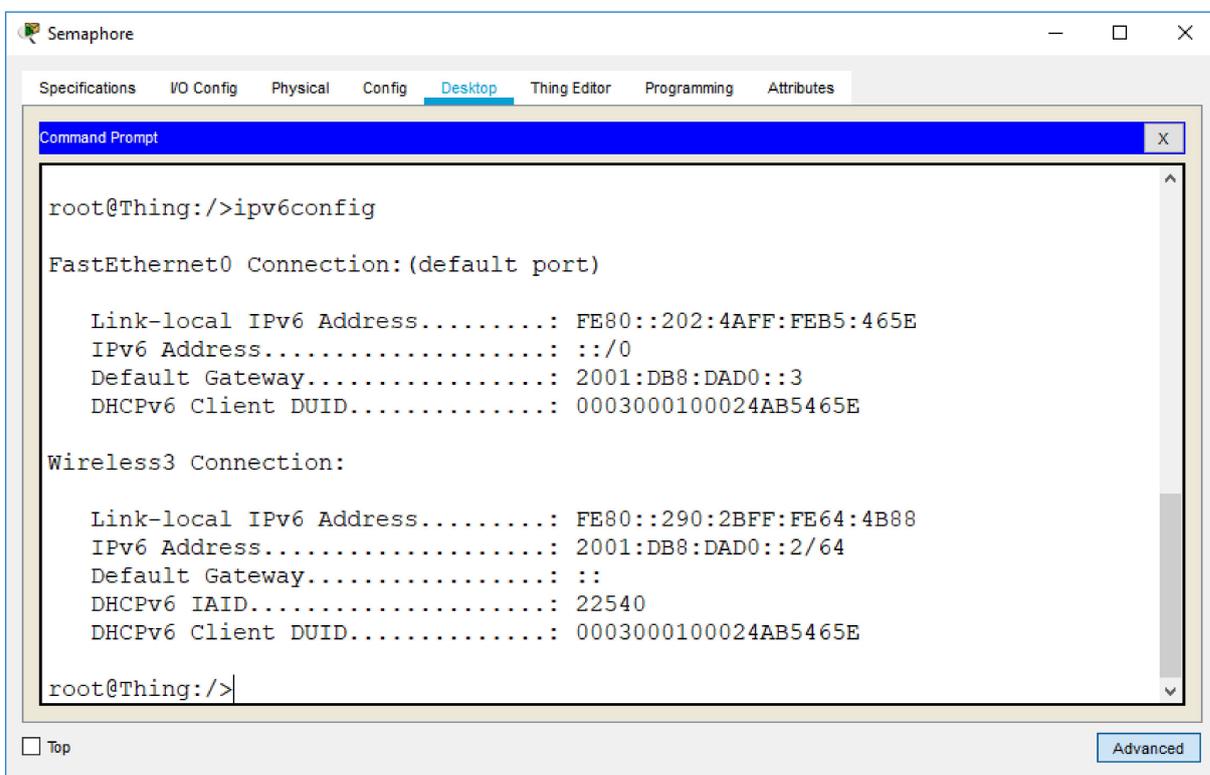
AP(config)#interface GigabitEthernet0/1/0.1000
AP(config-subif)#ipv6 ospf 1 area 0

AP(config)#interface GigabitEthernet0/1/0.1002
AP(config-subif)#ipv6 ospf 1 area 0

AP(config)#interface GigabitEthernet0/1/0.1004
AP(config-subif)#ipv6 ospf 1 area 0
```

Fonte: O autor.

Figura 38 – Configuração IPv6 semáforo.



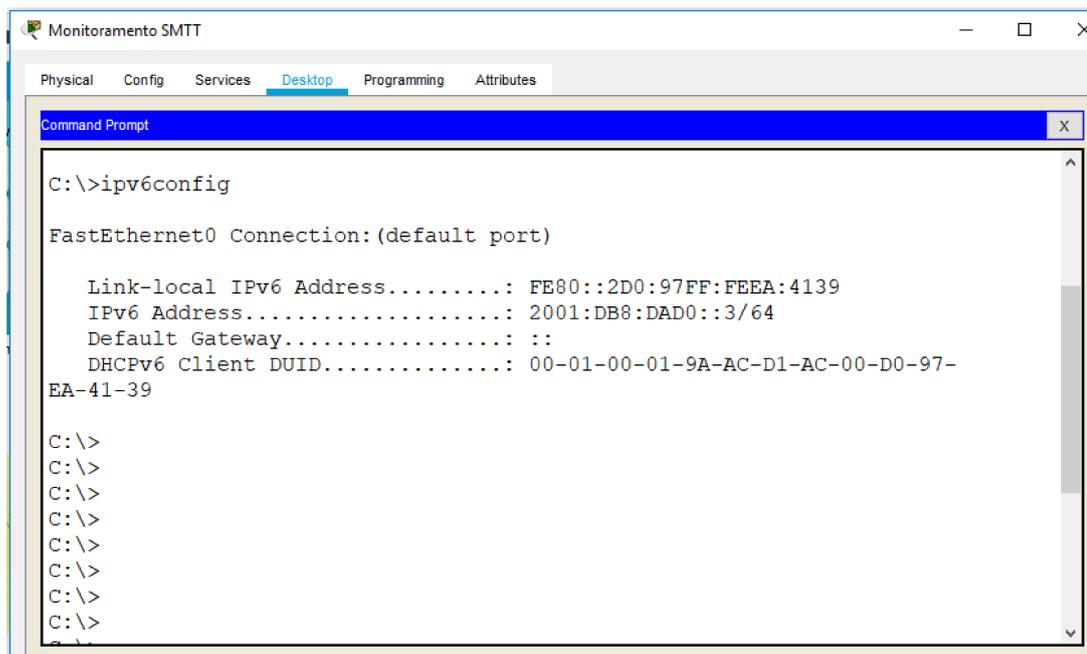
Fonte: O autor.

Tabela 10 – Configuração de VPN no Roteador CEMAR.

```
01. CEMAR(config)# ipv6 unicast-routing
02. CEMAR(config)# ipv6 route ::/0 2026::1:1::F
03. CEMAR(config)# interface f0/0
04. CEMAR(config)# description Link-ISP
05. CEMAR(config-if)# ipv6 enable
06. CEMAR(config-if)# ipv6 address 2026::1:1::2/64
07. CEMAR(config-if)# no shutdown
08. CEMAR(config-if)# exit
09. CEMAR(config-if)# interface f1/0
10. CEMAR(config-if)# description LAN-CEMAR
11. CEMAR(config-if)# ipv6 enable
12. CEMAR(config-if)# ipv6 address 2001:DB8:DAD0:1::1/64
13. CEMAR(config-if)# no shutdown
14. CEMAR(config-if)# exit
15. CEMAR(config)# crypto isakmp key 0 SENHA address ipv6 ::/0
16. CEMAR(config)# crypto isakmp policy 1
17. CEMAR(config-isakmp)# encryption aes 128
18. CEMAR(config-isakmp)# authentication pre-share
19. CEMAR(config-isakmp)# exit
20. CEMAR(config)# crypto ipsec transform-set VPNv6 esp-aes 128 esp-sha-hmac
21. CEMAR(cfg-crypto-trans)# mode tunnel
22. CEMAR(cfg-crypto-trans)# exit
23. CEMAR(config)# crypto ipsec profile VPNv6
24. CEMAR(ipsec-profile)# set transform-set VPNv6
25. CEMAR(ipsec-profile)# exit
26. CEMAR(config)# interface tunnel 0
27. CEMAR(config-if)# description VPN-to-SMTT
28. CEMAR(config-if)# ipv6 enable
29. CEMAR(config-if)# ipv6 address 2026::1:1/126 VPN
30. CEMAR(config-if)# tunnel source f0/0
31. CEMAR(config-if)# tunnel destination 2026::2:1/126
32. CEMAR(config-if)# tunnel mode ipsec ipv6
33. CEMAR(config-if)# tunnel protection ipsec profile VPNv6
34. CEMAR(config-if)# exit
35. CEMAR(config-if)# ipv6 route 2001:DB8:DAD0::/64 tunnel 0
```

Fonte: O autor.

Figura 39 – Configuração IPv6 do servidor de monitoramento.



The screenshot shows a Packet Tracer window titled 'Monitoramento SMTT'. The 'Desktop' tab is active, displaying a 'Command Prompt' window. The command prompt shows the execution of the 'ipconfig' command, which displays the IPv6 configuration for the 'FastEthernet0' interface. The configuration includes a link-local address, a global IPv6 address, a default gateway, and a DHCPv6 client DUID.

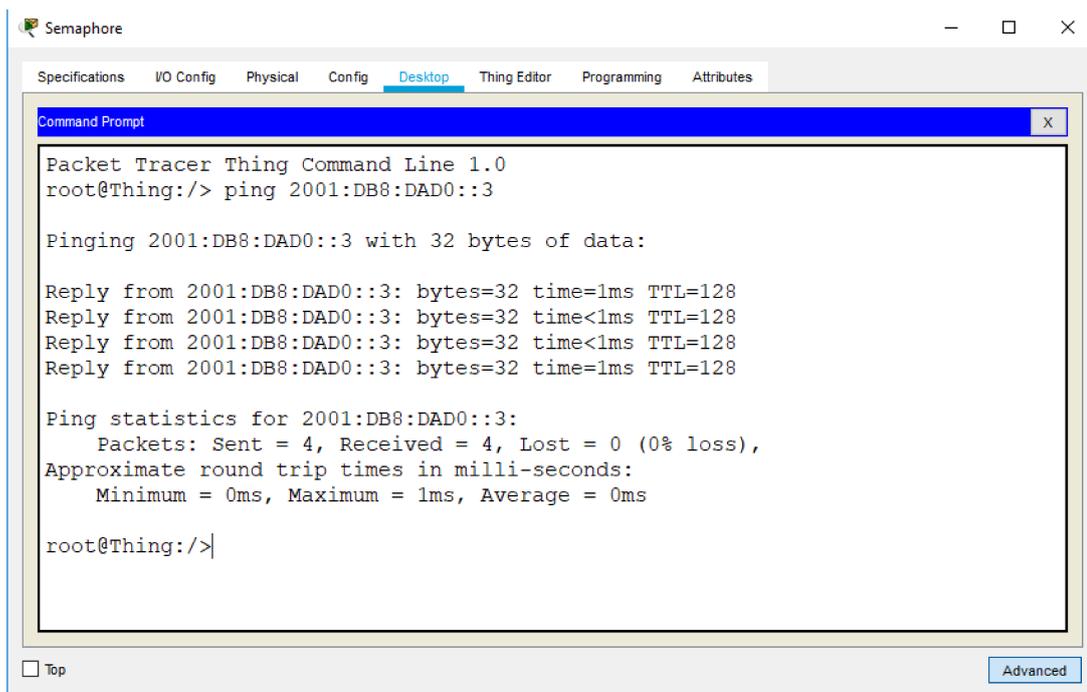
```
C:\>ipconfig

FastEthernet0 Connection:(default port)

    Link-local IPv6 Address . . . . . : FE80::2D0:97FF:FEEA:4139
    IPv6 Address . . . . . : 2001:DB8:DAD0::3/64
    Default Gateway . . . . . : ::
    DHCPv6 Client DUID . . . . . : 00-01-00-01-9A-AC-D1-AC-00-D0-97-
EA-41-39

C:\>
C:\>
C:\>
C:\>
C:\>
C:\>
C:\>
C:\>
```

Fonte: O autor.

Figura 40 – Comunicação entre o *host* Semáforo e o servidor de monitoramento.

The screenshot shows a Packet Tracer window titled 'Semáforo'. The 'Desktop' tab is active, displaying a 'Command Prompt' window. The command prompt shows the execution of the 'ping' command to the IPv6 address 2001:DB8:DAD0::3. The output shows four successful replies with 32 bytes of data, a time of 1ms, and a TTL of 128. Ping statistics are also displayed, showing 4 packets sent, 4 received, and 0% loss.

```
Packet Tracer Thing Command Line 1.0
root@Thing: /> ping 2001:DB8:DAD0::3

Pinging 2001:DB8:DAD0::3 with 32 bytes of data:

Reply from 2001:DB8:DAD0::3: bytes=32 time=1ms TTL=128
Reply from 2001:DB8:DAD0::3: bytes=32 time<1ms TTL=128
Reply from 2001:DB8:DAD0::3: bytes=32 time<1ms TTL=128
Reply from 2001:DB8:DAD0::3: bytes=32 time=1ms TTL=128

Ping statistics for 2001:DB8:DAD0::3:
    Packets: Sent = 4, Received = 4, Lost = 0 (0% loss),
    Approximate round trip times in milli-seconds:
        Minimum = 0ms, Maximum = 1ms, Average = 0ms

root@Thing: />
```

Fonte: O autor.

## 9 CONCLUSÃO

Os objetivos propostos neste trabalho foram alcançados. Foi desenvolvida uma solução de rede de comunicação de dados com capacidade de compartilhamento da infraestrutura de rede para operação em ambiente multisserviços e multi-usuários com projeto de predição de cobertura em frequências licenciadas sub-GHz para redes de comunicação ponto-multiponto e multiponto-multiponto (mesh) que mostraram não apenas menor necessidade de elementos de infraestrutura (ERBs) como também potencial de compartilhamento da rede resultando na redução de despesas financeiras com CAPEX na implantação e OPEX na operação e manutenção da rede, esses resultados foram obtidos por meio de predições e foram apresentados em forma de figuras no decorrer deste trabalho. Analisando as predições por meio de imagens e tabelas percebeu-se que tanto a predição feita pelo Radio Mobile como a do Celplanner houve uma cobertura de mais de 90% da cidade de São Luís.

Através desse trabalho foi possível verificar o grande potencial das tecnologias LPWA para o cenário de Internet das Coisas e que a tecnologia Wi-SUN está de acordo com as normas vigentes no Brasil para a faixa de 250 MHz. Por meio de imagens e tabelas foi possível perceber a viabilidade da implantação de uma infraestrutura compartilhada entre vários usuários com o tráfego separado por VLAN e tendo um tunelamento VPN para garantir a segurança dos dados. Esse tipo de solução é perfeitamente viável devido a pequena quantidade de dados enviados pelos *End Nodes*. Os resultados deste trabalho podem ser de grande utilidade para a implantação desse tipo de projeto em empresas, para aplicação do mesmo tipo de topologia entre outras entidades.

## 10 TRABALHOS FUTUROS

Os trabalhos futuros previstos para complementar ou estender o escopo desta pesquisa são:

- Implementar o mesmo tipo de topologia de forma prática;
- Implementar a solução em protótipo de rádio, utilizando tecnologia SDR (*Software Defined Radio*).

## Referências

- ALLIANCE, L. Lorawan™ 1.1 specification. *technical specification*, 2017. Citado na página 25.
- ALLIANCE, W. *Comparing IoT Networks at a Glance*. 2017. Disponível em: <[https://www.wi-sun.org/wp-content/uploads/Wi-SUN-Alliance-Comparing\\_IoT\\_Networks-r1.pdf](https://www.wi-sun.org/wp-content/uploads/Wi-SUN-Alliance-Comparing_IoT_Networks-r1.pdf)>. Acesso em: 31-Jan-2019. Citado na página 27.
- ANTEUR, M. et al. Ultra narrow band technique for low power wide area communications. In: IEEE. *2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. [S.l.], 2015. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 23.
- CHAMBERLIN, K.; LUEBBERS, R. An evaluation of longley-rice and gtd propagation models. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, IEEE, v. 30, n. 6, p. 1093–1098, 1982. Citado na página 44.
- CODE, R. *Radio Mobile*. 2017. Disponível em: <http://www.ve2dbe.com/rmonline.html>. Acessado em: 22 de março de 2017. Citado na página 51.
- EVANS, D. *The Internet of Things. How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything*. Cisco IBSG, 2011. 2011. Citado na página 17.
- HARADA, H. et al. Ieee 802.15. 4g based wi-sun communication systems. *IEICE Transactions on Communications*, The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, v. 100, n. 7, p. 1032–1043, 2017. Citado 4 vezes nas páginas 27, 28, 30 e 31.
- HAYKIN, S.; MOHER, M. *Sistemas de Comunicação-5*. [S.l.]: Bookman Editora, 2011. Citado na página 47.
- HUFFORD, G. A. et al. *A guide to the use of the ITS irregular terrain model in the area prediction mode*. [S.l.]: US Department of Commerce, National Telecommunications and Information ... , 1982. Citado 2 vezes nas páginas 49 e 50.
- KOROWAJCZUK, L. *LTE, WiMAX and WLAN network design, optimization and performance analysis*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. Citado na página 39.
- KOROWAJCZUK, L.; XAVIER, B. d. S. A. *Designing CDMA2000 systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2005. Citado na página 39.
- KUO, C.-T.; CHANG, V.; LEI, C.-L. A feasibility analysis for edge computing fusion in lpwa iot environment with sdn structure. In: IEEE. *2017 International Conference on Engineering and Technology (ICET)*. [S.l.], 2017. p. 1–6. Citado 3 vezes nas páginas 21, 22 e 26.
- LONGLEY, A. G.; RICE, P. L. *Prediction of tropospheric radio transmission loss over irregular terrain. A computer method-1968*. [S.l.], 1968. Citado na página 51.

- MEKKI, K. et al. A comparative study of lpwan technologies for large-scale iot deployment. *ICT Express*, Elsevier, v. 5, n. 1, p. 1–7, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 25.
- MOCHIZUKI, K. et al. Development and field experiment of wide area wi-sun system based on ieee 802.15. 4g. In: IEEE. *2016 IEEE 3rd World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*. [S.l.], 2016. p. 76–81. Nenhuma citação no texto.
- OLIVEIRA, C. H. R. de; COSTA, R. de S.; CARVALHO, G. B. Iot radio in 250 MHz. In: THE STEERING COMMITTEE OF THE WORLD CONGRESS IN COMPUTER SCIENCE, COMPUTER. *Proceedings of the International Conference on Wireless Networks (ICWN)*. [S.l.], 2017. p. 76–80. Citado na página 59.
- OLIVEIRA, R. A. et al. Propagation path loss prediction using parabolic equations for narrow and wide angles. In: IEEE. *2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. [S.l.], 2013. p. 964–968. Citado na página 43.
- PHAM, C. Qos for long-range wireless sensors under duty-cycle regulations with shared activity time usage. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, ACM, v. 12, n. 4, p. 33, 2016. Citado na página 25.
- RAZA, U.; KULKARNI, P.; SOORIYABANDARA, M. Low power wide area networks: An overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 19, n. 2, p. 855–873, 2017. Citado na página 32.
- RICE, P. et al. Transmission loss predictions for tropospheric communication circuits, nbs tech. *Note 101, I and II (Natl. Tech. Info. Service, Springfield, Va 2215T, AD 687 820 and AD 687 821)*, 1967. Nenhuma citação no texto.
- SECTOR, S.; ITU, O. Series y: Global information infrastructure, internet protocol aspects and next-generation networks next generation networks–frameworks and functional architecture models. *International Telecommunication Union: Geneva, Switzerland*, 2012. Citado na página 17.
- SIGFOX, S. *Sigfox technical overview*. 2017. Citado na página 24.
- SILVA, R. *Características da Propagação Ponto-Área na Faixa de 2 a 15 GHz com Aplicação em Comunicações Móveis*. Tese (Doutorado) — Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, 2004. Citado na página 42.
- SYSTEMS, C. *Packet Tracer*. 2017. Disponível em: <https://www.netacad.com/pt-br/courses/packet-tracer>. Acessado em: 22 de março de 2017. Nenhuma citação no texto.
- TANEJA, M. 802.11 ah-lpwa interworking. In: IEEE. *2016 IEEE Netsoft Conference and Workshops (Netsoft)*. [S.l.], 2016. p. 441–446. Nenhuma citação no texto.
- TANEJA, M. Lte-lpwa networks for iot applications. In: IEEE. *2016 International conference on information and communication technology convergence (ICTC)*. [S.l.], 2016. p. 396–399. Citado na página 21.
- XU, J. et al. Narrowband internet of things: Evolutions, technologies, and open issues. *IEEE Internet of Things Journal*, IEEE, v. 5, n. 3, p. 1449–1462, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 21.